

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA
PARA A AMAZÔNIA - CITA**

Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca do coco do mururu (*Astrocaryum spp*) para diferentes fins energéticos.

NADMA FARIAS KUNRATH

**RIO BRANCO - ACRE
2016**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-
GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A
AMAZÔNIA



Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca do coco do murmuru (*Astrocaryum spp*) para diferentes fins energéticos

NADMA FARIAS KUNRATH

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciências**.

Área de Concentração: Ciência e Inovação Tecnológica.

Orientador _____
Prof. Dr. Délcio Dias Marques

Coorientador _____
Prof. Dr. Carlos Eduardo Garção de Carvalho

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

K965a Kunrath, Nadma Farias, 1962 -
 Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca de coco
 murmuru (*Astrocaryum spp*) para diferentes fins energéticos / Nadma
 Farias Kunrath – 2016.
 100 f.; Il.: 30 cm.

 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de
 Pós-Graduação em Ciências e Inovação Tecnológica para a Amazônia,
 2016.

 Inclui referências bibliográficas e apêndices.

 Orientador: Prof. Dr. Délcio Dias Marques.

 Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Garção de Carvalho.

 1. Briquete 2. Biomassa 3. Energia – Fontes alternativas – Coco
 murmuru I. Título.

CDD: 662.8

Bibliotecária: Alanna Santos Figueiredo – CRB-11: 1003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A
AMAZÔNIA - CITA

Nadma Farias Kunrath

Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca do coco do
murmuru (*Astrocaryum spp*) para diferentes fins energéticos.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 22/06/2016



Prof. Dr. Carlos Eduardo Garçon de Carvalho (Coorientador)
Universidade Federal do Acre



Prof. Dra. Patrícia Gomes Ribeiro Amorim
Universidade Federal do Acre



Prof. Dr. Edcarlos Miranda de Souza
Universidade Federal do Acre

Dedico

à minha mãe Lourdes Farias Kunrath (*in memoriam*),
ao meu pai Athaides Kunrath (*in memoriam*),
ao meu irmão Fabrício Farias Kunrath,
às minhas irmãs: Norma (*in memoriam*),
Nelma, Négida, Nívia, Roseli, Noeli e Cintia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Délcio Dias Marques por todos os ensinamentos no decorrer do curso, pois muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual, sobretudo, pelas dicas valiosas após leituras minuciosas e profundas deste trabalho.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Garção de Carvalho pelas longas horas de discussão sobre o tema e por sempre ajudar quando o procurei, sobretudo pela sincera amizade e auxílio em momentos difíceis que surgiram durante todo o processo de execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Edcarlos Miranda de Souza pelos ensinamentos e ajuda nos métodos estatísticos, pois é através deles que as conclusões do trabalho são validadas.

Ao Prof. Dr. Henrique Jorge de Freitas por ter cedido o laboratório de Anatomia Animal do curso de Medicina Veterinária da UFAC para o uso da bomba calorimétrica.

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamajy e a sua equipe da Universidade Federal de São Carlos - Sorocaba, por me receberem de forma carinhosa e contribuírem de forma significativa através de ensinamentos na área específica.

Ao Centro de Tecnologia da Madeira e do Mobiliário – CETEMM pelo apoio na realização dos ensaios de compressão à resistência dos briquetes.

Ao colega e amigo Israel pela dedicação e ajuda incansável na realização das tarefas difíceis na condução do experimento e apoio nas decisões.

Aos colegas da Divisão de Tecnologia de Energia de Fontes Renováveis: Alcides, pelas contribuições na revisão da escrita e formatação, e José Raimundo (Pepe), pelo apoio nas análises de laboratório.

À Universidade Federal do Acre – UFAC e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia – CITA pela oportunidade.

À Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC, pelo apoio na execução do mestrado.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Acre – FAPAC, pelo apoio financeiro a esta dissertação.

*“A base e o solo sobre o qual todo o nosso conhecimento e aprendizado repousa,
é o inexplicável.”*

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

O alto consumo de energia tem causado grandes preocupações sobre o futuro da humanidade. A crise internacional do petróleo dos anos 70 e 90, a consciência ambiental e a preocupação com o esgotamento de recursos não renováveis, incentivou a busca por fontes alternativas de energia no Brasil e no mundo. Uma dessas fontes é a biomassa, que através de diferentes processos produtivos geram grandes quantidades de resíduos. Uma forma de aproveitamento desse material é transformá-lo em briquetes. No Acre, o processo de extração da gordura da amêndoa do coco de *Astrocaryum spp* (murmuru), realizado em uma usina de extração de óleo, gera uma quantidade considerável de resíduos, como a casca e a gordura residual. Esses materiais, podem ser agregados ao processo produtivo na geração de energia na própria usina, diminuindo os custos de produção. O objetivo desse trabalho foi avaliar a biomassa residual gerada na usina de extração de óleo com a finalidade de produzir briquetes a partir da casca do coco do murmuru e avaliar as suas propriedades físicas, químicas e energéticas. As características analisadas na biomassa foram umidade, voláteis, cinzas, carbono fixo e densidade à granel. Nos briquetes, as análises foram para a expansão longitudinal, densidade aparente, poder calorífico superior (PCS), densidade energética e resistência à compressão. Os parâmetros definidos para a produção dos briquetes foram: pressão de 15 toneladas, temperatura de 150° C, tempo de prensagem de 5 minutos e tempo de resfriamento de 5 minutos. As variáveis analisadas foram concentração de aglutinante e granulometria, sendo a gordura residual de murmuru (GRM) usada como aglutinante. Para as avaliações dos briquetes foi empregado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), num esquema fatorial 5x4, sendo 0%, 5%, 10%, 15% e 20% as proporções do aglutinante, e as frações de 35, 60, 100 e 200 mesh para a granulometria. Os tratamentos foram comparados entre si por meio do teste Tukey, a 5% de probabilidade. Os resultados mostraram que os valores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo se encontram dentro dos padrões referenciados na literatura científica para a produção de briquetes, e apresentaram os melhores resultados na granulometria de 35 mesh. Para a densidade aparente, os briquetes com 20% de aglutinante e granulometria de 200 mesh são os mais recomendáveis sob o ponto de vista comercial. O poder calorífico superior não se apresentou como uma propriedade determinante para escolha comercial de briquetes. Quanto a densidade energética, os briquetes com 20% de aglutinante se mostraram recomendáveis comercialmente. Os briquetes produzidos sem o uso do aglutinante e com partículas mais finas mostraram os melhores resultados para a resistência à compressão, todavia nas concentrações de 15% e 20% os resultados tenderam a valores mais altos para as granulometrias mais finas também, com destaque para 200 mesh.

Palavras-chave: Briquete. Biomassa. Murmuru. *Astrocaryum*.

ABSTRACT

The high energy consumption has caused great concerns about the future of humanity. The international oil crisis of the 70s and 90s, environmental awareness and concern for the depletion of nonrenewable resources, encouraged the search for alternative sources of energy in Brazil and worldwide. One such source is biomass, which through different production processes generate large amounts of waste. One way to use this material is to turn it into briquettes. In Acre, the process of extracting the fat almond *Astrocaryum spp* (murmuru) coconut held in an oil extraction plant, generates a considerable amount of waste such as bark and residual fat. These materials can be added to the production process in power generation in the plant itself, reducing production costs. The aim of this study was to evaluate the residual biomass generated in the oil extraction plant in order to produce briquettes from murmuru coconut shell and evaluate their physical, chemical and energy properties. The characteristics analyzed in biomass were moisture, volatile, ash, fixed carbon and density in bulk. The briquettes, the analyzes were for longitudinal expansion, bulk density, the gross calorific value (PCS), energy density and compressive strength. The parameters set for the production of briquettes were 15 tons of pressure, temperature 150 C, pressing time of 5 minutes and cooling time of 5 minutes. The variables were concentration of binder and particle size, and the residual fat murmuru (GRM) used as a binder. For the evaluations of briquettes was used completely randomized design (CRD), in a 5x4 factorial scheme, with 0%, 5%, 10%, 15% and 20% the proportion of the binder, and the fractions of 35, 60, 100 and to 200 mesh particle size. Treatments were compared using the Tukey test at 5% probability. The results showed that the values of moisture, volatiles, fixed carbon and ash are within the standard referenced in the literature for the production of briquettes, and showed better results in a particle size of 35 mesh. For the apparent density briquettes with 20% binder and 200 mesh particle size are most desirable from a commercial standpoint. The higher calorific not presented as a determining property for commercial choice briquettes. The energy density briquettes with 20% binder proved commercially recommendable. The briquettes produced without using a binder and fine particles showed the best results for compressive strength, but at 15% and 20% concentrations results tended to higher values for the finer particle sizes too, especially 200 mesh.

Keywords: Briquette. Biomass. Murmuru. *Astrocaryum*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Pré-testes sem e com tratamentos térmicos e diferentes tempos de pressão em temperatura constante (150°C)	43
Tabela 2	Valores em porcentagens da casca de murmuru retida nas peneiras.....	51
Tabela 3	Análise de variância para a variável resposta umidade, considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.....	52
Tabela 4	Valores médios de umidade (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh)	53
Tabela 5	Valores médios de umidade (%) das massas, considerando o efeito do aglutinante (%) e das granulometrias (mesh)	54
Tabela 6	Análise de variância para a variável resposta voláteis (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.....	55
Tabela 7	Valores médios de voláteis (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	56
Tabela 8	Análise de variância para a variável resposta cinzas (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.....	57
Tabela 9	Valores médios de cinzas (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	57
Tabela 10	Análise de variância para a variável resposta carbono fixo (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.....	59
Tabela 11	Valores médios de carbono fixo (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	59
Tabela 12	Análise de variância para a variável resposta densidade a granel (g.cm ⁻³), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.....	60

Tabela 13	Valores médios de densidade a granel (g.cm^{-3}) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	61
Tabela 14	Valores médios de densidade à granel (g.cm^{-3}) das massas, considerando o efeito do aglutinante (%).....	62
Tabela 15	Análise de variância para a variável resposta densidade aparente, considerando dois fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria e suas interações.....	68
Tabela 16	Valores médios da densidade aparente (g.cm^{-3}) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	68
Tabela 17	Valores médios da densidade aparente (g.cm^{-3}) dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.....	69
Tabela 18	Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior (PCS), considerando os fatores: concentração de aglutinante e fração de granulometria.....	71
Tabela 19	Valores médios da poder calorífico superior (kcal.kg^{-1}) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	72
Tabela 20	Valores médios do poder calorífico superior (kcal.kg^{-1}) dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.....	73
Tabela 21	Análise de variância para a variável resposta densidade energética, considerando os fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria.....	74
Tabela 22	Valores médios da densidade energética (Gcal.m^{-3}) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	75
Tabela 23	Valores médios da densidade energética (Gcal.m^{-1}) dos briquetes, na interação das concentrações do aglutinante GRM (%) com as frações da granulometria (mesh) e da granulometria com as concentrações de aglutinante.....	75

Tabela 24	Análise de variância para a variável resposta carga máxima, considerando os fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria.....	77
Tabela 25	Valores médios da carga de ruptura (resistência à compressão), em kgf, dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).....	78
Tabela 26	Valores médios da carga de ruptura (resistência à compressão), em kgf, dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.....	78

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Aspecto geral da palmeira de murmuru (a); Fruto do murmuru (b); Fruto maduro (c); Detalhamento das partes do fruto (d).....	35
Figura 2	Usina de Nova Cintra (a); Sacas de murmuru (b); Secadores (c)	36
Figura 3	Mapa de localização (a); Mapa do estado do Acre (b).....	36
Figura 4	Triturador desintegrador de partículas, marca Vencedora MAQTROX.....	37
Figura 5	Conjunto de peneiras e agitador orbital com batidas no topo.....	38
Figura 6	Amostras da casca do coco de murmuru nas granulometrias de 35, 60,100 e 200 mesh, respectivamente.....	38
Figura 7	Amostra de gordura residual de murmuru.....	39
Figura 8	Amostras na estufa (a) e no dessecador (b).....	41
Figura 9	Amostras no forno mufla.....	42
Figura 10	Equipamentos utilizados na compactação dos resíduos. a) molde e acessórios; b) prensa hidráulica.....	44
Figura 11	Briquetes em formato de cilindro.....	45
Figura 12	Medidas da expansão longitudinal dos briquetes. Diâmetro (a) e altura (b).....	46
Figura 13	Bomba calorimétrica (a) e calorímetro (b).....	48
Figura 14	Máquina de ensaio universal (EMIC).....	49
Quadro 1	Síntese do método experimental para a matéria-prima e unidades amostrais (briquetes).....	50

Figura 15	Briquetes SA – 30 seg.; SA – 5 min.; CA – 30 seg.; CA – 5 min.....	63
Gráfico 1	Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 35 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.....	64
Gráfico 2	Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 60 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.....	65
Gráfico 3	Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 100 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.....	66
Gráfico 4	Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 100 mesh em função da concentração do aglutinante.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	18
2.2	BRIQUETAGEM	20
2.2.1	VANTAGENS NO USO DE BRIQUETES	22
2.3	PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	22
2.3.1	EFEITO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DA MATÉRIA-PRIMA (GRANULOMETRIA)	24
2.3.2	ANÁLISE IMEDIATA DA BIOMASSA	25
2.3.2.1	Teor de Umidade	25
2.3.2.2	Teor de Voláteis	26
2.3.2.3	Teor de Cinzas	27
2.3.2.4	Teor de Carbono Fixo	27
2.3.3	EFEITO DA PRESSÃO NA BRIQUETAGEM	28
2.3.4	EFEITO DO AGLUTINANTE	28
2.4	QUALIDADE DOS BRIQUETES	30
2.4.1	DENSIDADE	30
2.4.1.1	Densidade aparente	30
2.4.1.2	Densidade a granel	31
2.4.1.3	Densidade energética	32
2.4.2	PODER CALORÍFICO	33
2.4.3	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DIAMETRAL	33
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	COLETA E PREPARAÇÃO DA BIOMASSA	35
3.1.1	DESCRIÇÃO DA BIOMASSA (MATÉRIA-PRIMA)	35
3.1.2	COLETA DA BIOMASSA	36
3.1.3	TRITURAÇÃO DA BIOMASSA	37
3.1.4	CLASSIFICAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS (GRANULOMETRIA)	37
3.1.5	AGLUTINANTE	38
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA BIOMASSA	39
3.2.1	DENSIDADE A GRANEL	39
3.2.2	ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DA MASSA A SER BRIQUETADA	40
3.2.2.1	Teor de umidade	40
3.2.2.2	Teor de materiais voláteis	41
3.2.2.3	Teor de cinzas	42
3.2.2.4	Teor de carbono fixo	42
3.3	PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	43
3.3.1	TESTES PARA DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	43
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES	45
3.4.1	EXPANSÃO LONGITUDINAL	45

3.4.2 DENSIDADE APARENTE	46
3.4.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR	47
3.4.4 DENSIDADE ENERGÉTICA	48
3.4.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	48
3.5 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 MATÉRIA-PRIMA (CASCA DE MURMURU)	51
4.2 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DA MATÉRIA-PRIMA	51
4.3 ANÁLISE IMEDIATA DAS AMOSTRAS DE MURMURU MISTURADAS COM O AGLUTINANTE.....	52
4.3.1 TEOR DE UMIDADE	52
4.3.2 TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS.....	55
4.3.3 TEOR DE CINZAS	57
4.3.4 TEOR DE CARBONO FIXO	58
4.3.5 DENSIDADE A GRANEL.....	60
4.4 BRIQUETES	63
4.4.1 RESULTADO DOS PARÂMETROS PARA PRODUÇÃO DOS BRIQUETES	63
4.4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES.....	63
4.4.2.1 Expansão longitudinal	64
4.4.2.2 Densidade aparente.....	67
4.4.2.3 Poder calorífico superior (PCS)	71
4.4.2.4 Densidade energética.....	74
4.4.2.5 Resistência à compressão.....	76
5 CONCLUSÕES	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICES	88

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial traz como consequência um aumento no consumo de energia, tema que tem causado grandes preocupações em relação ao futuro da humanidade. A crise internacional do petróleo ocorrido nos anos de 1970 e 1990, somada com a consciência ambiental e a preocupação sobre o esgotamento de recursos não renováveis, estimulou a busca por fontes alternativas de energia no Brasil e também no mundo.

Diante dessa situação, os governos e instituições de pesquisas se lançaram em busca de novas fontes de energia que minimizem os efeitos catastróficos causados pela matriz energética baseada principalmente em fontes de energia não-renovável. Para atender a demanda energética atual, o aumento no consumo de energia nos remete ao elevado consumo de combustíveis fósseis, maior responsável pelos danos ambientais, em muitos casos irreversíveis ao planeta.

Diante desse contexto, diferentes fontes de energia vêm sendo pesquisadas e novas tecnologias desenvolvidas. A natureza proporciona as mais diversas fontes de energia como o sol, ventos e águas que possibilitam uma matriz diversificada na produção de energia. A biomassa é outra fonte de energia renovável disponível no meio ambiente, com diferentes características energéticas.

Em 2014, as fontes renováveis de energia contribuíram com 39,4% na demanda total na matriz energética brasileira, contra apenas 9,8% nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e de 13,8% na média mundial (BRASIL, 2015a). Entretanto, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia, a contribuição das fontes renováveis na matriz energética brasileira deverá atingir o índice de 45,2% em 2024 (BRASIL, 2015b).

No setor elétrico a biomassa teve um crescimento de 8,1% em 2014, com destaque para a o bagaço de cana-de-açúcar que representou 70% da geração total de energia por biomassa, e os 30% restantes, pela indústria de papel e celulose, com a utilização de lixívia, lenha e resíduos de árvores (BRASIL, 2015a).

Considerando os impactos ambientais e econômicos causados pelo setor energético, a aplicação de práticas sustentáveis na iniciativa privada e setores

públicos é uma realidade mundial. Uma dessas práticas é o gerenciamento de resíduos (biomassa), que através de seu beneficiamento e comercialização tem sido cada vez mais disseminada. Neste aspecto, uma das tecnologias que pode ser usada pelas indústrias geradoras desses resíduos é a briquetagem, que potencializa o uso desse material como fonte de energia.

A Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), por meio da Divisão de Tecnologia de Energia de Fontes Renováveis (DITER), vem desenvolvendo estudos com produtos florestais não madeireiros, principalmente no tocante aos resíduos, para geração de energia. Em 2006, foi instalada uma usina de Extração de Óleos Vegetais, na região do Juruá, na comunidade ribeirinha Nova Cintra, no município de Rodrigues Alves, com o objetivo de fomentar o extrativismo vegetal. Nesta região existe grande potencial para exploração do murmuru (*Astrocaryum spp*), o que motivou os estudos com essa espécie.

O principal produto do processo produtivo de extração na usina é o óleo, também conhecido como gordura do murmuru, que tem sua comercialização voltada para o mercado de cosméticos. Entretanto, a grande quantidade de casca (biomassa) gerada causa preocupação, pois é considerada um resíduo sólido sem valor econômico. Esta biomassa pode ser utilizada como combustível renovável para a geração de energia térmica, através da combustão, na secagem dos cocos ou mesmo na geração de energia elétrica, reduzindo assim os custos operacionais de produção desse produto.

Em 2013, foram adquiridos pela usina 70,8 toneladas de cocos de murmuru, gerando 42,5 toneladas de cascas, representando 60% de biomassa residual. Atualmente, apenas 20% da biomassa de casca vêm sendo queimado de forma *in natura* em um secador de amêndoa. A maior parte desses resíduos não tem destinação correta, causando um acúmulo no galpão da usina. Estima-se que atualmente a região do Alto Juruá produz mais de 200 toneladas/ano de coco de murmuru. Estes resíduos podem deixar de ser um risco e passar a gerar lucro, como insumo para diversos outros processos, como a sua transformação em briquetes.

É importante destacar a Lei de nº 12.305 de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2012) que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos e instituiu a responsabilidade compartilhada entre os setores públicos e privados, geradores de

resíduos, de gerenciar todas as atividades de produção de seus resíduos. A importância do reaproveitamento abrange não somente as questões legais e jurídicas, mas também as questões sanitária, ambiental e econômica.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a biomassa residual oriunda da usina de extração do óleo de murmuru do Alto Juruá com a finalidade de produzir briquetes a partir da casca do coco do murmuru (*Astrocaryum spp*) e avaliar as suas propriedades físicas, químicas e energéticas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa para Geração de Energia

Com a crise do petróleo, a partir dos anos 1970, tem-se a percepção de que o modelo de produção e consumo de energia, em expansão no mundo, não tem possibilidades de perdurar com a matriz de energia baseada nos combustíveis fósseis. Ergueu-se então a noção de sustentabilidade, pela primeira vez questionando, principalmente, quanto ao fato de se considerar os combustíveis fósseis como fonte de energia inesgotável. Diante dos questionamentos aflorados, pesquisadores envolvidos com a questão energética reconheceram a necessidade de novas fontes de geração de energia para suprir as demandas energéticas futuras. Neste sentido, o uso da biomassa residual representa uma fonte de energia renovável com grande potencial de exploração econômica (NASCIMENTO, 2012).

Desde a era energética, iniciada pelo uso e controle do fogo pela civilização humana, a lenha permaneceu durante milênios como fonte de energia insubstituível ao ser humano, sendo utilizada até os dias atuais no cozimento diário de alimentos em países em desenvolvimento (PEREIRA et al., 2009). Contudo, seu uso é ineficiente, principalmente em função de ocorrer em locais de pouca ventilação, gerando muita fumaça, cinzas e gases poluentes prejudiciais à saúde.

