



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E
TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA – CITA

Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da serragem de jacarandá (*Dalbergia sp.*) para fins energéticos

JAIRO BATISTA DIAS

RIO BRANCO - ACRE
AGOSTO / 2019

JAIRO BATISTA DIAS

Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da serragem de jacarandá (*Dalbergia sp.*) para fins energéticos

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

Orientador: Prof. Dr. CARLOS EDUARDO GARÇÃO DE CARVALHO

RIO BRANCO - ACRE
AGOSTO / 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

D541a Dias, Jairo Batista, 1979 -

Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da serragem de jacarandá (*Dalbergia sp.*) para fins energéticos / Jairo Batista Dias – 2019.
93 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, 2019.

Inclui referências bibliográficas e apêndices.
Orientador: Prof.º Dr. Carlos Eduardo Garção de Carvalho.

1. Briquete. 2. Biomassa. 3. Serragem. 4. Castanha-do-brasil. I. Título.

CDD:370

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, INOVAÇÃO E TECNOLOGIA
PARA A AMAZÔNIA – CITA


Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da serragem de jacarandá (*Dalbergia sp.*) para fins energéticos

JAIRO BATISTA DIAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 23 / 08 / 2019



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO GARÇÃO DE CARVALHO
Universidade Federal do Acre - UFAC



Prof. Dr. DÉLCIO DIAS MARQUES
Universidade Federal do Acre - UFAC



Prof.^a. Dr.^a. PATRÍCIA GOMES RIBEIRO AMORIM
Universidade Federal do Acre - UFAC

Dedicatória

À minha filha, Letícia Yoko Leite Dias
À minha esposa e amiga de todas as horas, Fernanda Leite Santana

AGRADECIMENTOS

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

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Garção de Carvalho, pela generosidade da transmissão do conhecimento, sobretudo no direcionamento na realização deste trabalho.

À Profa. Dra. Patrícia Gomes Ribeiro Amorim e ao Prof. Dr. Délcio Dias Marques, por suas participações nas bancas de qualificação e defesa deste trabalho, com as vossas valorosas contribuições.

À Cooperativa Central de Comercialização Extrativista do Acre – COOPERACRE, em específico ao seu Diretor-