No Brasil, essa prática é usual, principalmente na Amazônia, uma das regiões mais ricas do planeta em fontes renováveis de energia. A região apresenta grande potencial de produção de energia por várias fontes como energia solar, eólica, em algumas regiões litorâneas, e cursos d'água com fortes correntezas. Além dessas fontes, existe grande oferta de biomassa florestal, frequentemente indicada como alternativa para suprir a demanda energética regional. Entretanto, deve-se levar em consideração que esse material não se encontra em forma de resíduos disponíveis para a produção de energia economicamente viável. Esses resíduos, se apresentam de forma dispersa na região resultando em altos custos para o seu transporte, quando a proposta é concentrar esse material em local destinado ao seu uso.

De acordo com Moret et al. (2012), estudos indicaram que a geração de energia a partir da biomassa ocorrerá de forma diferenciada nos próximos anos, respeitando

culturas e modos de vidas tradicionais, contribuindo paralelamente para substituição do uso de combustíveis fósseis e para a diminuição dos problemas de poluição e aquecimento global. Neste sentido, a potencialidade e a vocação regional são fatores primordiais na decisão pelo aproveitamento sustentável da biomassa florestal, ultrapassando também a questão da viabilidade econômica.

Tendo esses fatos como base, na região Amazônica, alguns empreendimentos em comunidades localizadas no interior da floresta geram, em seus processos produtivos, grandes quantidades de resíduos florestais, como na indústria de polpa de açaí, em unidades de extração de óleos vegetais na Comunidade do Roque, no Amazonas e, na Comunidade Nova Cintra, no Acre. Partindo dessa realidade, uma das possibilidades de produção de energia nessas localidades é a substituição do combustível fóssil pela biomassa gerada por esses processos produtivos (KUNRATH et al., 2013).

A biomassa é considerada um biocombustível e pode ser classificada em: florestal, agrícola, agroindustrial e resíduos urbanos, sendo a biomassa florestal formada por folhas, galhos, serapilheira, raízes, frutos, extrativos como gomas, resinas, graxas, gorduras (BRAND, 2010). Todo tipo de biomassa residual pode ser transformada em energia. Entretanto, para esta finalidade é importante que sejam corrigidas algumas características físico-químicas que limitam o seu uso direto como combustível, tais como: umidade, poder calorífico, teor de carbono fixo, este último associado ao alto teor de matérias voláteis, além da densidade. A biomassa florestal apresenta excelente característica energética, devido à rápida conversão em energia. É importante ressaltar, que a biomassa residual urbana vem sendo cada vez mais aproveitada para este fim, o que gera enormes ganhos para o planeta, tanto ambientais quanto social e econômico.

O Brasil, por ter uma base agrícola muito forte, é um país gerador de milhões de toneladas de resíduos de biomassa, nas suas diferentes classificações. A maior parte desses resíduos não é usada como fonte de energia por não possuírem boas características energéticas. Neste sentido, uma alternativa para corrigir essa deficiência pode ser a transformação dessa biomassa em briquetes. Conforme Felfli et al. (2011), o Brasil produz cerca de 330 milhões de toneladas de biomassa residual não utilizadas como fonte de energia por vários fatores que tornam os processos

inviáveis economicamente. Conforme Quirino et al. (2012), os principais resíduos briquetados no Brasil são: da madeira, da casca de arroz e casca de café, de soja, bagaço de cana, resíduos de milho e outros resíduos agroindustriais em menor proporção.

2.2 Briquetagem

De acordo com Quirino et. al. (2012), a briquetagem é um processo mecânico usado para converter um resíduo vegetal de baixa densidade em um combustível de alta densidade energética, com baixa umidade, granulometria regular e uniforme, facilitando o transporte, armazenamento e processos de alimentação automática de caldeiras industriais. Neste processo, são aplicadas elevadas pressões em uma massa de partículas dispersas tendo como resultado um sólido geométrico compacto de alta densidade, denominado briquete. Podem ser fabricados produtos de diferentes formatos, de acordo com o molde ou matriz utilizada.

A redução do volume dos resíduos e o aumento do poder calorífico do material por unidade de volume são algumas das vantagens apresentadas pelo processo de transformação da biomassa em briquetes, pois, conforme Quirino e Brito (1991), 1,00 m³ de briquete contém cerca de cinco vezes mais energia que 1,00 m³ de resíduo. Outra vantagem a ser destacada pelo uso de briquetes é a economia no transporte, em função do fator energético, pois havendo maior incremento energético, conforme a densidade do material for aumentada, menor o custo relativo de transporte e além de ser também uma fonte de energia sustentável (FURTADO et al., 2010).

Quirino et al. (2012), ainda destaca que o principal mercado consumidor de briquete no Brasil está relacionado com a substituição da lenha nas indústrias de cerâmica, alimentícia, olaria e outras que necessitam de vapor de processo, como também em restaurantes, pizzarias, padarias e hotéis.

Segundo Barros (2014), em 1789 ocorreu o primeiro registro de patente de briquetagem, realizado por Chavanne na Inglaterra, que compactou o carvão mineral em formato de blocos. Entretanto, existe uma patente dos Estados Unidos em nome de Willian Easby, de 1848, registrando-o como autor da tecnologia de briquetagem

(QUIRINO et al., 2012). Contudo, a fabricação comercial em escala industrial de briquetes produzido de resíduo de serraria, foi de T. Bowling, da Virginia, Estados Unidos, com a patente registrada em 1927 (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 1997). A partir daí, até a Segunda Guerra Mundial, foram produzidas grandes quantidades de briquetes em diversos países da Europa, sendo utilizados em fornos e caldeiras. Durante a Segunda Guerra Mundial, 85% da produção de máquinas de briquetagem era destinada a produção de briquetes de carvão (ALBUQUERQUE; ANDRADE, 1997). Após a Segunda Guerra Mundial ocorreu a diversificação das máquinas, ocorrendo um impulso com a tecnologia de produção de briquetes, com a finalidade de atingir cada vez mais a indústria e o mercado consumidor. Conforme Pimenta et al. (2015), o uso de briquete de carvão apesar de pouco utilizado no Brasil, é bastante usado na Europa, Ásia e América do Norte, tanto no campo industrial como doméstico.

No Brasil, uma das primeiras iniciativas de produção industrial de briquetagem ocorreu no início da década de 1960, nas companhias siderúrgicas brasileiras, principalmente no Estado de Minas Gerais, com a instalação de um equipamento para briquetagem de finos de carvão vegetal. Com a produção de briquetes de carvão as indústrias siderúrgicas nacionais se destacaram no cenário mundial, com a utilização de biomassa de carvão vegetal e *pellet* utilizados em pequenos e micro fornos (MARTINS et al., 2002). Na mesma década, a Companhia Brasileira de Briquetes iniciou sua produção com finos de carvão, voltada à utilização nos processos siderúrgicos.

Na década de 1970, foram implantadas políticas energéticas no país para aumentar o uso de biocombustíveis na matriz energética, incentivando o uso de materiais combustíveis de fontes renováveis. Com isso, nos anos de 1980, diversos estudos e publicações foram realizados na área de briquetagem, contribuindo com o conhecimento técnico e científico dos materiais briquetáveis, além dos principais processos de briquetagem (FELFLI et al., 2011).

2.2.1 Vantagens no uso de briquetes

Segundo Quirino et al. (2004 e 2012); Garcia et al. (2013), as principais vantagens do uso de briquetes em relação a lenha são: produz menos fumaça, cinza e fuligem, em razão da baixa umidade; produz maior temperatura de chama, queima regular e menor manutenção das grelhas e fornalhas. São produtos fornecidos em embalagens padronizadas, sendo um produto 100% reciclado e ecológico sustentável. Outra característica dos briquetes é ser ideal para as indústrias alimentícias por apresentar maior higiene e melhor aparência, com formato geométrico que facilita o transporte, manipulação e armazenamento, com menor índice de poluição.

Para Brand et al. (2002), a utilização da biomassa oriunda da madeira, tanto das florestas como das indústrias de transformação, seria suficiente para o suprimento energético brasileiro. Conforme os autores, quase metade da matéria-prima da madeira oriunda das indústrias de transformação é resíduo na forma de casca, aparas, costaneiras, refilos, destopos e cavacos que poderiam ser transformados em briquetes reduzindo os impactos ambientais e econômicos, pois se trata de um combustível renovável, necessitando de menor espaço para armazenamento, maior densidade e poder calorífico. Já a lenha é comercializada por metro cúbico, o que permite perdas devido aos vazios em seu empilhamento; o processo ajuda com o manejo dos resíduos sólidos.

De acordo com Pereira et al., (2009) além das características ideais dos briquetes como resistência ao manuseio, transporte, estocagem e acendimento, outras propriedades são extremamente importantes principalmente com relação a toxidez, para briquetes de uso domésticos, e resistência ao calor, funcionando como termo redutor para as indústrias siderúrgicas. Essas propriedades devem ser objetos de estudo para pesquisadores na área de energia de fonte da biomassa residual.

2.3 Produção dos Briquetes

A produção de briquetes passa inicialmente por um levantamento de informações sobre a qualidade física e química da biomassa a ser submetida ao

processo de briquetagem. Entre as principais características, devem ser verificados importantes parâmetros como a distribuição granulométrica do material a ser briquetado, teor de umidade, densidade, composição química elementar da matéria-prima como a quantificação do teor de carbono, hidrogênio e oxigênio e, também de macromoléculas como o teor de celulose, lignina, hemicelulose, além das análises imediatas da matéria-prima como teor de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (VALE et al., 2011).

Além dessas características físicas e químicas, outras informações com relação aos agentes aglutinantes como, a faixa ideal de temperatura do material, o peso específico, o poder calorífico, dentre outros, são importantes no processo de produção de briquetes, pois o objetivo da briquetagem é obter um produto consistente e com valor agregado, seja no âmbito energético ou econômico. Após o conhecimento dessas informações, ensaios devem ser iniciados e conduzidos em etapas que resultarão em economia de tempo, de material e que fornecerão dados operacionais à produção.

A produção de briquetes apresenta fatores relevantes na reciclagem de resíduos por se tratar de um produto de baixa umidade, portanto menos higroscópicos e muito mais resistentes ao apodrecimento ou à fermentação, com elevada densidade aparente do que os resíduos na condição natural, facilitando a estocagem e o transporte, ampliando o raio econômico de seu aproveitamento (SANTOS et al., 2011).

As principais etapas na produção de briquetes são: moagem, mistura com aglutinante, prensagem, secagem, estocagem e embalagem. A moagem é a etapa determinante para a classificação da granulometria da matéria-prima que levará a definição do tipo de aglutinante a ser usado. A prensagem é a etapa fundamental que também deve definir o formato do briquete. A secagem representa a perda de umidade, facilitando a estocagem e a embalagem dos briquetes (SANT'ANNA et al., 2012). Na produção de combustível sólido para se obter sucesso nesse tipo de aglomeração, alguns parâmetros devem ser controlados, tanto com respeito a matéria-prima como também durante o processo de produção dos briquetes, a fim de se obter um produto com características química e térmicas fundamentais aos combustíveis sólidos. Diversos são os fatores que influenciam a qualidade do briquete,

tais como a qualidade da matéria-prima em relação a sua granulometria, a análise imediata da matéria-prima, a pressão exercida na produção da briquetagem e o uso de aglutinante.

2.3.1 Efeito do tamanho das partículas da matéria-prima (granulometria)

A matéria-prima ideal é aquela composta por uma mistura de partículas de diversos tamanhos, mas geralmente é aceitável entre 5 e 10 mm de granulometria para briquetes comerciais (QUIRINO et al., 2012). Contudo, existem grandes prensas com matrizes de 125 mm de diâmetro que aceitam partículas de até 15 mm. A densidade final dos briquetes é influenciada pelo tamanho das partículas, pois uma baixa granulométrica resulta em briquetes com alta densidade (GONÇALVES, 2010).

O tamanho das partículas é um dos fatores que determina a qualidade dos briquetes, pois a granulometria influencia no consumo de aglutinantes, quando necessário usá-los, e na resistência final, proporcionando uma maior durabilidade dos briquetes (OLIVEIRA, et al., 2003).

Para realizar a análise granulométrica da matéria-prima, utilizam-se peneiras de diferentes aberturas, padronizadas internacionalmente. Cada peneira tem um número de aberturas por polegada linear, denominado “mesh”. Portanto, quanto maior o “mesh”, maior o número de aberturas por polegada e, conseqüentemente, mais fino será o material peneirado (OHANA, 2012)

Gentil (2008), estudando a tecnologia e a economia de briquetes de madeira produzidos sem aglutinantes, observou que a aplicação da granulometria da serragem com partículas menores que 0,84 mm, representando 48% do particulado fino, reduz a demanda de energia para a plastificação da lignina, enquanto particulado maior de 3,35 mm, representando 15,57%, gera briquetes mais resistentes pelo entrelaçamento das escamas da maravalha.

De acordo com Rodrigues (2010), os materiais a serem compactados devem estar dentro de determinadas faixas de granulometria e o comprimento máximo das partículas não deve ser superior a 25% do diâmetro do produto compactado, para a

maioria dos equipamentos. A compactação de materiais, com pequenas partículas, que contém lignina em sua constituição exige menor força durante a compressão. Porém, as que não contêm essa substância ligante podem requerer pressões e temperaturas muito elevadas para serem compactadas.

2.3.2 Análise imediata da biomassa

Conforme Rodrigues (2010), a análise química imediata é responsável pela determinação das características químicas da biomassa, como o teor de umidade, teor de cinzas, teor de materiais voláteis e o teor de carbono fixo, que, somados ao poder calorífico, são considerados os fatores mais importantes para classificar as melhores fontes de biomassa para energia. Outros fatores como a pressão exercida para a produção e as características físicas da matéria-prima, influenciam fortemente na qualidade dos briquetes.

2.3.2.1 Teor de Umidade

O teor de umidade é um dos fatores mais importantes de qualquer material lignocelulósico para a geração de energia. Normalmente, o teor de umidade de biomassa florestal se encontra entre 65 a 70% de água em base úmida. É evidente que, para passar esta água para o estado de vapor, ocorra uma perda do poder calorífico da biomassa, que é utilizada para a evaporação da água na forma de vapor (QUIRINO, et al., 2004, SOUZA et al., 2012).

A presença da água na biomassa também é importante, pois favorece a transferência de calor no processo de briquetagem fazendo com que a lignina alcance sua faixa de fusão mais rápida, reduzindo a força e o consumo de energia (RODRIGUES, 2010).

Para Quirino et al. (2012), o material pode ser compactado adequadamente desde que esteja dentro de uma faixa de teor de umidade, podendo variar em função do tipo de matéria-prima e do processo de compactação. O que justifica esse comportamento é a transição elástica da lignina que é dependente dos teores de

umidade da mesma. Outro fator que pode ser ocasionado pelo elevado teor de umidade são algumas explosões, em razão da formação de vapor de água no interior da biomassa e que produz briquetes instáveis (QUIRINO et al. 2012). Conforme Quirino e Brito (1991), o teor da umidade ideal da matéria-prima para a produção de briquetes, gira em torno de 8 a 12 % e que o resíduo com umidade acima do indicado produz um briquete com baixa estabilidade, desfazendo-se quando estocado ou transportado. Entretanto, Gonçalves et al. (2009), trabalhando com briquetes de serragem de eucalipto, indicou o teor de umidade na matéria-prima em torno de 10 a 15%, a fim de evitar a perda de calor, visto que alta umidade representa poder calórico negativo.

Conforme Santos, Hatakeyama (2012), no processo de carbonização de madeira de eucalipto com 30% de umidade, quase a metade da energia, 48,7% da energia total gasta no processo, é utilizada para a secagem total da madeira.

2.3.2.2 Teor de Voláteis

Para Sant'Anna et al. (2012) e Vieira et al. (2013), o teor de voláteis determina a facilidade com que uma biomassa queima, comprovando assim a sua importância nas etapas iniciais da combustão da biomassa. Quanto maior o seu teor, maior será a ignição do material. Os voláteis compreendem a parte do combustível que se dissipa quando aquecido a altas temperaturas, e que após esse processo misturam-se com o oxigênio do ar para entrar em combustão.

Segundo Deepak e Jnanesh (2015), geralmente um bom briquete contém cerca de 70% a 86% de teor de volátil. Os autores encontraram para briquetes de folhas de areca o conteúdo volátil com média de 75,51%, indicando fácil ignição e aumento proporcional no comprimento da chama. Valores muito semelhantes foram também encontrados por Kunrath et al. (2013), onde registraram valores variando de 75,28% e 76,99% para o teor de volátil da casca de murmurú.

2.3.2.3 Teor de Cinzas

De acordo com Rendeiro et al. (2008), as cinzas são resíduos resultantes da combustão, compostas por óxidos. Sua formação pela queima de biomassa em gaseificadores ou fornalhas, pode ocasionar diversos problemas em razão de sua fusão e acumulação, como, aumentar a frequência de limpeza nos cinzeiros e acarretar corrosão de metais possibilitando o entupimento de grelhas.

Para Vieira et al. (2013), as cinzas agregam elementos que não são relevantes na reação de combustão, como compostos de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Esses compostos podem, em alta concentração, diminuir o poder calorífico e causar perda de energia. Portanto, na produção de briquetes, usados em caldeiras e altos-fornos industriais, é recomendado a menor concentração possível desse elemento (cinzas) nos materiais utilizados para sua produção (PROTÁSIO et al., 2012).

2.3.2.4 Teor de Carbono Fixo

O percentual de carbono fixo (ou coque) refere-se à fração de carvão que permanece em uma amostra após a queima no estado sólido. Combustíveis com alto índice de carbono fixo são preferíveis porque apresentam queima mais lenta. Este teor é vantajoso, devido ao maior tempo dentro das câmaras de combustão, permitindo caracterizar se o combustível sólido é de boa qualidade para o uso siderúrgico, pois permite a redução de óxidos de ferro nos altos fornos de siderúrgicas (BRAND, 2010; DEEPAK, et al., 2015; SANT'ANNA et al., 2012).

Quirino e Brito (1991) e Deepak et al. (2015), afirmaram que o teor de carbono fixo possui forte correlação com o poder calorífico e atua como o principal gerador de calor durante a queima. Ele também tem uma relação inversamente proporcional ao percentual de matérias voláteis.

2.3.3 Efeito da pressão na briquetagem

A pressão é o mecanismo responsável pela compactação do material e pela transferência de energia na forma de calor para as partículas. A intensidade e o período de aplicação da pressão variam com as características do material e com o tipo de prensa (BOAS, 2011).

Benicio (2011), usou para a produção dos briquetes uma prensa manual de 15 ton. e um molde de aço inox. Todos foram produzidos individualmente em formato de “pequenas almofadas”. A pressão máxima aplicada foi de 13 toneladas, mantida durante 5 minutos. As condições escolhidas de pressão e tempo foram estabelecidas após vários testes. Para efeito de comparação, metade dos briquetes produzidos foi submetida à secagem em estufa regulada a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 48 horas e a outra metade foi levada para secagem ao ar livre por um período de 15 dias.

2.3.4 Efeito do aglutinante

Nos briquetes de origem vegetal, a lignina, um polímero estrutural da madeira e dos resíduos lignocelulósicos, atua como ligante das partículas, pois através de elevadas pressões e temperaturas, que pode variar de 100 e 190 °C, a cadeia da lignina torna-se mais desordenada e móvel, pois é um polímero termoplástico, agindo como um adesivo nas partículas. Na madeira, a lignina sofre um processo denominado transição vítrea, criando uma camada que protege o briquete de variações de umidade, além de agir como fator de ligação entre as partículas. (FURTADO et al., 2010).

Quando o material a ser compactado não possui o aglutinante natural, ou seja, não contém grande quantidade de lignina, torna-se necessário o uso de aglutinantes. A ausência de aglutinantes dificultará a formação do briquete ou, as suas características físicas, como resistência a compressão e ao impacto serão comprometidas (OLIVEIRA, 2013).

Conforme Bertolo et al. (2010), os principais fatores que determinam a quantidade do aglutinante necessário à produção de briquetes de boa resistência mecânica são a superfície específica do material e a quantidade de partículas finas e grossas. Quanto menor for a granulometria das partículas menor será a quantidade necessária do aglutinante. Alguns aglutinantes podem ter propriedades lubrificantes, diminuindo a fricção entre as partículas e aumentando a compactação, como os óleos, amido seco, talco, ceras e grafite. Alguns aglutinantes devem ser adicionados com água, e neste caso, o briquete pode ficar comprometido, com a elevação do teor de umidade (GONÇALVES, 2010).

Segundo Pereira et al. (2009), deve-se ter o cuidado para não usar aglutinantes poluentes, emissores de fumaça tóxica, na confecção dos briquetes. Cada aglutinante possui propriedades específicas que podem influenciar diretamente no comportamento do briquete como combustível sólido. Por isso, deve-se ter cuidado em sua escolha, pois eles não devem prejudicar as características energéticas do material, como diminuir o rendimento calorífico, aumentar o teor de voláteis e cinzas, ou mesmo, ser usado em proporções que seu gasto inviabilize economicamente o briquete. Para que haja economicidade, é necessário haver um balanço entre as quantidades dos componentes que formarão o briquete, pois alguns aglutinantes são bem mais caros que o componente principal.

Pereira et al. (2009) e Gonçalves (2010), indicaram que as características a serem consideradas nos aglutinantes são as seguintes: baixo custo, fácil aplicação, alta resistência mecânica, alta taxa aglomerante, inexistência de material tóxico em sua composição, resistência às condições adversas do meio, como umidade, e boas condições de operacionalidade.

Para Quirino (2002), existem três tipos de aglutinantes: aglutinante tipo matriz, como alcatrão e piche, que envolvem completamente as partículas formando uma matriz contínua; aglutinante tipo filme, usado como soluções ou dispersões, sendo a água o solvente mais comum, a exemplo do silicato de sódio, amido e melado e o aglutinante químico, cujo efeito de adesão que depende de reações químicas efetivas dos constituintes do aglomerante, tendo como exemplo os silicatos + dióxido de carbono (CO₂).

2.4 Qualidade dos Briquetes

Algumas características são fundamentais para a qualidade dos briquetes, como a compactação, comportamento na combustão, densidade relativa aparente, forma e dimensões (QUIRINO, 1991).

Para Furtado et al. (2010), as principais características que qualificam um briquete são: a densidade, o poder calorífico superior (PCS) e a resistência à compressão.

Segundo Quirino e Brito (1991), poucos estudos são realizados sobre a qualidade do briquete para uso doméstico. A maioria dos trabalhos está relacionada para uso industrial. Para muitos propósitos, a densidade é o parâmetro mais importante. Dependendo da utilização do briquete, sua característica pode ser diferente. Para uso siderúrgico, o briquete precisa de alto poder calorífico e carbonização mais demorada quanto possível e, para uso doméstico, a baixa toxidez é a propriedade mais importante, seguida da resistência ao manuseio, facilidade de acendimento, facilidade de transporte e estocagem (QUIRINO, 2002).

2.4.1 Densidade

A densidade pode ser descrita de diferentes formas, pois depende da condição da amostra. As mais usuais são: densidade básica e a densidade aparente. Outra forma de expressar a densidade da madeira e de resíduos é a densidade a granel, sendo calculada a partir da relação entre o peso do material e o volume do recipiente, dada em kg.m^{-3} , conforme a NBR 6922 (ABNT, 1983).

2.4.1.1 Densidade aparente

De acordo com Furtado et al. (2010), a densidade aparente expressa a quantidade de material por unidade de volume. Esta propriedade está relacionada com o poder calorífico superior. Portanto, quanto maior a densidade aparente mais

concentrada está a energia, resultando em um briquete com maior potencial energético em um mesmo volume.

A densidade aparente de combustíveis oriundos da biomassa, dado a sua heterogeneidade, deve levar em consideração o volume da partícula sólida, o volume dos seus poros vazios e a influência do teor de umidade do material, que sempre deve ser informada (GARCIA, 2010).

Conforme Quirino et al. (2012), a briquetagem transforma resíduos de baixa densidade em um produto densificado com alto potencial energético. A densidade é uma das principais características do briquete, pois define a logística a ser tratada, bem como o transporte e o armazenamento.

Segundo Farage et al. (2013), há uma vantagem competitiva no reaproveitamento de resíduos na forma de briquetes, em comparação às formas de aparas, serragem e pó, uma vez que a densidade dos briquetes de madeira e seus derivados chegam a 1.200 kg.m^{-3} , refletindo na redução dos custos de transporte e armazenagem desses resíduos.

Zhang et al. (2014), calcularam a densidade aparente de briquetes medindo o comprimento e o diâmetro de cada briquete com um paquímetro e pesando a massa em balança eletrônica. A densidade aparente do briquete calculada representa a razão entre a massa da amostra e seu volume, incluindo volume de poros. O volume foi calculado a partir das dimensões considerando a forma de um cilindro. A mesma técnica foi usado por Mitchual et al. (2014), após 30 dias de compactação dos briquetes, medindo o diâmetro e comprimento em três pontos diferentes com um paquímetro digital.

2.4.1.2 Densidade a granel

A densidade a granel de uma determinada biomassa é definida como a massa total de biomassa armazenada em um determinado volume, dividida pelo valor desse volume, expressado em kg.m^{-3} . A densidade a granel quantifica o volume de materiais de formas irregulares, considerando os espaços vazios entre as partículas. Quanto menor o tamanho da partícula, maior a densidade a granel que, conseqüentemente,

apresentará maior massa a ser transportada ou armazenada, minimizando os custos dessas etapas (GARCIA et al., 2013).

De acordo com Protásio et al. (2011), para que resíduos lignocelulósicos sejam viáveis economicamente na produção de energia, é desejável que os valores de densidade a granel sejam elevados, pois eles afetam diretamente fatores como os custos com transporte e a densidade energética.

2.4.1.3 Densidade energética

De acordo com Quirino (2002), na madeira, quando empregada para fins energéticos, a propriedade física mais importante é a densidade energética, que representa a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível. Portanto, quando se refere à biomassa compactada, representa uma propriedade que avalia o potencial energético dos briquetes e, está diretamente relacionada com sua densidade e o poder calorífico das partículas.

Segundo Garcia et al. (2013), a densidade energética é obtida multiplicando-se a densidade a granel pelo poder calorífico inferior (PCI) e é expressa em Gcal.m^{-3} ou multiplicando-se o poder calorífico superior (PCS) pela densidade aparente dos briquetes.

Gentil (2008), estudando briquetes de serragem, encontrou para o parâmetro densidade energética valor equivalente a $3,753 \text{ Gcal.m}^{-3}$. Para briquetes formados com pequenas partículas de diferentes espécies os valores de densidade energética variaram entre 5,09 e $5,65 \text{ Gcal.m}^{-3}$.

A densidade energética é uma propriedade que pode ser utilizada para classificar um combustível ou para comparar com outras fontes de energia, não sólidas, como petróleo, álcool e gás natural (EUFRADE JUNIOR, 2015).

2.4.2 Poder calorífico

A quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa do combustível é definida como poder calorífico. É expresso normalmente em joules por grama ou quilojoule por quilo, e também em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma. É considerado uma das propriedades mais importantes do material, sendo que um bom carvão ou briquete devem possuir alto poder calorífico, visto que o tempo de queima é diretamente proporcional à energia liberada pelo combustível (QUIRINO e BRITO, 1991).

O poder calorífico (PC) divide-se em poder calorífico superior (PCS) e, em poder calorífico inferior (PCI), sendo que a diferença entre os dois consiste na quantidade de energia requerida para evaporar a água contida nos gases de exaustão (RODRIGUES, 2010). Este parâmetro pode ser determinado experimentalmente utilizando equipamentos como bombas calorimétricas ou calorímetros.

Conforme Rodrigues (2010), o poder calorífico pode ser afetado por diferentes características do material, como o teor de cinzas, a umidade, a composição elementar, a constituição química molecular. O teor de umidade age de forma negativa ao poder calorífico, em função do gasto de energia para a evaporação da água. Quanto maior a umidade, maior será a fase endotérmica da combustão do combustível. A constituição química, principalmente a presença de carbono e hidrogênio na constituição molecular da matéria, afeta positivamente o poder calorífico, pois promove o aumento do carbono fixo.

Segundo Kunrath et al. (2013), os resíduos gerados no processo de extração de óleo de murmuru não devem ser desprezados, pois foi constatado um PCS de $4.967,5 \text{ cal.g}^{-1}$ para as cascas, indicando grande potencial energético na geração térmica.

2.4.3 Resistência à compressão diametral

A resistência à compressão diametral representa uma característica do briquete para avaliação e indica a qualidade do produto. Este ensaio determina a sua

resistência aos esforços compressivos na estocagem e no transporte. Representa um parâmetro de controle de qualidade, pois é indicativo de resistência aos danos ao produto e, conseqüentemente, perda de massa e do poder calorífico. A resistência à compressão diametral consiste em submeter o briquete a carga de compressão com uma tensão de tração paralela ao plano de carregamento (GENTIL, 2008).

A avaliação da resistência mecânica pode dar um direcionamento ao uso do briquete para fim doméstico ou industrial (PROTÁSIO et al., 2011). Para uso siderúrgico os briquetes devem apresentar resistência mecânica de compressão, ou carga de ruptura, maior que 70 kg.cm^{-2} (FONTES et al., 1989).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta e preparação da biomassa

A presente pesquisa foi realizada na Divisão de Tecnologia de Energia de Fontes Renováveis (DITER), na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), no município de Rio Branco.

3.1.1 Descrição da biomassa (matéria-prima)

A biomassa usada para a produção dos briquetes teve sua origem no murmuru (*Astrocaryum spp*), uma palmeira que produz frutos de janeiro a julho (Figura 1). Os frutos são constituídos de polpa e amêndoa, sendo que esta última produz cerca de 50% de uma gordura branca, inodora e rica em ácidos graxos saturados de cadeia longa, como láurico e mirístico. Para extrair a gordura da amêndoa usa-se um processo de prensagem que dá origem a um óleo nobre utilizado pela indústria de cosméticos, e como resíduo a casca do coco formada por substância lenhosa e espessa, que corresponde a 60% do coco (KUNRATH et al., 2013).

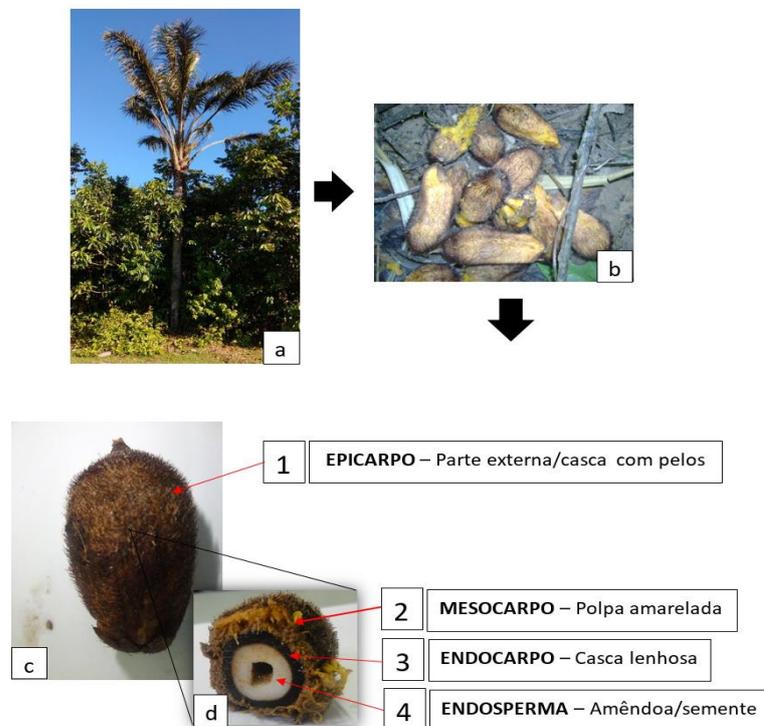


Figura 1 - Aspecto geral da palmeira de murmuru (a); Fruto do murmuru (b); Fruto maduro (c); Detalhamento das partes do fruto (d).

3.1.2 Coleta da biomassa

A matéria-prima, casca de murmuru, usada nesse trabalho foi doada pela Usina de Extração de Óleos Vegetais de Nova Cintra (Figura 2), localizada na Comunidade Nova Cintra, inserida nos limites do município de Rodrigues Alves, entre as coordenadas 07° 49' 27" S e 72° 39' 55" W, distante cerca de 20 km da sede do município e 30 km do município de Cruzeiro do Sul, seguindo o curso do rio Juruá (Figura 3).



Figura 2 – Usina de Nova Cintra (a); Sacas de murmuru (b); Secadores (c).

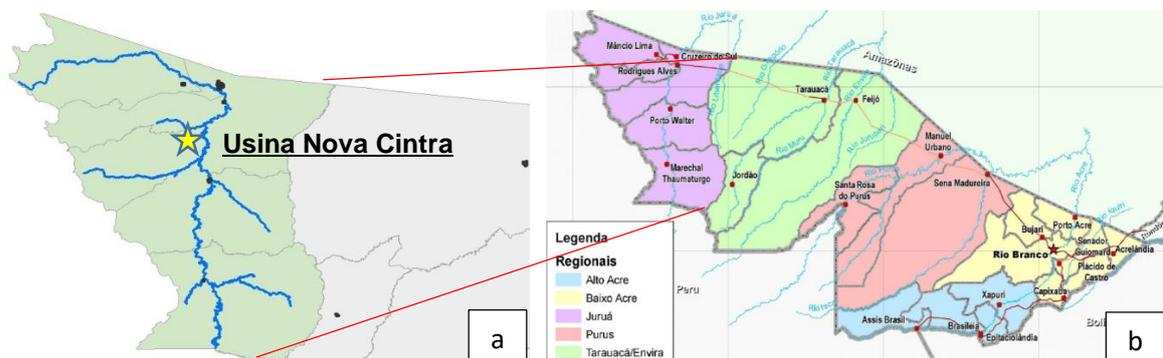


Figura 3 – Mapa de localização (a); Mapa do estado do Acre (b).

3.1.3 Trituração da biomassa

Para a preparação do material usado na produção dos briquetes, foram utilizados 25,00 kg de casca de coco de murmurú. Após limpeza para retirada de objetos indesejados (pedras, amêndoas estragadas, etc.) elas foram trituradas por sete vezes em um triturador desintegrador de partículas (Figura 4), marca Vencedora MAQTROX, com as peneiras de abertura de 1,94mm e 0,75mm sucessivamente.



Figura 4 – Triturador desintegrador de partículas, marca Vencedora MAQTROX

3.1.4 Classificação do tamanho das partículas (granulometria)

O material triturado foi classificado através de peneiramento mecânico, seguindo a norma NBR 7217 (1987), por uma sequência de quatro peneiras para obter as frações desejadas. Foram utilizadas peneiras com abertura de malha de 20, 35, 60, 100, 200 mesh e fundo. O material retido na peneira de 20 mesh e fundo não foi considerado, pois as mesmas foram utilizadas somente para reter as partículas maiores e menores. A sequência de peneiras foi colocada em um agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes no topo, modelo MA 750, com sistema de agitação mecânico orbital com 250 rpm fixa (Figura 5). Após agitação por 5 minutos as partes

foram separadas e armazenadas em sacos plásticos transparentes. A Figura 6 ilustra as amostras de acordo com as granulometrias adotadas.

A porcentagem de resíduo retida nas peneiras é expressa pela equação (01):

$$\%M = \left(\frac{MR}{MT} \right) \times 100 \quad (01)$$

onde: %M é a porcentagem de resíduo retida em cada peneira; MT é a massa total da amostra; MR é a massa retida acumulada em cada peneira.



Figura 5 - Conjunto de peneiras e agitador orbital com batidas no topo.



Figura 6 – Amostras da casca do coco de murmuru nas granulometrias de 35, 60,100 e 200 mesh, respectivamente.

3.1.5 Aglutinante

O aglutinante usado nesse estudo foi a gordura residual do murmuru (GRM) (Figura 7), nas proporções de 05, 10, 15 e 20% em relação à massa seca. Esses materiais foram produzidos na Divisão de Tecnologia de Energia de Fontes

Renováveis (DITER), onde foi realizada a presente pesquisa. A gordura residual do murmuru, considerado como borra, tem sua origem no processo de extração da gordura de murmuru e pode ter propriedades lubrificantes, diminuindo a fricção entre as partículas e aumentando a compactação entre elas.



Figura 7 – Amostra de gordura residual de murmuru

3.2 Caracterização Físico-química da Biomassa

3.2.1 Densidade a granel

Para a determinação da densidade a granel, utilizou-se a metodologia estabelecida pela norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1983) para carvão vegetal, com pequenas modificações. Foi utilizada uma proveta de capacidade de 100 mL e de massa conhecida, que foi preenchida até o volume máximo com a casca de murmuru triturada, realizando-se três repetições para cada tratamento. A massa foi obtida em balança analítica da marca Shimadzu, modelo AY 220, com precisão de 0,0001 g. A densidade a granel foi calculada através da seguinte equação (02):

$$D_{gran.} = \frac{P_{ma}}{V_{recip.}} \quad (02)$$

onde: $D_{gran.}$ = Densidade a granel, g.cm⁻³;

P_{ma} = Peso da massa da amostra, g;

$V_{recip.}$ = Volume do recipiente, cm³.

3.2.2 Análise química imediata da massa a ser briquetada

Após a adição dos aglutinantes, as propriedades físicas e químicas da biomassa utilizada foram verificadas para obter um aproveitamento mais eficiente de suas características, visando a produção de briquetes. As propriedades analisadas foram: teor de umidade, teor de voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. Para essas análises foram utilizados os métodos estabelecidos pela norma NBR 8112 (1986) que prescreveu os métodos para análise imediata de carvão vegetal, considerando que não existe norma nacional para análise imediata de resíduos vegetais. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.2.2.1 Teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade, as amostras das massas de todos os tratamentos foram inicialmente pesadas em balança analítica, em seguida foram secas em estufa de marca FANEM, modelo 515 (Figura 8a), por 120 minutos, com o posterior resfriamento em dessecador com sílica gel (Figura 8b). Foram utilizadas amostras de 5,0g de cada tratamento na análise. As amostras secas foram novamente pesadas em balança analítica, repetindo-se esse procedimento até peso constante. O teor de umidade foi calculado usando a seguinte equação (03):

$$TU = \left(\frac{(M - M_f)}{M_f} \right) \times 100 \quad (03)$$

onde: TU = Teor de umidade em %;

M = Massa inicial da amostra úmida em g;

M_f = Massa final da amostra seca em g.



Figura 8 – Amostras na estufa (a) e no dessecador (b)

3.2.2.2 Teor de materiais voláteis

Para determinar o teor de voláteis foi utilizado 1,0g das amostras secas de cada tratamento. Cada amostra foi adicionada em um cadinho de porcelana com tampa e posicionada na porta do forno mufla, marca QUIMIS (Figura 9), previamente aquecido a $(900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10)$, permanecendo nesta posição por 3 minutos. Em seguida, o cadinho foi posicionado dentro do forno mufla com a porta fechada e permaneceu desta forma por 7 minutos. Após esse processo, o material foi resfriado em um dessecador com sílica gel, até massa constante. O teor de material volátil foi calculado usando a seguinte equação (04):

$$TV = \left(\frac{M_i - M_f}{M} \right) \times 100 \quad (04)$$

onde: TV = Teor de material volátil, em %;

M_i = Massa inicial do cadinho mais a amostra, g;

M_f = Massa final do cadinho mais a amostra, g;

M = Massa da amostra seca, g.



Figura 9 – Amostras no forno mufla.

3.2.2.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado usando 1,0g, de amostra seca, de cada tratamento. A amostra foi colocada em um cadinho, sem tampa, previamente seco e tarado e levado à mufla ($700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10$) por um período de duas horas. Após esse processo o material foi colocado em dessecador com sílica gel, até massa constante. O teor de cinzas foi calculado pela seguinte equação (05):

$$CZ = \left(\frac{M1 - M0}{M} \right) \times 100 \quad (05)$$

onde: CZ = Teor de cinzas, em %;

$M0$ = Massa do cadinho, g;

$M1$ = Massa do cadinho mais o resíduo após combustão, g;

M = Massa da amostra seca, g.

3.2.2.4 Teor de carbono fixo

A determinação do carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido e é calculado subtraindo-se de 100% a soma dos teores de cinzas e de voláteis, conforme a seguinte equação (06):

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad (06)$$

onde: CF = Teor de carbono fixo;

CZ = teor de cinzas;

MV = teor de voláteis.

3.3 Produção dos briquetes

3.3.1 Testes para definição dos parâmetros para produção dos briquetes

Com o objetivo de verificar os melhores parâmetros de produção dos briquetes, como o tempo ideal de prensagem e o uso, ou não, de aquecimento, inicialmente foram realizados testes que possibilitaram a determinação do experimento definitivo. Os testes foram realizados sem aglutinantes, levando-se em consideração as granulometrias de 35, 60, 100, 200 mesh e uma mistura de todas, denominada mix. Para todas as granulometrias foram usados dois tipos de tratamentos térmicos, quais sejam: sem aquecimento (SA) e com aquecimento (CA) a 150° C. Para cada tipo de tratamento térmico foram usados dois diferentes tempos de prensagem, 30 segundos e 5 minutos (Tabela 1).

Tabela 1 - Pré-testes sem e com tratamentos térmicos e diferentes tempos de pressão em temperatura constante (150°C).

Granulometria (mesh)	Tratamentos térmicos / Tempos de prensagem			
35	CA - 30 s	SA - 30 s	CA - 5 min.	SA - 5 min.
60	CA - 30 s	SA - 30 s	CA - 5 min.	SA - 5 min.
100	CA - 30 s	SA - 30 s	CA - 5 min.	SA - 5 min.
200	CA - 30 s	SA - 30 s	CA - 5 min.	SA - 5 min.
mix	CA - 30 s	SA - 30 s	CA - 5 min.	SA - 5 min.

CA = com aquecimento; SA = sem aquecimento

Partindo dessas observações, foram definidos e fixados os parâmetros para serem aplicados nos tratamentos das variáveis escolhidas na produção dos briquetes.

Após definidas as condições, as misturas dos finos de casca de murmuru e o aglutinante foram feitas manualmente em sacos plásticos e em seguida homogeneizadas para evitar a formação de pequenos aglomerados de partículas aglutinadas. Após a homogeneização dos finos com o aglutinante, foram pesadas 20 g da mistura, a qual foi colocada em um molde cilíndrico de aço inoxidável, pré-aquecido em sistema adaptado, com 16,0 cm de comprimento e 3,5 cm de diâmetro interno (Figura 10a), para a compactação da mistura de casca de murmuru mais o aglutinante. Os briquetes foram produzidos em uma prensa hidráulica, com capacidade de 15 toneladas (Figura 10b), resultando cada briquete na forma de pequenos cilindros, como representados na Figura 11.

Para a produção dos briquetes, as massas foram preparadas com os finos de casca de murmuru retidos nas peneiras de 35, 60, 100 e 200 mesh e o aglutinante gordura residual do murmuru, nas proporções de 05, 10, 15 e 20%. Também foram preparadas as massas sem aglutinante, ou seja, 0%, considerado o nível de um dos fatores estudados que determinou os tratamentos do tipo testemunha.



Figura 10 – Equipamentos utilizados na compactação dos resíduos. a) molde e acessórios; b) prensa hidráulica.



Figura 11 – Briquetes em formato de cilindro.

3.4 Caracterização dos briquetes

Para avaliar a qualidade dos briquetes e do processo de briquetagem, logo após suas produções foram realizadas análises visuais para observar a presença de rachaduras e deformações em suas laterais.

Todos os briquetes foram produzidos nas mesmas condições, com tempo de 5 minutos de prensagem e com aquecimento à 150°C. No total foram 100 briquetes confeccionados com casca triturada de murmuru. Desse total, 80 (oitenta) briquetes foram aglutinados com a gordura residual de murmuru (GRM) e 20 (vinte) sem o uso do aglutinante, considerado como testemunha.

Os parâmetros físicos e mecânicos avaliados nos briquetes foram a expansão longitudinal, a densidade aparente, o poder calorífico superior (PCS), a densidade energética e a resistência à compressão (carga máxima).

3.4.1 Expansão longitudinal

A expansão longitudinal foi analisada medindo o diâmetro e altura dos briquetes com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 12), conforme sugerido no trabalho de Oliveira (2013), sendo a primeira medição logo após a produção dos briquetes (0h), e as outras em 24h, 72h e 120h. Os briquetes produzidos foram armazenados em sacos plásticos fechados durante o período das medições, para que a umidade do ar não tivesse influência na expansão. A expansão longitudinal dos briquetes foi calculada de acordo com a equação a seguir (07):

$$El = \frac{(l_f - l_o)}{l_o} \times 100 \quad (07)$$

onde: El = Expansão longitudinal,

l_o = Comprimento longitudinal da amostra logo após a compactação,

l_f = Comprimento longitudinal da amostra após um determinado tempo da compactação.

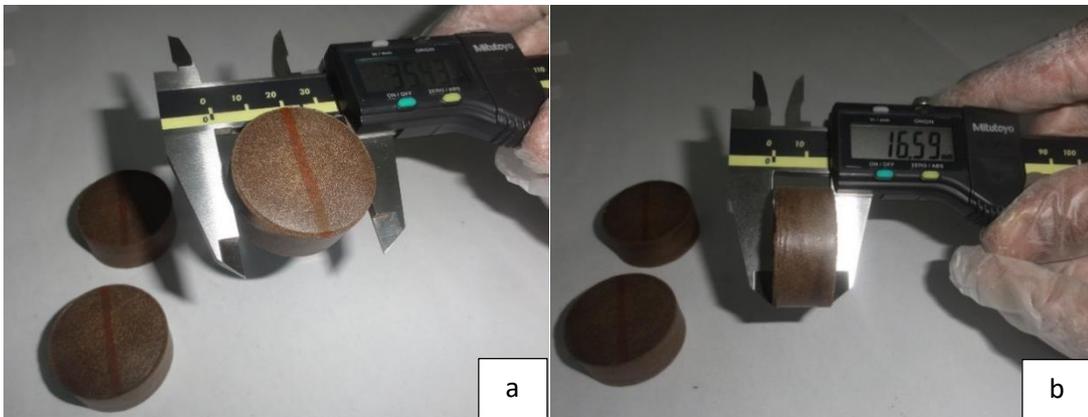


Figura 12 - Medidas da expansão longitudinal dos briquetes, diâmetro (a) e altura (b).

3.4.2 Densidade aparente

Após 15 dias da compactação, os briquetes foram pesados em uma balança analítica marca Shimadzu modelo AY 220 com precisão de 0,0001g. O cálculo do volume foi realizado considerando o formato cilíndrico do briquete. As medidas da altura e do diâmetro foram realizadas com um paquímetro digital, da marca Mitutoyo Absolute e precisão de 0,01mm, sendo realizadas três medições em posições diferentes da altura e diâmetro. O cálculo do volume foi realizado conforme a equação a seguir (08):

$$Vol_{br} = \left(\frac{\pi * \varnothing^2}{4} * L \right) * 10^{-3} \quad (08)$$

onde: Vol_{br} = Volume do briquete, (volume do cilindro), em cm^3 ;

π = Igual a 3,1416 (constante adimensional);

\emptyset = Diâmetro do briquete, em mm;

L = Comprimento (altura) do briquete, em mm;

Após determinação do volume médio do briquete, foi calculado a densidade aparente através da equação a seguir (09):

$$\rho_a = \frac{m}{vol_{br}} \quad (09)$$

onde: ρ_a = Densidade aparente do briquete, em $g.cm^{-3}$;

m = Massa do briquete, em g;

vol_{br} = Volume dos briquetes, em cm^3 .

3.4.3 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) dos briquetes foi determinado após os ensaios de resistência por compressão. Foi utilizada a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (1984). As análises foram realizadas no Laboratório de Anatomia Animal do Centro de Ciências Biológicas da Natureza - CCBN, da Universidade Federal do Acre, em Rio Branco.

Para verificação do poder calorífico superior (PCS), foi introduzido aproximadamente 0,5g de material isento de umidade no interior da bomba calorimétrica (Figura 13a). Posteriormente, a bomba calorimétrica foi inserida no calorímetro adiabático marca Ika, modelo C-200 (Figura 13b), para finalmente executar o procedimento determinado pela norma.

O resultado foi expresso em $cal.g^{-1}$ diretamente no visor do calorímetro, equivalente à unidade $kcal.kg^{-1}$.

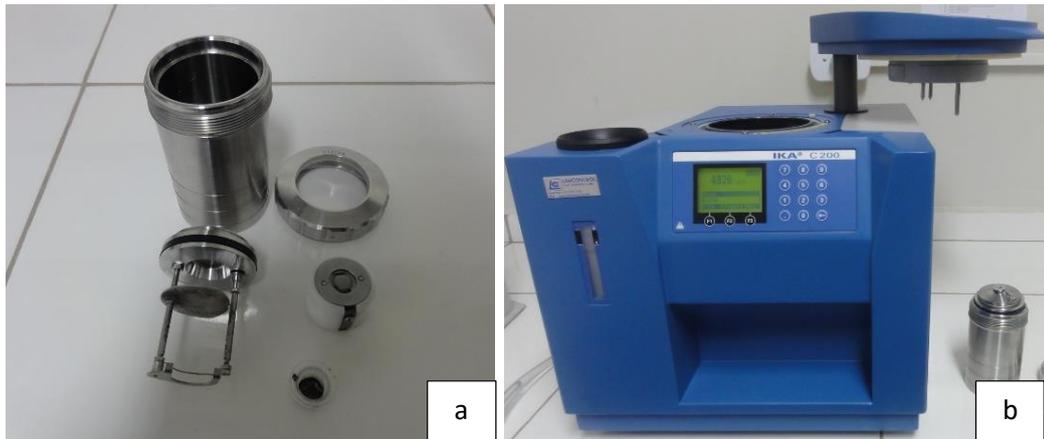


Figura 13 – Bomba calorimétrica (a) e calorímetro (b).

3.4.4 Densidade energética

A densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um material combustível. Foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior (PCS) pela densidade aparente dos briquetes, conforme a equação a seguir (10):

$$\rho e = \rho a * PCS * 10^{-6} \quad (10)$$

onde: ρe = Densidade energética, em kJ.m^{-3} ;

ρa = Densidade aparente, em g.cm^{-3} ;

PCS = Poder calorífico superior, em kcal.kg^{-1} ;

3.4.5 Resistência à compressão

Os ensaios foram realizados 15 dias após a compactação da massa, no SENAI/CETEMM, utilizando uma máquina universal de ensaios (EMIC), com capacidade máxima de 10.000 kgf (100 kN), modelo DL 10.000 (Figura 14), seguindo a norma COPANT 464 (1972), especifica para madeira, já configurada no

equipamento. A carga foi aplicada no sentido transversal dos briquetes, perpendicular a pressão de compactação. Para os ensaios foi utilizada uma célula de carga de capacidade de 200kgf, disponível no momento do trabalho, e velocidade de ensaio de $3,0 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. O resultado foi processado por um software acoplado ao equipamento.



Figura 14 – Máquina de ensaio universal (EMIC)

3.5 Delineamento experimental

Excetuando a expansão longitudinal, que definiu o tempo de elasticidade dos briquetes, as demais análises foram tratadas pelo delineamento inteiramente casualizado (DIC) como respostas as variáveis adotadas.

O efeito dos tratamentos experimentais nas propriedades dos briquetes foi determinado empregando-se o DIC, num esquema fatorial 5×4 (5 níveis de aglutinante com 4 níveis de granulometria). Para a produção dos briquetes, foi utilizado o aglutinante gordura residual de murmuru (GRM) em 5 proporções (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), sendo o 0% testemunha e, 4 dimensões granulométricas de 35, 60, 100 e 200 mesh. Os briquetes foram reproduzidos com cinco repetições por tratamento, totalizando 100 unidades amostrais (Quadro 1). Desta forma, todos os resultados aferidos das análises e ensaios foram organizados em planilhas eletrônicas para posterior cálculos utilizando o software SISVAR versão 5.6 (Build 86). A análise de variância para verificar o efeito dos tratamentos foi realizada para cada resposta, considerando o estudo das seguintes fontes de variação: efeito do aglutinante, efeito da granulometria, a interação entre o aglutinante e a granulometria e o erro aleatório. Nos casos em que o teste F indicou diferença entre o efeito dos tratamentos, realizou-

se o teste de comparação múltipla de Tukey. Todas as análises foram realizadas ao nível de significância de 5%.

Quadro 1 - Síntese do método experimental para a matéria-prima e unidades amostrais (briquetes).

Tratamento	Proporção de aglutinante (%)	Frações granulométricas (Mesh)	Nº de repetições
			Briquetes
T1	5%	35	5
T2		60	5
T3		100	5
T4		200	5
T5	10%	35	5
T6		60	5
T7		100	5
T8		200	5
T9	15%	35	5
T10		60	5
T11		100	5
T12		200	5
T13	20%	35	5
T14		60	5
T15		100	5
T16		200	5
T17	0% (sem aglutinante)	35	5
T18		60	5
T19		100	5
T20		200	5
<i>Total</i>			100

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Matéria-prima (casca de murmuru)

Para o aproveitamento do resíduo da casca do murmuru no processo de briquetagem se faz necessário uma sequência de análises antes da transformação em briquetes, cujos resultados são apresentados a seguir.

4.2 Classificação granulométrica da matéria-prima

A Tabela 2 apresenta valores em porcentagens da casca de murmuru retida nas peneiras de 20, 35, 60, 100 e 200 mesh. Essas granulometrias foram definidas por estarem disponíveis suas respectivas peneiras, no momento da execução do trabalho.

A casca de murmuru triturada apresentou maior percentual na peneira de 60 mesh (12,15%), seguidos de 35 mesh (12,07%). Uma diferença considerável de aproximadamente 49% ocorreu entre a granulometria de 35 mesh (12,07%) e 200 mesh (5,95%). Os materiais retidos nas peneiras de 20 mesh e fundo foram desconsiderados, pois as mesmas foram utilizadas somente para reter as partículas maiores e menores.

Tabela 2 - Valores em porcentagens da casca de murmuru retida nas peneiras

Abertura das peneiras		Casca de murmuru
Mesh	Milímetro	% Retido por Peneira
20	> 0,841	64,44
35	0,500	12,07
60	0,250	12,15
100	0,149	2,94
200	0,074	5,95
Fundo	< 0,074	2,45

As diferenças na granulometria da biomassa, após a trituração, deve-se provavelmente às características estruturais da casca de murmuru, apresentando-se muito dura. As frações com menores granulometrias, conforme Protásio et al. (2011), tem forte influência na durabilidade e resistência dos briquetes podendo influenciar também na densidade aparente. Desta forma, a classificação granulométrica da biomassa é relevantemente importante na produção de briquetes.

4.3 Análise imediata das amostras de murmuru misturadas com o aglutinante

Os resultados referentes à umidade (%), voláteis (%) cinzas (%) carbono fixo (%) e densidade a granel (g.cm^3), nas diferentes combinações de proporções do aglutinante com diferentes frações de granulometria, em mesh, são apresentados a seguir.

4.3.1 Teor de umidade

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para cada variável e a interação entre elas, ou seja, somente as concentrações de aglutinantes, somente as frações de granulometria e a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela 3). Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 3 – Análise de variância para a variável resposta umidade, considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	$p < 0,05$
Aglutinante	4	3,12	0,78	242.91	0,000*
Granulometria	3	19,92	6,64	2066.01	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	1,39	0,12	36.15	0,000*
Erro	40	0,13	0,00		
Total corrigido	59				
CV (%)	0,64				

* p -valor $< 0,05$ = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante, isoladamente, observa-se na tabela 4, onde são apresentados os valores médios da umidade das massas, em %, que não houve diferença significativa entre as concentrações de 0% e 5%, e que a partir de então o aumento da concentração de aglutinante provocou uma diminuição de teor de umidade. Em relação á granulometria, verificou-se que todos os resultados de umidade foram significativamente diferentes entre si, diminuindo de 35 até 100 mesh e aumentando em 200 mesh.

Tabela 4 – Valores médios de umidade (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Umidade (%)	Granulometria (mesh)	Umidade (%)
0	9,033 ^d	35	9,55 ^d
5	9,088 ^d	60	9,24 ^c
10	8,914 ^c	100	8,14 ^a
15	8,642 ^b	200	8,42 ^b
20	8,498 ^a		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A tabela 5 apresenta os valores médios de umidade (%) das massas, com efeito dos níveis do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada nível de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Os testes de médias (Tukey) realizados são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Observa-se que há uma tendência de diminuição da umidade com o aumento da concentração de aglutinante para a granulometria de 35 mesh, destacando que não houve diferença significativa entre as concentrações de 5% e 10%. Para as granulometrias de 60 e 200 mesh há a mesma observação de tendência, porém sem diferença entre as concentrações de 0% e 5%, assim como também entre 15% e 20%. Para a granulometria de 100 mesh, ocorre uma oscilação nos resultados com algumas diferenças significantes.

Tabela 5 – Valores médios de umidade (%) das massas, considerando o efeito do aglutinante (%) e das granulometrias (mesh).

Aglutinante GRM (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	9,93 ^{dD}	9,62 ^{cC}	7,86 ^{aA}	8,72 ^{cB}
5	9,74 ^{cD}	9,52 ^{cC}	8,38 ^{cA}	8,71 ^{cB}
10	9,63 ^{cD}	9,25 ^{bC}	8,28 ^{bcA}	8,49 ^{bB}
15	9,32 ^{bD}	8,94 ^{aC}	8,23 ^{bB}	8,08 ^{aA}
20	9,11 ^{aD}	8,85 ^{aC}	7,94 ^{aA}	8,08 ^{aB}

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

O teor de umidade da massa aglutinada com GRM apresentou valores adequados para o processo de briquetagem, pois de acordo com Quirino e Brito (1991) o valor ideal encontra-se entre 8% a 12%. O material com umidade acima do indicado produz briquete com baixa estabilidade, desfazendo-se quando estocado ou transportado.

Observa-se na Tabela 5 que houve uma tendência geral de diminuição de umidade partindo-se das partículas mais grossas para as mais finas, especialmente para a concentração de 15%. Nas demais concentrações, observou-se que para 200 mesh voltou a aumentar. Isso ocorre devido a existência de mais espaços vazios entre as partículas mais grossas, permitindo um maior fluxo de água entre as partículas.

O teor de umidade é um fator de grande importância no uso da biomassa para a produção de energia, pois favorece a transferência de calor no processo de briquetagem fazendo com que a lignina alcance sua faixa de fusão mais rápida, reduzindo a força e o consumo de energia (RODRIGUES, 2010). Entretanto, um material com elevado teor de umidade pode ser prejudicado no armazenamento, uma vez que, pode ocorrer a proliferação de fungos e, além disso, pode aumentar os custos de transporte.

4.3.2 Teor de materiais voláteis

A análise química imediata do material, após a mistura com o aglutinante, permitiu mensurar as características dos briquetes de acordo com as proporções aplicadas, sendo que as características de materiais voláteis e cinzas, normalmente não são alteradas após compactação.

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para as variáveis, concentração de aglutinante e fração de granulometria. Para a interação do aglutinante com a granulometria não houve efeito significativo (Tabela 6), não necessitando de análise. Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados às duas variáveis, individualmente, para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 6 – Análise de variância para a variável resposta voláteis (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	$p < 0,05$
Aglutinante	4	39,66	9,91	7.43	0,000*
Granulometria	3	207,44	69,15	51.78	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	26,30	2,19	1.64	0,119
Erro	40	53,41	1,34		
Total corrigido	59				
CV (%)	1,42				

* p -valor $< 0,05$ = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante isoladamente, observa-se, na tabela 7, onde são apresentados os valores médios de voláteis das massas, em %, que há uma oscilação nos valores de teor de voláteis com a variação da concentração do aglutinante, não havendo diferença significativa entre as concentrações de 0% e 10%; 5%, 10% e 15% e 5%, 15% e 20%.

Tabela 7 – Valores médios de voláteis (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Teor de Voláteis (%)	Granulometria (mesh)	Teor de Voláteis (%)
0	80,062 ^a	35	79,183 ^a
5	82,045 ^{bc}	60	80,515 ^b
10	80,782 ^{ab}	100	81,476 ^b
15	81,692 ^{bc}	200	84,252 ^c
20	82,200 ^c		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Para a granulometria, quando analisada isoladamente, observa-se que há uma tendência de aumento do teor de voláteis com o aumento da granulometria, com observação de igualdade estatística entre as granulometrias intermediárias de 60 e 100 mesh.

Uma das principais características de um material é a presença de voláteis, pois ela determina a velocidade com que a biomassa queima, comprovando sua importância nas etapas iniciais da combustão. Portanto, quanto maior o teor de voláteis em um material, mais rápido será sua queima. Para que se tenha uma queima mais equilibrada, evitando a perda de energia durante a combustão, o processo de briquetagem é uma técnica indicada, pois através da densificação do material haverá uma redução da área superficial, contribuindo para que a velocidade da queima seja mais lenta. Entretanto, caso ocorra um aumento significativo na densificação, reduzindo demais a área superficial, pode haver uma difícil ignição do material. Assim, os resultados expressam que a granulometria de 35 mesh sugere indicação para briquetes que queimam cineticamente de forma mais lenta, o que pode ser uma vantagem se esse efeito for significativo em relação a outras variáveis.

4.3.3 Teor de cinzas

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para as variáveis, concentração de aglutinante e fração de granulometria. Para a interação do aglutinante com a granulometria não houve efeito significativo (Tabela 8), não sendo analisado. Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados às duas variáveis, individualmente, para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 8 – Análise de variância para a variável resposta cinzas (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	$p < 0,05$
Aglutinante	4	0,61	0,15	13.49	0,000*
Granulometria	3	7,44	2,48	220.68	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	0,26	0,02	1.96	0,056
Erro	40	0,45	0,01		
Total corrigido	59				
CV (%)	4,59				

* p -valor $< 0,05$ = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante, isoladamente, observa-se na tabela 9, onde são apresentados os valores médios de cinzas das massas, em %, que as concentrações de 0%, 5% e 10% foram iguais estatisticamente e diferem das de 15% e 20%, as quais apresentaram valores menores das demais.

Tabela 9 – Valores médios de cinzas (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Teor de Cinzas (%)	Granulometria (mesh)	Teor de Cinzas (%)
0	2,38 ^b	35	1,76 ^a
5	2,40 ^b	60	2,52 ^c
10	2,39 ^b	100	2,69 ^d
15	2,16 ^a	200	2,27 ^b
20	2,21 ^a		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A granulometria, quando analisada isoladamente, observa-se que para todas as frações houve diferença significativa, com tendência de aumento do teor de cinzas com o aumento da granulometria, excetuando-se para 200 mesh. Destaca-se que para 35 mesh (partículas maiores) apresentou menor valor. Isso indica que, trabalhar com 35 mesh pode diminuir o efeito corrosivo em fornalhas industriais, uma vez que a corrosão tem relação direta com o menor o teor de cinzas (RENDEIRO, 2008). Entretanto, afeta de forma inversa o poder calorífico. Sendo assim, é recomendado a menor concentração possível de cinzas nos materiais utilizados para a produção dos briquetes, analisando concomitantemente a possíveis prejuízos de poder calorífico (PROTÁSIO et al., 2012).

Os resultados encontrados no presente trabalho estão próximos dos apresentados por Barros (2014), que verificou para o carvão vegetal um valor de 2,43% para cinzas no estudo desenvolvido para caracterização de briquetes de carvão vegetal e mineral. Da mesma forma Gentil (2008), caracterizando briquetes de serragem registrou valores de 1,99% e 1,53% de cinzas. Cavalcanti (2010), caracterizando resíduos de açaí e tucumã para a produção de briquetes encontrou valores de cinzas de 3,53% e 1,85% respectivamente.

De forma geral, os materiais analisados nesse estudo obtiveram resultados satisfatórios para o teor de cinzas, considerando os baixos valores percentuais do aglutinante GRM na casca de murmuru.

4.3.4 Teor de carbono fixo

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para as variáveis, concentração de aglutinante e fração de granulometria. Para a interação do aglutinante com a granulometria não houve efeito significativo (Tabela 10), não havendo análise. Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados às duas variáveis, individualmente, para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 10 – Análise de variância para a variável resposta carbono fixo (%), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	$p < 0,05$
Aglutinante	4	35,26	8,81	6.69	0,000*
Granulometria	3	243,45	81,15	61.54	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	27,97	2,33	1.77	0,088
Erro	40	52,74	1,32		
Total corrigido	59				
CV (%)	7,03				

* p -valor < 0,05 = significância a 5% pelo teste F.

Observa-se na tabela 11, onde são apresentados os valores médios de carbono fixo das massas, em %, que não houve diferença significativa nas concentrações de 0% e 10%, assim como também não houve entre a faixa de 5% a 20%.

Tabela 11 – Valores médios de carbono fixo (%) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Carbono Fixo (%)	Granulometria (mesh)	Carbono Fixo (%)
0	17,56 ^b	35	19,06 ^d
5	15,56 ^a	60	16,96 ^c
10	16,83 ^{ab}	100	15,84 ^b
15	16,15 ^a	200	13,48 ^a
20	15,59 ^a		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A granulometria, quando analisada isoladamente, observa-se que para todas as frações houve diferença significativa, com diminuição de teor de carbono fixo com o aumento da granulometria, destacando-se a de 35 mesh (partículas maiores), que apresentou maior valor. Isso pode ser importante pois os combustíveis com alto índice de carbono fixo são preferíveis por apresentarem maior conteúdo energético, maior resistência térmica, o que promove uma queima mais lenta do material, corroborando com as observações para o teor de voláteis para a mesma granulometria (SANTOS, 2011).

Em sua maioria, os resultados de carbono fixo para a casca de mururu, com valores entre 13,48% a 19,06%, estão próximos da faixa registrada por Brand (2010), entre 15 e 25% para madeira, bagaço de cana, casca de arroz, e casca de coco. Deepak, Jnanesh (2015), encontrou para folhas de areca 15% de carbono fixo. Rendeiro (2008), trabalhando com vários tipos de resíduos, observou para o caroço de açaí 19,5%, para casca de amêndoa 20,7%, de castanha do Pará 27,1% e de nozes 22,5% de carbono fixo.

4.3.5 Densidade a granel

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para cada variável e a interação entre elas, ou seja, somente as concentrações de aglutinantes, somente as frações de granulometria e a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela 12). Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 12 – Análise de variância para a variável resposta densidade a granel ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), considerando dois fatores: concentrações de aglutinante, frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	$p < 0,05$
Aglutinante	4	0,00	0,00	91.99	0,000*
Granulometria	3	0,07	0,02	1.799.38	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	0,01	0,00	79.16	0,000*
Erro	40	0,00	0,00		
Total corrigido	59				
CV (%)	0,8				

* p -valor $< 0,05$ = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante, isoladamente, observa-se na tabela 13, onde são apresentados os valores médios de densidade a granel, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, que não houve diferença significativa somente entre as concentrações de 5% e 10%, sendo essas diferentes das demais, as quais diferiram entre si, sem tendências expressivas.

Tabela 13 – Valores médios de densidade a granel ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) das massas dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Densidade a granel (g/cm^3)	Granulometria (mesh)	Densidade a granel (g/cm^3)
0	0,45 ^a	35	0,52 ^d
5	0,46 ^b	60	0,42 ^a
10	0,46 ^b	100	0,47 ^c
15	0,48 ^d	200	0,44 ^b
20	0,47 ^c		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Para a granulometria, quando analisada isoladamente, observa-se que para todas as frações houve diferença significativa entre si, com oscilações de valores entre as granulometrias.

A tabela 14 apresenta os valores médios de densidade a granel ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) das massas, com efeito dos níveis do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada nível de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Os testes de médias (Tukey) realizados são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Ao analisar o efeito do aglutinante na granulometria, observa-se que houve diferença significativa na concentração de 0% em relação as concentrações de 5% e 10% (significativas entre si) e as concentrações de 15% e 20% (significativas entre si), na granulometria de 35 mesh. Para a granulometria de 60 mesh, não houve diferença significativa entre as concentrações de 0%, 5% e 10%, que diferiram do grupo de 15% e 20%, sendo que esse último apresentou maior valor de densidade a granel. Para a fração de 100 mesh ocorreu a mesma tendência que na granulometria de 35 mesh, e para a granulometria de 200 mesh, não houve diferença significativa entre as concentrações intermediárias, que diferiram das concentrações de 0% e 20%, as quais também diferiram entre si e apresentando os menores valores de densidade a granel.

Tabela 14 – Valores médios de densidade à granel (g.cm^{-3}) das massas, considerando o efeito do aglutinante (%).

Aglutinante GRM (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	0,52 ^{bD}	0,41 ^{aB}	0,47 ^{cC}	0,39 ^{aA}
5	0,50 ^{aC}	0,42 ^{aA}	0,46 ^{abB}	0,47 ^{cdB}
10	0,50 ^{aC}	0,42 ^{aA}	0,46 ^{aB}	0,46 ^{cB}
15	0,54 ^{cC}	0,43 ^{bA}	0,47 ^{bcB}	0,47 ^{dB}
20	0,53 ^{cC}	0,44 ^{bA}	0,46 ^{abB}	0,43 ^{bA}

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

Analisando-se o efeito da granulometria nas concentrações para a densidade a granel, observa-se na Tabela 14 que houve semelhança de comportamento entre as concentrações de 0% e 20% e por outro lado, semelhança entre 5%, 10% e 15%. No primeiro caso ocorrendo oscilações nos valores, e no segundo, com o aumento da granulometria, houve uma diminuição da densidade a granel de 35 mesh para 60 mesh, aumentando para 100 mesh e este permanecendo estatisticamente igual ao de 200 mesh. Destaca-se que para todas concentrações a densidade a granel foi maior na granulometria de 35 mesh.

Protásio et al. (2011), estudando diferentes biomassas visando a produção de briquetes, encontrou para a casca de café moída um valor de densidade a granel de $0,46 \text{ g.cm}^{-3}$, não diferente dos resultados apresentados nesse trabalho.

Os briquetes produzidos com partículas de 35 mesh apresentam valores de densidade a granel próximos aos encontrados por Quirino e Brito (1991) ao avaliar briquetes americanos ($0,55 \text{ g.m}^{-3}$) e argentinos ($0,53 \text{ g.m}^{-3}$).

4.4 Briquetes

4.4.1 Resultado dos parâmetros para produção dos briquetes

Através de observações visuais, após 120 horas de cura, o tratamento térmico CA – 5min., para todas as granulometrias, foi superior quando comparado aos outros tratamentos, ou seja, SA – 30s, CA – 30s e SA – 5 min (Figura 15). Os briquetes produzidos com CA – 5min. mostraram-se bem formados, manualmente mais resistentes e menos friáveis que os briquetes compactados CA – 30s.

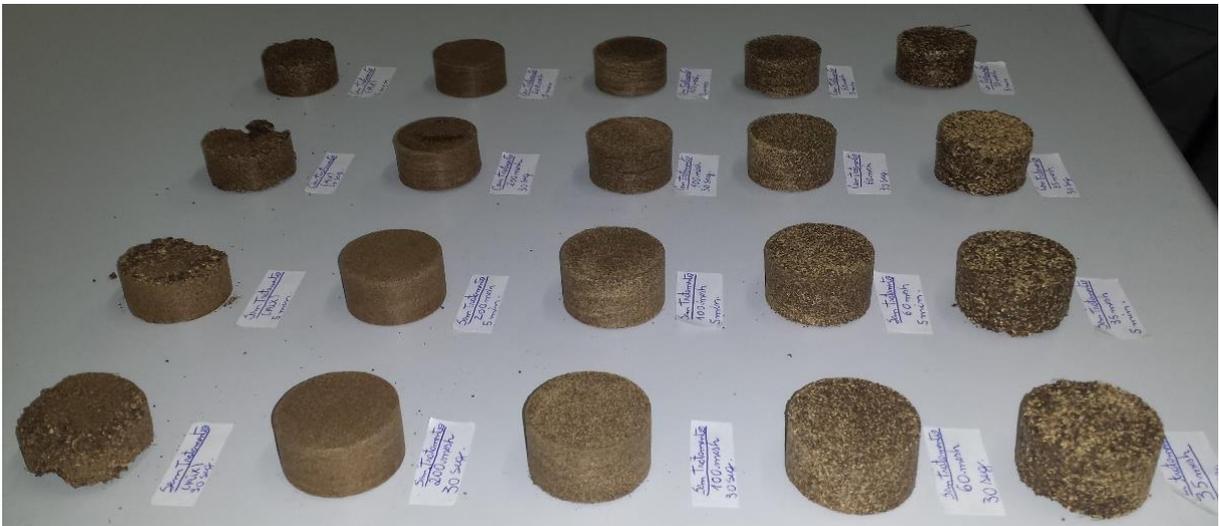


Figura 15 – Briquetes SA – 30s; SA – 5min.; CA – 30s; CA – 5min.

A compactação em temperaturas acima de 100°C ocasiona a plasticização da lignina contida na biomassa florestal, que age como um aglutinante natural entre as partículas, dispensando o uso de ligantes adicionais. Além disso, altas temperaturas ajudam a evaporar parte da umidade presente na biomassa, melhorando o poder calorífico do briquete.

4.4.2 Caracterização dos briquetes

Com exceção da análise de expansão longitudinal, todas as outras análises e ensaio (densidade aparente, poder calorífico superior (PCS), densidade energética e

resistência à compressão) foram discutidas a partir de um tratamento estatístico tendo como base o delineamento inteiramente casualizado (DIC).

4.4.2.1 Expansão longitudinal

Observa-se no Gráfico 1, que para a granulometria de 35 mesh, todas as porcentagens do aglutinante apresentaram uma redução inicial da expansão longitudinal. Posteriormente, percebe-se a tendência geral de estabilização próxima ao valor de 0%. Tal fato indica que os briquetes são estáveis, podendo resistir às etapas de transporte e armazenamento de maneira satisfatória.

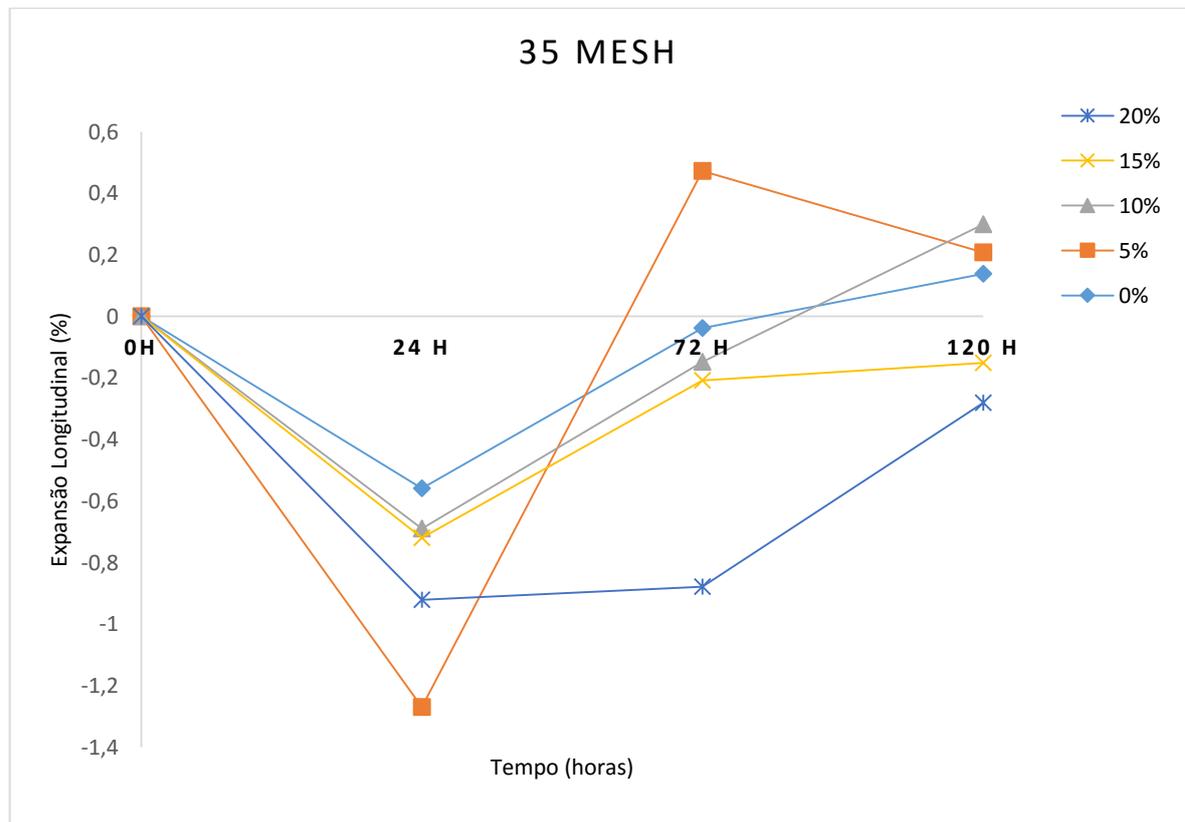


Gráfico 1 – Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 35 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.

Já para a granulometria de 60 mesh (Gráfico 2), houve um comportamento inicial diferente, se comparado com os briquetes de 35 mesh. Isso por que, nas primeiras 24 horas, a tendência geral foi de expansão para as concentrações de

aglutinantes de 20% e 15%. Nas demais concentrações, percebe-se que ocorreu certa estabilidade dos materiais analisados, sem variações significativas na expansão longitudinal. Vale destacar que, após 120 horas, todos os briquetes apresentavam valores muito próximos, indicando que, para essa granulometria, a expansão longitudinal seja praticamente a mesma no período analisado.

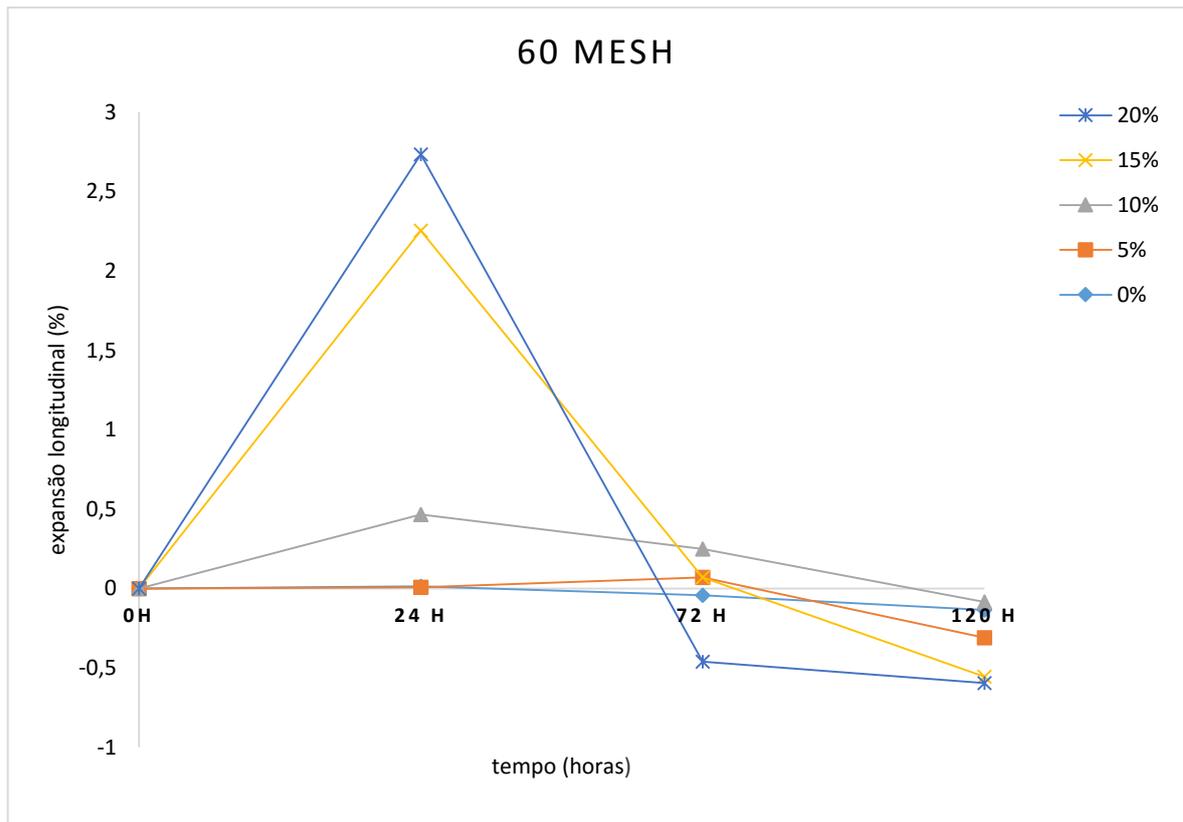


Gráfico 2 – Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 60 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.

Para a granulometria de 100 mesh (Gráfico 3), observa-se variações positivas e negativas da expansão longitudinal, uma vez que nas primeiras 24 horas a tendência foi de redução, seguida de uma expansão e de nova redução. Esse comportamento sugere uma instabilidade dos briquetes no período analisado, entretanto medições com maiores intervalos de tempo poderia indicar de maneira mais concreta esse comportamento físico.

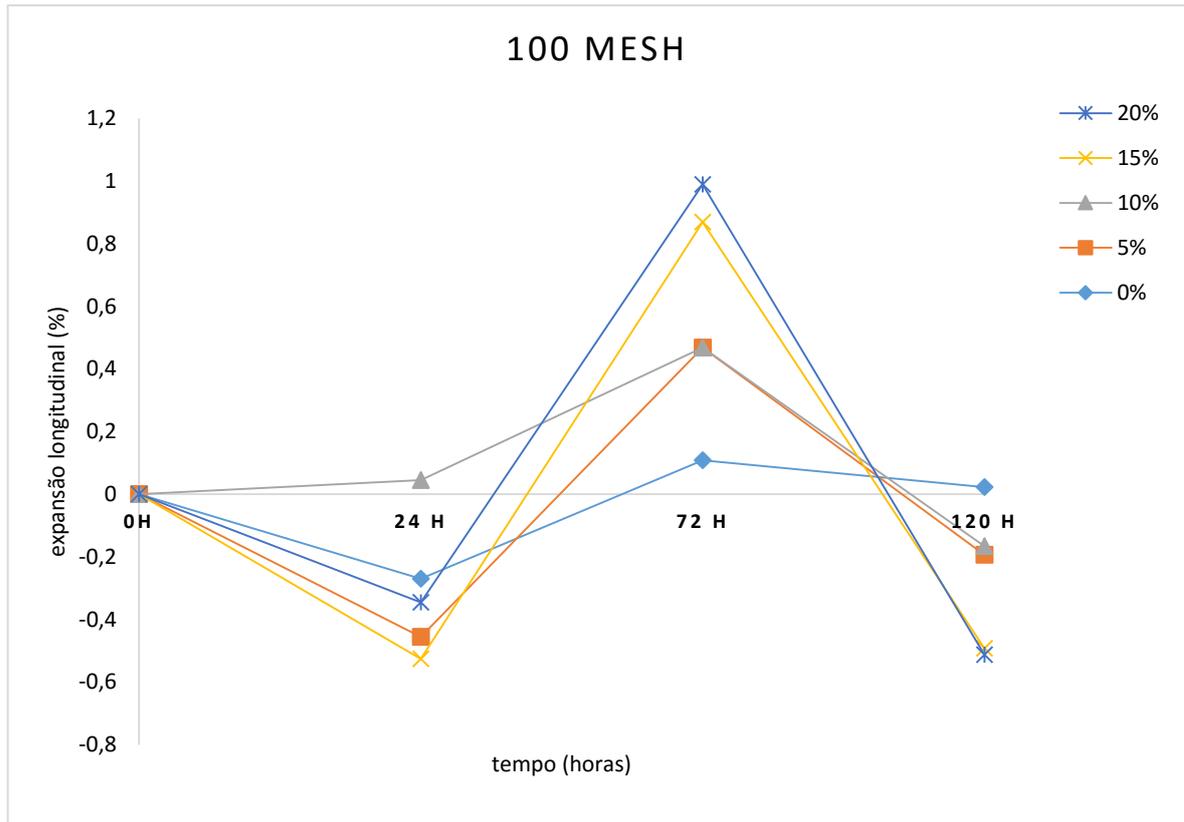


Gráfico 3 – Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 100 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.

Os briquetes de 200 mesh (Gráfico 4), assim como os de 35 e 100 mesh, apresentaram reduções na expansão longitudinal nas primeiras 24 horas. Entretanto, diferentemente dos demais, nessa granulometria menor, percebe-se uma tendência de expansão positiva, não indicando estabilidade no período pesquisado. Nesse sentido, ver-se a necessidade de ampliação do período de avaliação dos briquetes, a fim de se compreender de forma mais clara o comportamento da expansão longitudinal destes materiais.

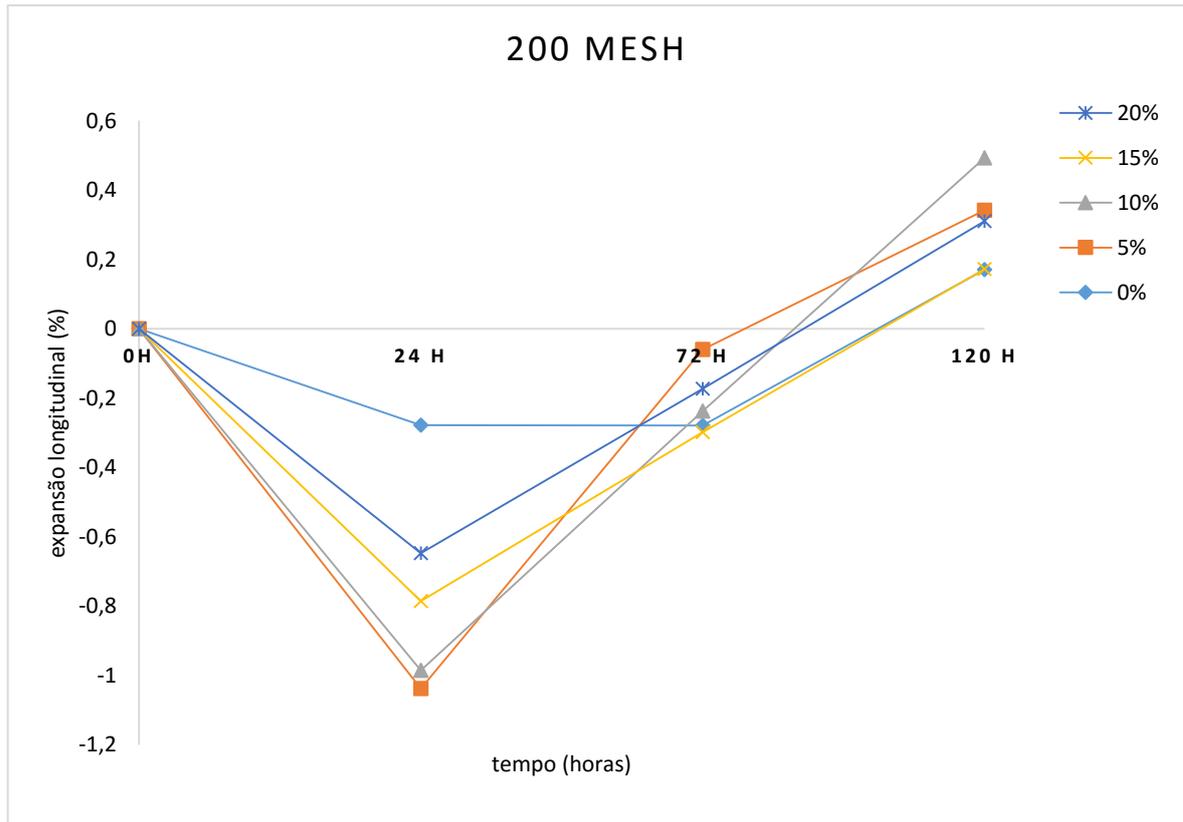


Gráfico 4 – Expansão longitudinal dos briquetes com granulometria 200 mesh em função da concentração do aglutinante GRM.

Considerando todos os resultados dessa análise, percebe-se que quanto maiores as concentrações de aglutinante, maiores são as variações da expansão longitudinal dos briquetes. Entretanto, essa tendência não é unânime em todas as granulometrias. Além disso, pode-se entender, pelos resultados apresentados, que os briquetes que apresentaram menores variações de expansão longitudinal foram os produzidos na granulometria de 60 mesh e com porcentagens de aglutinantes de 0, 5 e 10%.

4.4.2.2 Densidade aparente

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para cada variável e a interação entre elas, ou seja, somente as concentrações de aglutinantes, somente as frações de granulometria e a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela

15). Neste sentido, testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 15 – Análise de variância para a variável resposta densidade aparente, considerando dois fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria e suas interações.

FV	GL	SQ	QM	FC	<i>p</i> - valor
Aglutinante	4	0,059	0,015	25.724	0,000*
Granulometria	3	0,007	0,003	4.457	0,006*
Aglutinante*Granulometria	12	0,022	0,002	3.246	0,000*
Erro	80	0,045	0,001		
Total corrigido	99	0,135			
CV (%)	2,09				

**p*-valor < 0,05 = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante, isoladamente, observa-se na tabela 16, onde são apresentados os valores médios da densidade aparente dos briquetes, em g.cm⁻³, que houve diferença significativa entre as concentrações de 15% e 20% em comparação com as demais concentrações, apresentando uma tendência de aumento de densidade a partir de 10%, com o aumento da concentração do aglutinante.

Tabela 16 – Valores médios da densidade aparente (g.cm⁻³) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Densidade aparente (g.cm ⁻³)	Granulometria (mesh)	Densidade aparente (g.cm ⁻³)
0	1,14 ^b	35	1,14 ^a
5	1,12 ^a	60	1,14 ^a
10	1,13 ^{ab}	100	1,14 ^a
15	1,16 ^c	200	1,16 ^b
20	1,19 ^d		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Em relação à granulometria, quando analisada de forma isolada, os resultados mostraram que não houve diferença significativa para as frações de 35, 60 e 100 mesh, tendo diferença significativa para a granulometria de 200 mesh, com ligeiro aumento de densidade, igual a $1,16 \text{ g.cm}^{-3}$.

A tabela 17 apresenta os resultados de densidade aparente, com efeito dos níveis do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada nível de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Os testes de médias (Tukey) realizados são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Tabela 17 – Valores médios da densidade aparente (g.cm^{-3}) dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.

Aglutinante (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	1,11 ^{aA}	1,14 ^{abAB}	1,15 ^{bB}	1,16 ^{abB}
5	1,12 ^{abA}	1,10 ^{aA}	1,10 ^{aA}	1,14 ^{aA}
10	1,16 ^{bcB}	1,11 ^{aA}	1,11 ^{aA}	1,15 ^{abB}
15	1,15 ^{abcA}	1,17 ^{bcA}	1,16 ^{bA}	1,18 ^{abA}
20	1,17 ^{cA}	1,20 ^{cA}	1,19 ^{bA}	1,19 ^{bA}

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

Ao analisar a interação do aglutinante na granulometria, observa-se que na granulometria de 35 mesh não há efeitos significativos entre as concentrações de aglutinante para os valores de densidade aparente, pois os resultados se confundem estatisticamente entre si. O mesmo acontece para a granulometria de 200 mesh. Para a granulometria de 60 mesh tem-se dois grupos: o primeiro de 0% a 10% estatisticamente iguais e, um segundo, formado pelas concentrações de 15% e 20%, iguais entre si, porém com valores maiores de densidade aparente do que o primeiro. Para a fração de 100 mesh, o efeito foi muito semelhante ao que aconteceu com a de

60 mesh, com diferença no valor de densidade para a amostra sem aglutinante, a qual neste caso se igualou ao valores de 15% e 20%.

Para a análise de interação da granulometria no aglutinante, observa-se que para as concentrações de 5%, 15% e 20% não houve diferença significativa para as diferentes granulometrias. Para as granulometrias de 35 e 200 mesh, na concentração de 10%, os valores foram semelhantes, porém maiores do que as granulometrias de 60 e 100 mesh, significantes entre si. Os briquetes produzidos sem aglutinantes (0%) nas granulometrias de 60, 100 e 200 mesh não apresentaram diferenças estatísticas entre si, e a granulometria de 35 mesh tende a um valor menor que as demais, somente sendo igual estatisticamente a granulometria de 60 mesh.

Os valores de densidade aparente observados estão próximos aos encontrados em algumas literaturas, que utilizam outros materiais de base. Boas (2011), estudando briquetes produzidos com madeiras de diferentes espécies, encontrou valores de 1,05 e 1,16 g.cm⁻³. Ohana (2012) encontrou densidade aparente média para briquetes de casca de Teca, correspondendo a 1,07 g.cm⁻³. Quirino (2002) apresenta valores de densidade para briquetes de serragem de 1,22 g.cm⁻³; casca de arroz 1,28 g.cm⁻³ e bagaço de cana 1,10 g.cm⁻³. Pimenta et al. (2015), estudando o efeito do amido de milho e da argila em briquetes de carvão de casca de coco encontrou densidades médias aparentes entre 0,66 e 0,75 g.cm⁻³.

A densidade aparente dos briquetes encontrada nesse estudo está de acordo com os padrões dos briquetes comercializados e empregados na indústria. A empresa NacBriquetes Produtos Alternativos Ltda (2015) apresenta densidade de briquetes de uso siderúrgico variando entre 1,0 e 1,3 g.cm⁻³.

A densidade aparente tem influência direta na estocagem e transporte dos briquetes, pois quanto maior a densidade de um material, melhor será seu armazenamento.

4.4.2.3 Poder calorífico superior (PCS)

O poder calorífico superior dos briquetes foi determinado a fim de se conhecer a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão dos briquetes.

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para cada variável e a interação entre elas, ou seja, somente as concentrações de aglutinantes, somente as frações de granulometria e a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela 18). Neste sentido testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 18 – Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior (PCS), considerando os fatores: concentração de aglutinante e fração de granulometria.

FV	GL	SQ	QM	FC	p - valor
Aglutinante	4	258.579,20	64.644,80	10.397	0,000*
Granulometria	3	123.979,24	41.326,41	6.647	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	166.935,76	13.911,31	2.237	0,017*
Erro	80	497.402,80	6.217,54		
Total corrigido	99	1.046.897,00			
CV (%)	1,61				

* p -valor $< 0,05$ = significância a 5% pelo teste F.

Analisando apenas o efeito do aglutinante, observa-se na tabela 19, onde são apresentados os valores médios do PCS dos briquetes, em kcal.kg^{-1} , que houve um aumento significativo a partir da concentração 10% de aglutinante, porém quando comparado não mostrou diferenças entre as concentrações de 0% e 5% como também entre as concentrações de 15% e 20% do aglutinante.

Para a granulometria, quando analisada isoladamente, observa-se que a de 35 mesh não mostrou diferença significativa quando comparada com a granulometria de 200 mesh. Esses resultados estão de acordo com o teor de carbono fixo para os briquetes de granulometria de 35 mesh, ou seja, de maiores partículas. Isso mostra

que há uma correlação direta entre a porcentagem de carbono fixo e o poder calorífico superior, conforme a literatura indica. Também é verificado que o PCS aumentou na granulometria de 35 mesh, indicando uma relação direta entre as três variáveis. Pereira et al. (2009), estudando diferentes aglutinantes e granulometrias na produção de briquetes, encontrou resultados de PCS maiores à medida que diminui as granulometrias, ou seja, com o aumento das partículas.

Tabela 19 – Valores médios da poder calorífico superior (kcal.kg^{-1}) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Poder calorífico superior (kcal.kg^{-1})	Granulometria (mesh)	Poder calorífico superior (kcal.kg^{-1})
0	4.837 ^a	35	4.954 ^b
5	4.846 ^a	60	4.860 ^a
10	4.897 ^{ab}	100	4.880 ^a
15	4.946 ^b	200	4.897 ^{ab}
20	4.963 ^b		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A tabela 20 apresenta os resultados de poder calorífico superior, com efeito das concentrações do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada concentração de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Da mesma forma que realizada para as análises de densidade aparente, os testes de médias (Tukey) são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Ao analisar a interação do aglutinante na granulometria, observa-se que não há significância estatística em todas as faixas analisadas, indicando não haver efeito da variação de concentração da gordura residual usada como aglutinante nas granulometrias estudadas, tendo como resposta o poder calorífico superior.

Para a análise de interação da granulometria no aglutinante, o poder calorífico superior das diferentes frações granulométricas não apresentou diferença significativa nas concentrações de 15% e 20% de aglutinante. Para os menores níveis (0%, 5% e

10%), observam-se diferenças significativas pontuais entre as diferentes granulometrias, porém, na maioria dos casos, ocorreu semelhanças significativas, não havendo tendências de crescimento ou aumento nos valores de PCS.

Tabela 20 – Valores médios do poder calorífico superior (kcal.kg^{-1}) dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.

Aglutinante (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	4.866 ^{aAB}	4.779 ^{aA}	4.787 ^{aAB}	4.917 ^{abB}
5	4.935 ^{aB}	4.829 ^{abAB}	4.821 ^{aAB}	4.801 ^{aA}
10	5.001 ^{aB}	4.790 ^{aA}	4.899 ^{abAB}	4.896 ^{abAB}
15	4.985 ^{aA}	4.953 ^{ba}	4.883 ^{abA}	4.965 ^{ba}
20	4.985 ^{aA}	4.947 ^{ba}	5.012 ^{ba}	4.908 ^{abA}

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

Os valores encontrados para o PCS dos briquetes produzidos com GRM ficaram, portanto, numa faixa entre $4.779 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e $5.012 \text{ kcal.kg}^{-1}$, superiores aos encontrados por Ohana (2012), com valores de $3.559,14 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para casca de *Tectona grandis* L. F. e $3.813,90 \text{ kcal.kg}^{-1}$ para serragem da mesma espécie. Também, não diferentes dos valores encontrados por Quirino et al. (2004), que após pesquisa bibliográfica de 258 espécies de madeira, encontraram PCS médio de $4.710 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

Quando comparados aos valores relatados por Santos et al. (2011), que ao estudar briquetes a partir de resíduos de exploração florestal encontrou valores médios de $4.442 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e $4.833 \text{ kcal.kg}^{-1}$, inferiores aos registrados nesse trabalho. Da mesma forma, os resultados de PCS do presente trabalho são superiores aos de Sant'anna et al. (2012), que usando os mesmos percentuais de aglutinante, porém adotando a glicerina, obteve o PCS para 0%= $4.435,85 \text{ kcal.kg}^{-1}$; 5%= $4.337,44 \text{ kcal.kg}^{-1}$; 10%= $4.276,06 \text{ kcal.kg}^{-1}$; 15%= $4.209,90 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e 20%= $4.111,25 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

4.4.2.4 Densidade energética

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) para cada variável e a interação entre elas, ou seja, somente as concentrações de aglutinantes, somente as frações de granulometria e a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela 21). Neste sentido testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 21 - Análise de variância para a variável resposta densidade energética, considerando os fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria.

FV	GL	SQ	QM	FC	<i>p</i> - valor
Aglutinante	4	2.934,6	0,734	27.983	0,000*
Granulometria	3	0,286	0,095	3.641	0,016*
Aglutinante*Granulometria	12	1.054,8	0,088	3.353	0,001*
Erro	80	2.097,4	0,026		
Total corrigido	99	6.373,4			
CV (%)	2,88				

**p*-valor < 0,05 = significância a 5% pelo teste F.

Analisando o efeito do aglutinante, observa-se na tabela 22, onde são apresentados valores médios da densidade energética dos briquetes, em Gcal.m⁻³, que não houve diferença significativa entre as menores concentrações (0%, 5% e 10%) de aglutinante, bem como entre as maiores concentrações (15% e 20%). Todavia, se compararmos os dois grupos observa-se um ligeiro aumento significativo da densidade energética a partir da concentração de 10%.

Ao se avaliar o custo do aglutinante devemos considerar que ele é um resíduo, portanto o uso da maior concentração (20%) é positivo na produção de briquetes.

Para a granulometria, quando analisada isoladamente, pode-se dizer que não houve diferenças significativas para todas as frações granulométricas, podendo ser usada qualquer uma delas.

Tabela 22 – Valores médios da densidade energética (Gcal.m⁻³) dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante GRM (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Densidade energética (Gcal.m ⁻³)	Granulometria (mesh)	Densidade energética (Gcal.m ⁻³)
0	5,51 ^a	35	5,65 ^{ab}
5	5,41 ^a	60	5,56 ^a
10	5,55 ^a	100	5,57 ^{ab}
15	5,74 ^b	200	5,69 ^b
20	5,88 ^b		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A tabela 23 apresenta os resultados de densidade energética, com efeito das concentrações do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada concentração de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Os testes de médias (Tukey) realizados são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Tabela 23 – Valores médios da densidade energética (Gcal.m⁻³) dos briquetes, na interação das concentrações do aglutinante GRM (%) com as frações da granulometria (mesh) e da granulometria com as concentrações de aglutinante.

Aglutinante (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	5,38 ^{aA}	5,43 ^{aAB}	5,53 ^{abAB}	5,69 ^{abB}
5	5,53 ^{abA}	5,33 ^{aA}	5,32 ^{aA}	5,47 ^{aA}
10	5,81 ^{bC}	5,31 ^{aA}	5,42 ^{abAB}	5,64 ^{abBC}
15	5,71 ^{bA}	5,78 ^{bA}	5,65 ^{bA}	5,83 ^{bA}
20	5,81 ^{bA}	5,95 ^{bA}	5,95 ^{cA}	5,83 ^{bA}

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

Ao analisar o desdobramento do aglutinante dentro de cada nível de granulometria, observa-se de uma forma geral que há uma tendência de maiores valores quando se aproxima das maiores concentrações de aglutinante, de formas diferentes, excetuando-se o que acontece com o de 200 mesh, onde há uma tendência de semelhança estatística.

Para a análise de interação da granulometria no aglutinante, os resultados mostram que não houve diferença significativa para todas as granulometrias nas concentrações de 5% 15% e 20% de aglutinante. Para a concentração de 0% observa-se que não houve diferenças significativas entre as granulometrias de 35, 60 e 100 mesh, bem como também não houve entre as granulometrias de 60, 100 e 200 mesh. Na concentração de 10% para as granulometrias de 60, 100 mesh, não houve diferença estatística entre as frações de 35 e 200 mesh e nas de 60 e 100 mesh, entre si.

Poucos foram os estudos encontrados para densidade energética, entretanto, Boas (2011) estudando o efeito do tratamento térmico da madeira para a produção de briquetes, encontrou valores de densidade energética equivalentes a $5,09 \text{ Gcal.m}^{-3}$ e $5,65 \text{ Gcal.m}^{-3}$, valores inferiores aos encontrados no presente trabalho.

Um aspecto que pode ter contribuído no aumento da densidade energética dos briquetes nesse estudo, é o alto valor médio de PCS da gordura residual do murmuru ($7.627 \text{ kcal.kg}^{-1}$) estudado por Kunrath et al. (2013).

4.4.2.5 Resistência à compressão

Na análise de variância entre os fatores estudados (aglutinante e granulometria) observa-se efeito significativo ($p < 0,05$) entre as concentrações de aglutinantes, entre as frações de granulometria e entre a interação do aglutinante com a granulometria (Tabela 24). Neste sentido testes de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos que diferem entre si.

Tabela 24 – Análise de variância para a variável resposta carga máxima, considerando os fatores: concentrações de aglutinante e frações de granulometria.

FV	GL	SQ	QM	FC	<i>p</i> - valor
Aglutinante	4	99.901,45	24.975,36	53.327	0,000*
Granulometria	3	166.617,64	55.539,21	118.586	0,000*
Aglutinante*Granulometria	12	35.939,08	2.994,92	6.395	0,000*
Erro	80	37.467,70	468,35		
Total corrigido	99	339.925,87			
CV (%)	13,81				

**p*-valor < 0,05 = significância a 5% pelo teste F.

Analisando apenas o efeito do aglutinante, observa-se na tabela 25, onde são apresentados os valores médios da carga máxima de ruptura dos briquetes, em kgf, que, no uso do aglutinante, houve um aumento da resistência de acordo com o aumento das concentrações do aglutinante. Porém, não houve diferença significativa entre as concentrações de 5% e 10% e entre 15% e 20%. Isso pode ser explicado pela ação do aglutinante durante a compactação, diminuindo os espaços vazios e, conseqüentemente, provocando uma maior resistência à carga de ruptura. Entretanto, o nível de 0%, ou seja, sem aglutinante, se destacou com diferença significativa quando comparado entre os demais valores dos briquetes compactados com aglutinantes.

Para a granulometria, quando analisada isoladamente, verifica-se um aumento da carga máxima de ruptura a medida que aumenta a granulometria (diminuição das partículas), com destaque para a fração de 200 mesh com o maior valor, de 213,93 kgf, e com diferença significativa quando comparada com as demais frações granulométricas. Esses resultados já eram esperados, considerando que quanto menor as partículas, menores são os espaços vazios e conseqüentemente maior será a resistência do briquete em suportar cargas extras. Corroborando com os resultados apresentados por Oliveira (2013), que ao avaliar briquetes de finos de carvão vegetal aglutinados com diferentes concentrações de parafina e diferentes frações de granulometria, obteve aumento da resistência à medida que aumentava a concentração de parafina e fração granulométrica.

Tabela 25 – Valores médios da carga de ruptura (resistência à compressão), em kgf, dos briquetes para as diferentes concentrações de aglutinante (%) e diferentes frações de granulometria (mesh).

Aglutinante (%)	Carga máxima (kgf)	Granulometria (mesh)	Carga máxima (kgf)
0	208,23 ^c	35	98,60 ^a
5	120,94 ^a	60	154,59 ^b
10	125,97 ^a	100	159,70 ^b
15	162,65 ^b	200	213,93 ^c
20	165,74 ^b		

Médias com letras iguais indicam que as mesmas não diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo Teste de Tukey.

A tabela 26 apresenta os resultados de resistência à compressão, com efeito das concentrações do aglutinante em cada granulometria, na orientação vertical (colunas), e também do efeito da granulometria em cada concentração de aglutinante, na orientação horizontal (linhas). Os testes de médias (Tukey) realizados são representados pelas letras minúsculas, na comparação vertical, e pelas letras maiúsculas na análise horizontal.

Tabela 26 – Valores médios da carga de ruptura (resistência à compressão), em kgf, dos briquetes, na interação da concentração do aglutinante GRM (%) com a fração da granulometria (mesh) e da granulometria com a concentração de aglutinante.

Aglutinante (%)	Granulometria (mesh)			
	35	60	100	200
0	108,42 ^{aA}	187,25 ^{cB}	225,65 ^{cC}	311,59 ^{dD}
5	79,42 ^{aA}	119,56 ^{aB}	111,48 ^{aAB}	173,32 ^{abC}
10	100,07 ^{aA}	126,51 ^{abAB}	118,51 ^{aA}	158,80 ^{aB}
15	99,01 ^{aA}	163,46 ^{bcB}	167,61 ^{bB}	220,51 ^{cC}
20	106,07 ^{aA}	176,19 ^{cB}	175,25 ^{bB}	205,44 ^{bcB}

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

Ao analisar a interação do aglutinante na granulometria, observa-se que não houve diferença significativa em todas as concentrações de aglutinante na granulometria de 35 mesh. Para as outras faixas analisadas os resultados se confundem em termos de significância. Porém, observa-se que os valores de 225,65 kgf e 311,59 kgf, representados na concentração de 0%, nas granulometrias de 100 e 200 mesh, respectivamente, se destacaram com aumento significativo em relação as demais.

Avaliando o efeito da granulometria no aglutinante, observa-se que houve diferença significativa para todas as granulometrias na concentração de 0%, ou seja, sem aglutinante, temos um aumento da resistência conforme aumento das granulometrias. Importante destacar que os maiores valores médios da carga máxima de ruptura estão nesta faixa de aglutinante (0%). Portanto, houve uma correlação entre o efeito do tamanho das partículas com a resistência dos briquetes.

Analisando-se as frações onde há a aplicação do aglutinante, observa-se uma tendência de aumento da resistência conforme o aumento da granulometria, porém não tão significativo quanto ao sem aglutinante, pois os resultados se confundem em termos de significância ou semelhança de valores.

Avaliando os resíduos de Teca na produção de briquetes, Ohana (2012) encontrou valores médios de carga máxima de ruptura de 89,70 kgf para a casca e 52,70 kgf para a serragem, considerando esses valores aceitáveis para os usos siderúrgicos e domésticos respectivamente. Da mesma forma, Chrisostomo (2011), analisando diferentes materiais para a produção de briquetes, encontrou valores de carga máxima para o bagaço de cana, serragem de eucalipto e serragem de pinus, de 52,92 kgf, 86,92 kgf e 38,53 kgf, respectivamente. Todos os valores apresentados nos trabalhos citados acima estão bem abaixo dos resultados alcançados na presente pesquisa.

A resistência à compressão dos briquetes foi determinada a fim de se conhecer o quanto o briquete suporta aos esforços (cargas) externos. O ensaio de resistência à compressão é um parâmetro que avalia os briquetes quanto ao seu manuseio, transporte e estocagem e é expresso através da carga máxima de ruptura (kgf) (BOAS, 2011).

5 CONCLUSÕES

Os briquetes produzidos com a casca do coco de *Astrocaryum spp* (murmuru) se mostraram uma fonte viável para geração de energia e aproveitamento desses resíduos.

Os resultados da análise imediata para caracterização da matéria-prima se encontram dentro dos padrões referenciados na literatura científica para a produção de briquetes. As análises mostraram que a granulometria de 35 mesh apresentou os melhores resultados para o teor de voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e densidade a granel.

Na caracterização dos briquetes, as propriedades densidade aparente, poder calorífico superior, densidade energética e resistência a compressão apresentaram resultados significantes para as duas variáveis estudadas, ou seja, aglutinante e granulometria.

A análise de densidade aparente mostrou que os briquetes com 20% de aglutinante e granulometria de 200 mesh são os mais recomendáveis sob o ponto de vista comercial, por apresentarem os maiores valores. A resposta sobre o efeito do aglutinante na granulometria mostrou que as concentrações de 15 e 20% são iguais estatisticamente para todas as granulometrias. Nesse sentido, o aglutinante por se tratar de um resíduo, é preferível adotar maiores quantidades (20%). O efeito da granulometria na concentração de aglutinante evidenciou que para essas mesmas concentrações não há diferença de resultados para todas as granulometrias.

Os briquetes produzidos com o aglutinante gordura residual de murmuru são recomendados para uso doméstico e comercial, pois apresentaram valores médios de poder calorífico superior em torno de 5000 kcal.kg⁻¹. De uma forma geral, sobre o poder calorífico superior, considerando os efeitos de granulometria e concentração de aglutinante, os briquetes apresentaram semelhanças estatísticas, não sendo essa propriedade determinante para escolha comercial de briquetes.

Em se tratando da densidade energética, o efeito do aglutinante na granulometria mostrou que os briquetes produzidos com 15 e 20% de aglutinante foram melhores para 60 e 100 mesh, porém no efeito oposto, tanto os resultados para 15% ou 20% foram iguais estatisticamente para qualquer granulometria. Isso indica

que para essa propriedade os briquetes com 20% são recomendáveis comercialmente.

Apesar de os briquetes produzidos sem o uso do aglutinante e com partículas mais finas mostrarem os melhores resultados para a resistência à compressão, os resultados para as concentrações de 15% e 20%, considerando a adição de aglutinante, tenderam a valores mais altos para as granulometrias mais finas também, com destaque para 200 mesh.

De forma geral, tendo os resultados sido trabalhados estatisticamente, considerando ainda os aspectos comerciais e de literatura, pode-se concluir que, para a faixa de trabalho adotada, os briquetes produzidos com granulometria de 200 mesh e 20% de concentração de aglutinante foram os melhores.

Com base nos resultados obtidos novos estudos são necessários para se definir outros parâmetros de tratamento térmico, pois conforme observado nesse trabalho o efeito do aquecimento pode ter influenciado na qualidade dos briquetes, principalmente na resistência à compressão.

Para melhor conhecimento da matéria-prima estudada, novos estudos devem ser realizados a fim de se aprofundar o conhecimento dos elementos constitutivos da casca do coco do murmuru, bem como, da estrutura física de suas partículas e suas forças coesivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 8633 – Carvão Vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6922 –Carvão Vegetal - Determinação da densidade a granel**. Rio de Janeiro, 1983.

_____.**NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

_____.**NBR 7181/84 - Análise granulométrica de partículas**. Rio de Janeiro, 1984.

ALBUQUERQUE, C. E. C. de; ANDRADE, A. M. de. Briquetagem – visão histórica e perspectiva futura. **Floresta e Ambiente**, Ano 4, p. 104-109, 1997.

BARROS, J. L. de; **Caracterização de blendas e briquetes de carvões vegetal e mineral**. 2014. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais - Materiais Funcionais e Polímeros de Fontes Renováveis). Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2014.

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

BERTOLO, L. R.; QUEIROZ, P. N.; LINO, R. Y.; GARCIA, V. dos R.; JÚNIOR VAZ W. A.; SANTOS, W. L. D. dos. Desenvolvimento de briquetes com folhas de árvores geradoras de energia térmica. **Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI**, v. 4, n. 9, p. 1-21, 2010.

BOAS, M. A. V. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento em Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2011.

BRAND, M. A.; SILVA, D. A. da, MUÑIZ, G. I. B. de, KLOCK, U. Balanço e rendimento energéticos de uma indústria Integrada de base florestal. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 9, n. 1, p. 45 - 53, 2002.

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

BRASIL. Decreto - Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política nacional de resíduos sólidos. 2. ed., Brasília: Câmara dos Deputados, **Edições Câmara**, 2012. 73 p. Série legislação; n. 81. Disponível em: http://fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf Acesso em: 12 abr. 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, MME, Empresa de Pesquisa Energética, EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Brasília /DF, 2015, 467 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, MME, **Resenha energética brasileira**, Exercício 2014, edição de junho de 2015, 32 p.

CAVALCANTI, M. A.; CORREA, A. de A.; SANTOS, N. S. dos. Briquete de resíduos agroflorestais da Amazônia. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. **Revista da Madeira**, n. 125, 2010.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo de compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustíveis sólidos**. 2011. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. 2011.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS – **COPANT 464** Método de determinación de la compresión axil o paralela al grano, 1972.

DEEPAK K. B.; JNANESH, N. A. Investigation of areca leaves as a biomass fuel by the method of briquetting. **IPASJ International Journal of Mechanical Engineering**, v. 3, n. 6, p. 16-21, 2015.

EUFRADE JUNIOR, H.de J.; **Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2015.

FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. de C. O.; VIEIRA, D. B. RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá –MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013.

FELFLI, F. F.; MESA P, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 236-242, 2011.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciênc. agrotec.* [online]. 2014, vol.38, n.2 [citado 2015-10-17], pp. 109-112. Disponible en: ISSN 1413-7054. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.

FONTES, P. J. P de; QUIRINO, W. F.; OKINO, E. Y. A. **Aspectos técnicos da briquetagem do carvão vegetal no Brasil**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais: IBAMA 1989. 14 p (Circular Técnica Nº 1).

FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101-106, 2010.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais Compósitos Lignocelulósicos), Pós Graduação da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, SP, 2010.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, p. 14-18, 2013.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2008.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes Produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômica, Botucatu, 2010.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n. 5, p. 657–661, 2009.

KUNRATH, N. F.; SOUZA, I. S. de; SANTOS, A. L. **Caracterização dos resíduos provenientes do processo de extração do óleo do coco de murmurú (*Astrocaryum spp*) e seu potencial energético**. In: Congresso Internacional de Bioenergia, 8, 2012, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Congresso Internacional de Bioenergia, 2013. 1 CD – ROM.

MARTINS, J.; FERREIRA, C. M.; SILVA, N. P. da; Microestruturas de pelotas feitas com mistura de redutor e finos de minério. **Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 3, p. 203-207, 2002.

MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A. Relationship between physico-mechanical properties, compacting pressure and mixing proportion of briquettes produced from maize cobs and sawdust. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 4, p. 50-60, 2014.

MORET, A.; RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. Critérios de sustentabilidade para bioenergia. **1º Anuário Brasileiro das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis**. p. 92-98, 2012/2013.

NACBRIQUETES **Produtos Alternativos LTDA**. Disponível em: <<http://www.nacbriquetes.com.br/>>. Acesso em: 18 nov. 2015.

NASCIMENTO, E. P. do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 51-64, 2012.

OHANA, C. C. **Utilização dos resíduos do processamento de teca (*Tectona grandis* L.f.) na produção de briquetes**. 2012. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Curso de pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração Tecnologia de Produtos Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, E. R. de; MARTINS, J. Emprego de resíduos siderúrgicos e pellet feed minipelotizados na sinterização de minério de ferro. **Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 4, p. 249-254, 2003.

OLIVEIRA, R. R. L. de. **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades**. 2013. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

PEREIRA, F. A.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R.; DELLA LÚCIA, R. M.; PATRÍCIO JÚNIOR, W.; BIANCHE, J. J. Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio. **Revista Floresta e Ambiente**, v.16, n.1, p. 23 – 29, 2009.

PIMENTA, A. S.; SANTOS, R. C. dos; CARNEIRO, A. C. de O.; CASTRO, R. V. O. Utilização de resíduos de coco (*Cocos nucifera*) carbonizado para a produção de briquetes. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 137-144, 2015.

PROTÁSIO, T. de P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.

PROTÁSIO, T. de P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. da S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1252–1258, 2012.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais: BAMA, 1991. 19 p. (Circular Técnica, nº 13).

QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais: IBAMA, 2002. 35 p.

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

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. de O.; MOREIRA, A. C. de O.; SOUZA, F.; FILHO, M. T. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Revista Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; ZÁRATE, H. Centrais Térmicas por Gaseificação. **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 88-105.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010. 117 f. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANT'ANNA, M. C. S.; LOPES, D. F. C.; CARVALHO, J. B. R.; da SILVA, G. F. Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.14, n. 3, p. 289-294, 2012.

SANT'ANNA, M. C. S.; LEITE, N. S.; LOPES, D. F. C.; SERAFINI, M. R.; SILVA, G. F. da. Monitoramento das tecnologias de briquetes através da análise de pedidos de patente. **Revista GEINTEC**, v. 2, n. 2, p.100-107, 2012.

SANTOS, R. C. dos; CARNEIRO, A. de C. O.; CASTRO, R. V. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, A. F. N. M.; MARINHO, I. V.; VILLAS BOAS, M. A. Potencial de briquetagem de resíduos florestais da região do Seridó, no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 285-294, 2011.

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

SOUZA, M. M.; SILVA, D. A. da; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R. C. dos. Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 2, p. 325 - 334, 2012.

VALE, A. T. DO; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. DE S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

VIEIRA, A. C.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C. Caracterização da casca de arroz para a geração de energia. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 51-57, 2013.

ZHANG, J.; GUO, Y. Physical properties of solid fuel briquettes made from *Caragana korshinskii* Kom. **Powder Technology**, v. 256, p. 293–299. 2014.

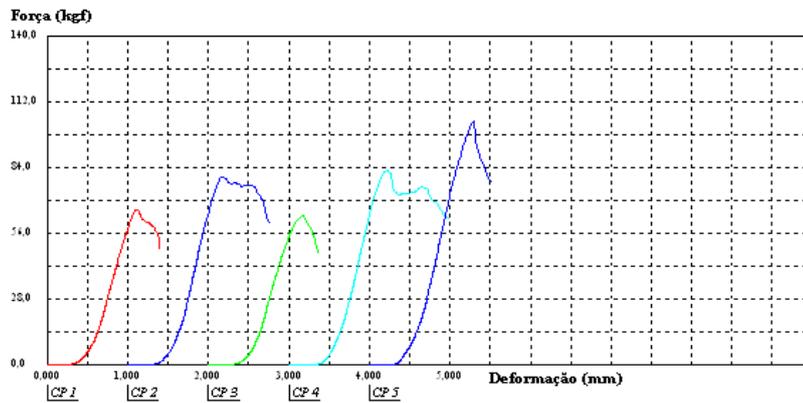
YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; FLORES, W de P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na Agricultura**. V. 28, n.1, p. 11-15. Botucatu. 2013.

APÊNDICES

A seguir são apresentados os relatórios referentes aos ensaios de resistência à compressão, de todos os tratamentos, realizados na máquina de ensaios universal-EMIC DL 10.000.

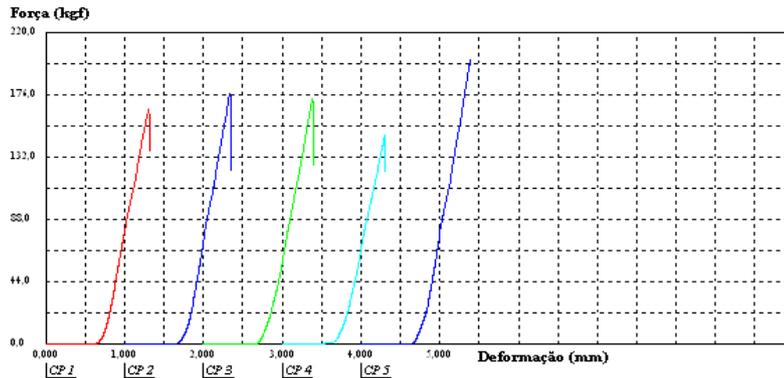
APÊNDICE A - Tratamento 1 (5% de aglutinante x 35 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	17,11	35,90	3,14	11272,60	66,16	0,59	ORT1R1
CP 2	16,63	35,87	3,14	11263,18	80,33	0,71	ORT1R2
CP 3	17,09	35,93	3,14	11282,02	63,59	0,56	ORT1R3
CP 4	16,90	35,92	3,14	11278,88	83,19	0,74	ORT1R4
CP 5	16,52	35,87	3,14	11263,18	103,81	0,92	ORT1R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,85	35,90	3,140	11270	79,41	0,7046	*
Desv. Padrão	0,2669	0,02775	0,0000	8,713	16,09	0,1432	*
Coef. Var. (%)	1,584	0,07730	0,0000	0,07730	20,27	20,32	*
Mínimo	16,52	35,87	3,140	11260	63,59	0,5636	*
Máximo	17,11	35,93	3,140	11280	103,8	0,9216	*



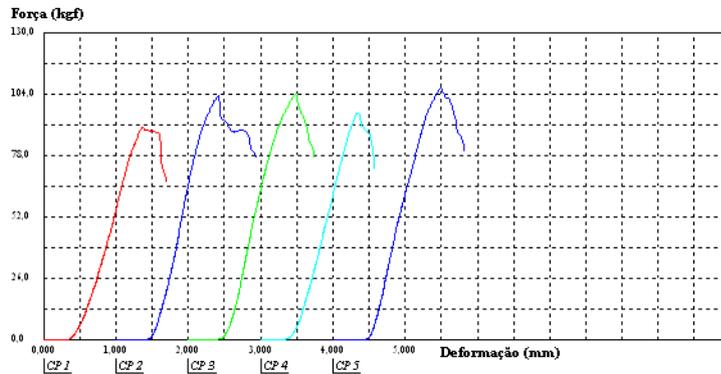
APÊNDICE D - Tratamento 4 (5% de aglutinante x 200 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,22	35,61	3,14	11181,54	166,34	1,49	ORT4R1
CP 2	16,30	35,61	3,14	11181,54	177,58	1,59	ORT4R2
CP 3	16,51	35,59	3,14	11175,26	173,39	1,55	ORT4R3
CP 4	16,72	35,61	3,14	11181,54	147,94	1,32	ORT4R4
CP 5	16,41	35,59	3,14	11175,26	201,34	1,80	ORT4R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,43	35,60	3,140	11180	173,3	1,550	*
Desv.Padrão	0,1949	0,01095	0,0000	3,440	19,34	0,1733	*
Coef.Var.(%)	1,186	0,03077	0,0000	0,03077	11,16	11,18	*
Mínimo	16,22	35,59	3,140	11180	147,9	1,323	*
Máximo	16,72	35,61	3,140	11180	201,3	1,802	*



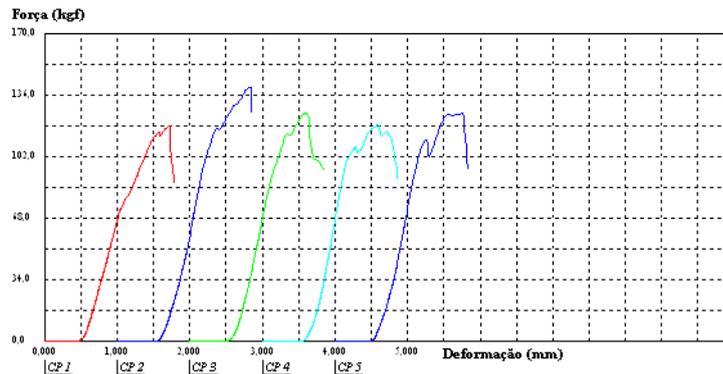
APÊNDICE E - Tratamento 5 (10% de aglutinante x 35 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,60	35,61	3,14	11181,54	89,95	0,80	ORT5R1
CP 2	16,34	35,59	3,14	11175,26	103,42	0,93	ORT5R2
CP 3	16,10	35,55	3,14	11162,70	103,88	0,93	ORT5R3
CP 4	16,13	35,55	3,14	11162,70	96,26	0,86	ORT5R4
CP 5	16,07	35,58	3,14	11172,12	106,84	0,96	ORT5R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,25	35,58	3,140	11170	100,1	0,8958	*
Desv.Padrão	0,2235	0,02608	0,0000	8,188	6,862	0,06165	*
Coef.Var.(%)	1,376	0,07330	0,0000	0,07330	6,857	6,882	*
Mínimo	16,07	35,55	3,140	11160	89,95	0,8045	*
Máximo	16,60	35,61	3,140	11180	106,8	0,9563	*



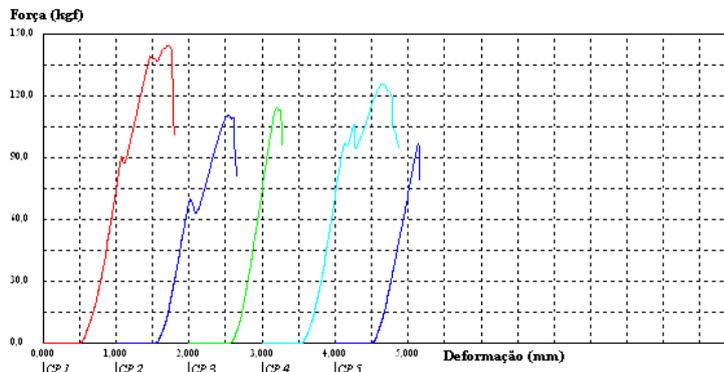
APÊNDICE F - Tratamento 6 (10% de aglutinante x 60 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,94	35,47	3,14	11137,58	118,79	1,07	ORT6R1
CP 2	16,80	35,47	3,14	11137,58	140,68	1,26	ORT6R2
CP 3	16,57	35,65	3,14	11194,10	126,51	1,13	ORT6R3
CP 4	17,68	35,47	3,14	11137,58	119,95	1,08	ORT6R4
CP 5	16,63	35,69	3,14	11206,66	126,61	1,13	ORT6R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,92	35,55	3,140	11160	126,5	1,133	*
Desv.Padrão	0,4469	0,1105	0,0000	34,68	8,709	0,07825	*
Coef.Var.(%)	2,641	0,3107	0,0000	0,3107	6,884	6,905	*
Mínimo	16,57	35,47	3,140	11140	118,8	1,067	*
Máximo	17,68	35,69	3,140	11210	140,7	1,263	*



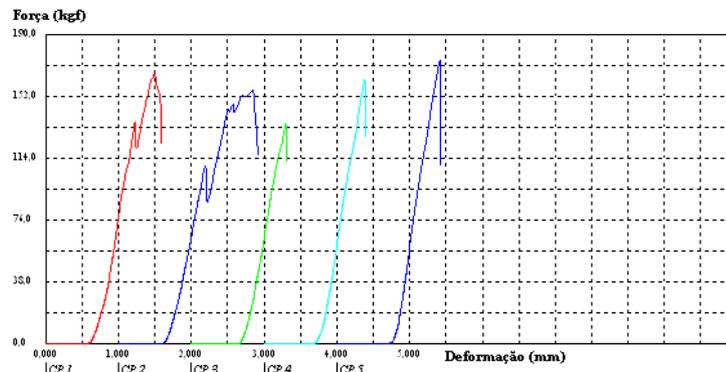
APÊNDICE G - Tratamento 7 (10% de aglutinante x 100 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,81	35,45	3,14	11131,30	144,59	1,30	ORT7R1
CP 2	17,04	35,75	3,14	11225,50	110,47	0,98	ORT7R2
CP 3	17,08	35,69	3,14	11206,66	114,31	1,02	ORT7R3
CP 4	17,10	35,50	3,14	11147,00	126,19	1,13	ORT7R4
CP 5	17,00	35,39	3,14	11112,46	97,00	0,87	ORT7R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	17,01	35,56	3,140	11160	118,5	1,062	*
Desv.Padrão	0,1161	0,1561	0,0000	49,03	17,92	0,1617	*
Coef.Var.(%)	0,6827	0,4391	0,0000	0,4391	15,12	15,23	*
Mínimo	16,81	35,39	3,140	11110	97,00	0,8729	*
Máximo	17,10	35,75	3,140	11230	144,6	1,299	*



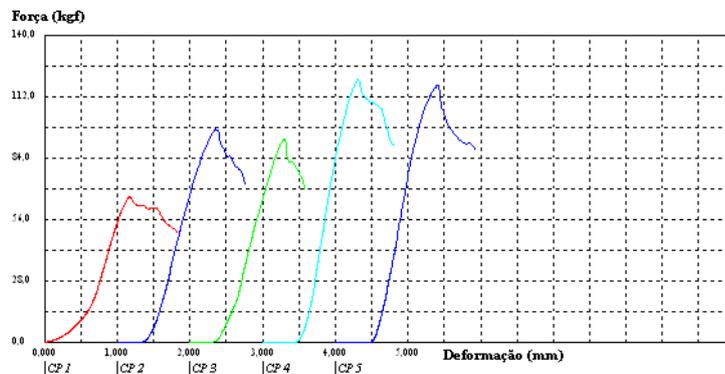
APÊNDICE H - Tratamento 8 (10% de aglutinante x 200 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,30	35,42	3,14	11121,88	165,38	1,49	ORT8R1
CP 2	16,23	35,42	3,14	11121,88	155,90	1,40	ORT8R2
CP 3	15,95	35,42	3,14	11121,88	135,56	1,22	ORT8R3
CP 4	15,70	35,48	3,14	11140,72	162,78	1,46	ORT8R4
CP 5	16,18	35,44	3,14	11128,16	174,37	1,57	ORT8R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,07	35,44	3,140	11130	158,8	1,427	*
Desv.Padrão	0,2459	0,02608	0,0000	8,188	14,58	0,1307	*
Coef.Var.(%)	1,530	0,07359	0,0000	0,07359	9,179	9,156	*
Mínimo	15,70	35,42	3,140	11120	135,6	1,219	*
Máximo	16,30	35,48	3,140	11140	174,4	1,567	*



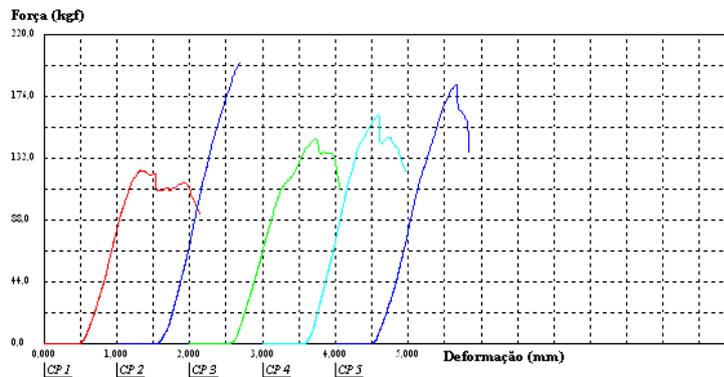
APÊNDICE I - Tratamento 9 (15% de aglutinante x 35 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	17,12	36,02	3,14	11310,28	66,90	0,59	ORT9R1
CP 2	16,44	35,85	3,14	11256,90	97,32	0,86	ORT9R2
CP 3	16,11	35,93	3,14	11282,02	92,91	0,82	ORT9R3
CP 4	15,52	35,78	3,14	11234,92	120,48	1,07	ORT9R4
CP 5	15,50	35,73	3,14	11219,22	117,45	1,05	ORT9R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,14	35,86	3,140	11260	99,01	0,8798	*
Desv.Padrão	0,6792	0,1161	0,0000	36,44	21,63	0,1946	*
Coef.Var.(%)	4,209	0,3236	0,0000	0,3236	21,85	22,12	*
Mínimo	15,50	35,73	3,140	11220	66,90	0,5915	*
Máximo	17,12	36,02	3,140	11310	120,5	1,072	*



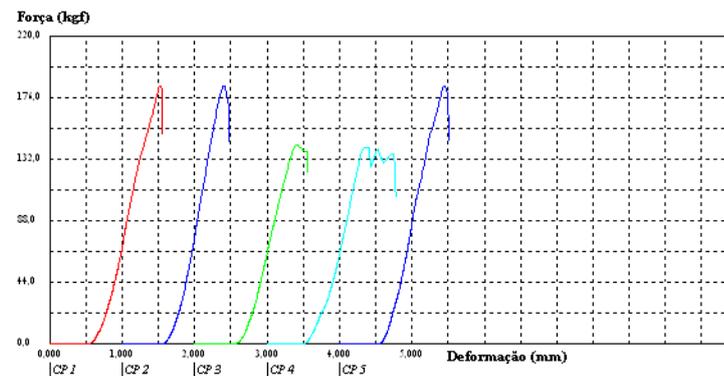
APÊNDICE J - Tratamento 10 (15% de aglutinante x 60 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	15,49	35,64	3,14	11190,96	123,51	1,10	ORT10R1
CP 2	15,42	35,70	3,14	11209,80	200,60	1,79	ORT10R2
CP 3	15,42	35,67	3,14	11200,38	145,96	1,30	ORT10R3
CP 4	15,17	35,68	3,14	11203,52	163,16	1,46	ORT10R4
CP 5	15,54	35,68	3,14	11203,52	184,07	1,64	ORT10R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	15,41	35,67	3,140	11200	163,5	1,459	*
Desv. Padrão	0,1424	0,02191	0,0000	6,880	30,44	0,2709	*
Coef. Var. (%)	0,9240	0,06142	0,0000	0,06142	18,62	18,57	*
Mínimo	15,17	35,64	3,140	11190	123,5	1,104	*
Máximo	15,54	35,70	3,140	11210	200,6	1,789	*



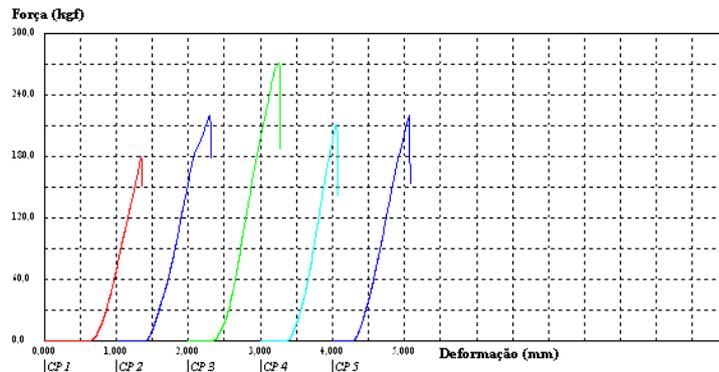
APÊNDICE L - Tratamento 11 (15% de aglutinante x 100 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	15,80	35,68	3,14	11203,52	185,02	1,65	ORT11R1
CP 2	15,51	35,67	3,14	11200,38	184,70	1,65	ORT11R2
CP 3	15,18	35,68	3,14	11203,52	142,65	1,27	ORT11R3
CP 4	16,14	35,68	3,14	11203,52	140,96	1,26	ORT11R4
CP 5	15,31	35,69	3,14	11206,66	184,74	1,65	ORT11R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	15,59	35,68	3,140	11200	167,6	1,496	*
Desv. Padrão	0,3871	0,007071	0,0000	2,220	23,57	0,2104	*
Coef. Var. (%)	2,484	0,01982	0,0000	0,01982	14,06	14,06	*
Mínimo	15,18	35,67	3,140	11200	141,0	1,258	*
Máximo	16,14	35,69	3,140	11210	185,0	1,651	*



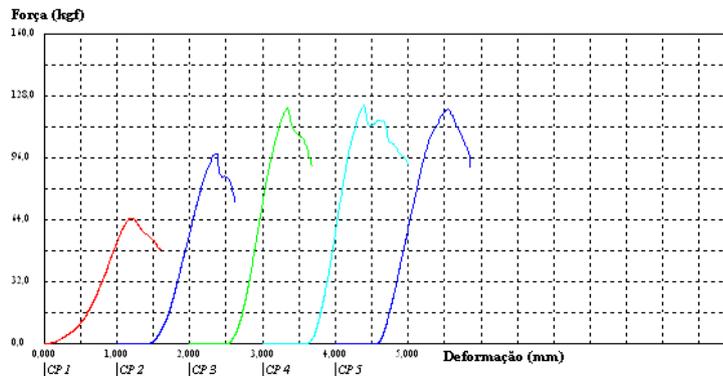
APÊNDICE M - Tratamento 12 (15% de aglutinante x 200 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	15,38	35,61	3,14	11181,54	179,62	1,61	ORT12R1
CP 2	14,93	35,61	3,14	11181,54	220,79	1,97	ORT12R2
CP 3	14,97	35,63	3,14	11187,82	270,92	2,42	ORT12R3
CP 4	15,53	35,63	3,14	11187,82	210,93	1,89	ORT12R4
CP 5	15,11	35,70	3,14	11209,80	220,30	1,97	ORT12R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	15,18	35,64	3,140	11190	220,5	1,971	*
Desv. Padrão	0,2617	0,03715	0,0000	11,66	32,80	0,2929	*
Coef. Var. (%)	1,723	0,1042	0,0000	0,1042	14,88	14,87	*
Mínimo	14,93	35,61	3,140	11180	179,6	1,606	*
Máximo	15,53	35,70	3,140	11210	270,9	2,422	*



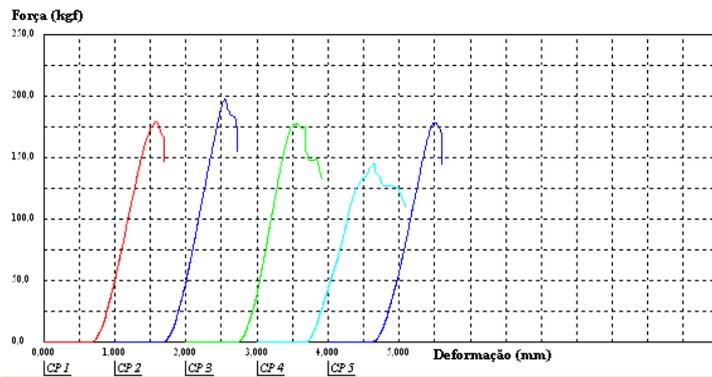
APÊNDICE N - Tratamento 13 (20% de aglutinante x 35 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,52	35,76	3,14	11228,64	65,17	0,58	ORT13R1
CP 2	15,51	35,64	3,14	11190,96	98,45	0,88	ORT13R2
CP 3	15,18	35,79	3,14	11238,06	122,21	1,09	ORT13R3
CP 4	14,52	35,55	3,14	11162,70	123,23	1,10	ORT13R4
CP 5	14,61	35,54	3,14	11159,56	121,29	1,09	ORT13R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	15,27	35,66	3,140	11200	106,1	0,9477	*
Desv. Padrão	0,8103	0,1159	0,0000	36,39	25,08	0,2252	*
Coef. Var. (%)	5,307	0,3250	0,0000	0,3250	23,65	23,76	*
Mínimo	14,52	35,54	3,140	11160	65,17	0,5804	*
Máximo	16,52	35,79	3,140	11240	123,2	1,104	*



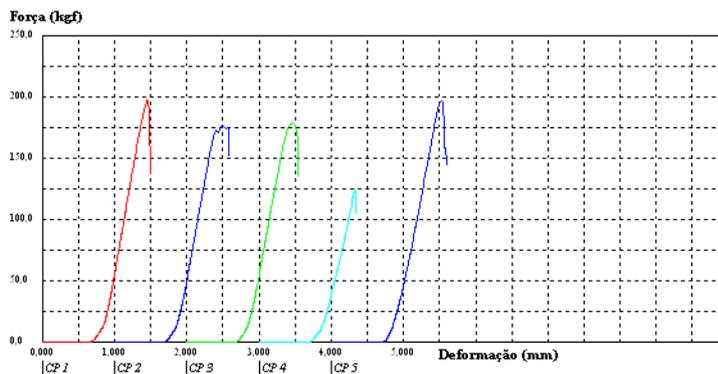
APÊNDICE O - Tratamento 14 (20% de aglutinante x 60 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	14,54	35,43	3,14	11129,13	179,52	1,61	ORT14R1
CP 2	14,22	35,46	3,14	11138,55	198,55	1,78	ORT14R2
CP 3	14,43	35,45	3,14	11131,30	178,00	1,60	ORT14R3
CP 4	14,91	35,66	3,14	11197,24	146,17	1,31	ORT14R4
CP 5	14,56	35,51	3,14	11150,14	178,71	1,60	ORT14R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	14,53	35,50	3,140	11150	176,2	1,581	*
Desv.Padrão	0,2507	0,09311	0,0006353	28,04	18,85	0,1720	*
Coef.Var.(%)	1,725	0,2623	0,02023	0,2515	10,70	10,88	*
Mínimo	14,22	35,43	3,140	11130	146,2	1,305	*
Máximo	14,91	35,66	3,141	11200	198,6	1,783	*



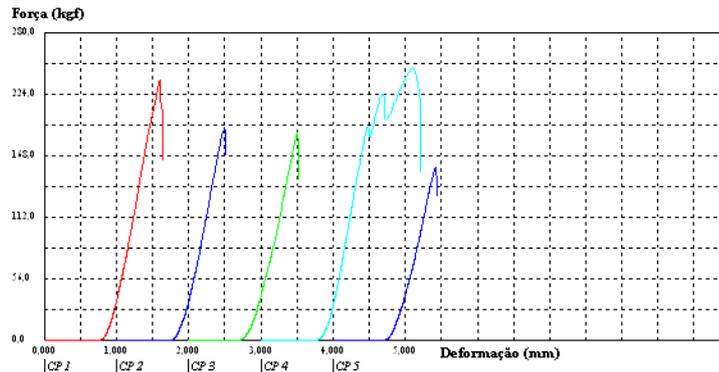
APÊNDICE P - Tratamento 15 (20% de aglutinante x 100 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	14,28	35,46	3,14	11134,44	197,74	1,78	ORT15R1
CP 2	14,22	35,55	3,14	11162,70	177,26	1,59	ORT15R2
CP 3	14,81	35,48	3,14	11140,72	179,45	1,61	ORT15R3
CP 4	15,19	35,29	3,14	11081,06	124,71	1,13	ORT15R4
CP 5	14,26	35,65	3,14	11194,10	197,11	1,76	ORT15R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	14,55	35,49	3,140	11140	175,3	1,572	*
Desv.Padrão	0,4310	0,1324	0,0000	41,57	29,83	0,2638	*
Coef.Var.(%)	2,962	0,3731	0,0000	0,3731	17,02	16,78	*
Mínimo	14,22	35,29	3,140	11080	124,7	1,125	*
Máximo	15,19	35,65	3,140	11190	197,7	1,776	*



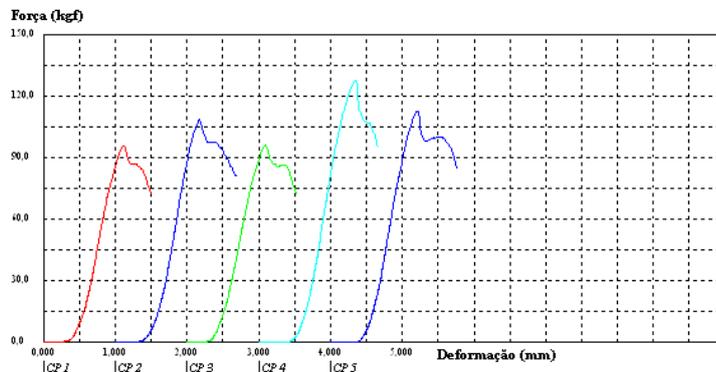
APÊNDICE Q - Tratamento 16 (20% de aglutinante x 200 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	14,23	35,41	3,14	11118,74	237,11	2,13	ORT16R1
CP 2	14,73	35,42	3,14	11121,88	193,55	1,74	ORT16R2
CP 3	14,51	35,58	3,14	11172,12	189,81	1,70	ORT16R3
CP 4	14,63	35,42	3,14	11121,88	248,46	2,23	ORT16R4
CP 5	14,39	35,48	3,14	11140,72	158,26	1,42	ORT16R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	14,50	35,46	3,140	11140	205,4	1,845	*
Desv. Padrão	0,1968	0,07156	0,0000	22,47	36,96	0,3341	*
Coef. Var. (%)	1,357	0,2018	0,0000	0,2018	17,99	18,10	*
Mínimo	14,23	35,41	3,140	11120	158,3	1,421	*
Máximo	14,73	35,58	3,140	11190	248,5	2,234	*



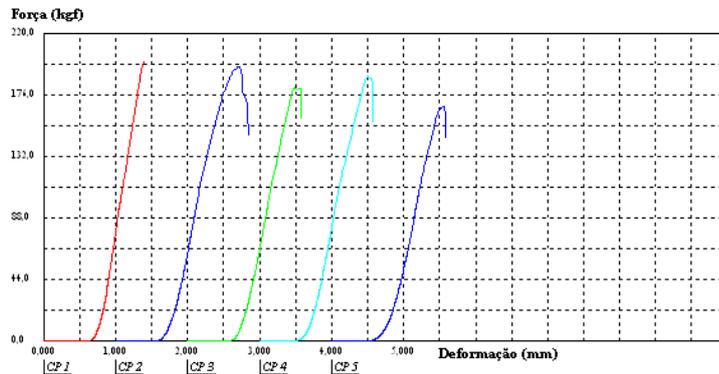
APÊNDICE R - Tratamento 17 (0% de aglutinante x 35 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	18,19	35,76	3,14	11228,64	96,19	0,86	T17R1
CP 2	17,16	35,65	3,14	11194,10	108,67	0,97	T17R2
CP 3	17,16	35,76	3,14	11228,64	96,33	0,86	T17R3
CP 4	16,98	35,63	3,14	11187,82	127,99	1,14	T17R4
CP 5	16,96	35,72	3,14	11216,08	112,94	1,01	T17R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	17,29	35,70	3,140	11210	108,4	0,9673	*
Desv. Padrão	0,5121	0,06107	0,0000	19,18	13,22	0,1194	*
Coef. Var. (%)	2,962	0,1711	0,0000	0,1711	12,19	12,34	*
Mínimo	16,96	35,63	3,140	11190	96,19	0,8567	*
Máximo	18,19	35,76	3,140	11230	128,0	1,144	*



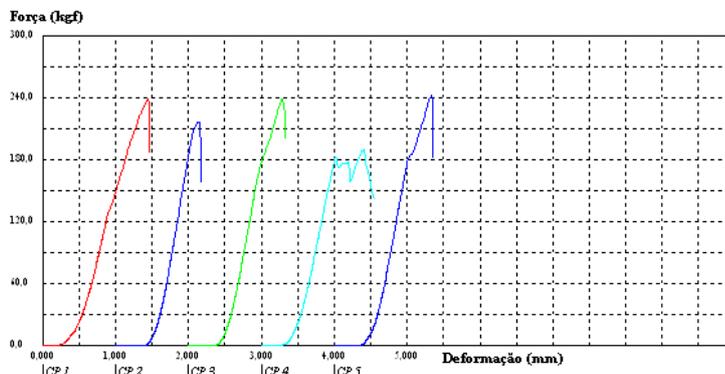
APÊNDICE S - Tratamento 18 (0% de aglutinante x 60 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,37	35,49	3,14	11143,86	200,77	1,80	T18R1
CP 2	17,02	35,60	3,14	11178,40	196,47	1,76	T18R2
CP 3	16,97	35,65	3,14	11194,10	181,28	1,62	T18R3
CP 4	17,12	35,62	3,14	11184,68	189,81	1,70	T18R4
CP 5	17,09	35,60	3,14	11178,40	167,92	1,50	T18R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,91	35,59	3,140	11180	187,3	1,676	*
Desv.Padrão	0,3097	0,06058	0,0000	19,02	13,07	0,1186	*
Coef.Var.(%)	1,831	0,1702	0,0000	0,1702	6,982	7,080	*
Mínimo	16,37	35,49	3,140	11140	167,9	1,502	*
Máximo	17,12	35,65	3,140	11190	200,8	1,802	*



APÊNDICE T - Tratamento 19 (0% de aglutinante x 100 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	17,03	35,44	3,14	11128,16	239,30	2,15	T19R1
CP 2	16,42	35,61	3,14	11181,54	217,20	1,94	T19R2
CP 3	16,58	35,61	3,14	11181,54	239,09	2,14	T19R3
CP 4	16,88	35,65	3,14	11194,10	190,20	1,70	T19R4
CP 5	16,72	35,63	3,14	11187,82	242,47	2,17	T19R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,73	35,59	3,140	11170	225,7	2,020	*
Desv.Padrão	0,2404	0,08438	0,0000	26,50	22,24	0,2010	*
Coef.Var.(%)	1,437	0,2371	0,0000	0,2371	9,855	9,955	*
Mínimo	16,42	35,44	3,140	11130	190,2	1,699	*
Máximo	17,03	35,65	3,140	11190	242,5	2,167	*



APÊNDICE U - Tratamento 20 (0% de aglutinante x 200 mesh)

Corpo de Prova	Altura (cm)	Lado 1 (cm)	Lado 2 (cm)	Área (mm ²)	Carga Máxima (kgf)	Resistência Máxima (kgf/cm ²)	código do CP
CP 1	16,54	35,52	3,14	11153,28	344,62	3,09	T20R1
CP 2	16,56	35,60	3,14	11178,40	285,19	2,55	T20R2
CP 3	16,32	35,54	3,14	11159,56	339,44	3,04	T20R3
CP 4	16,68	35,55	3,14	11162,70	300,03	2,69	T20R4
CP 5	16,59	35,58	3,14	11172,12	288,68	2,58	T20R5
Número CPs	5	5	5	5	5	5	0
Média	16,54	35,56	3,140	11170	311,6	2,791	*
Desv.Padrão	0,1331	0,03194	0,0000	10,03	28,38	0,2565	*
Coef.Var.(%)	0,8049	0,08982	0,0000	0,08981	9,108	9,190	*
Mínimo	16,32	35,52	3,140	11150	285,2	2,551	*
Máximo	16,68	35,60	3,140	11180	344,6	3,090	*

Força (kgf)

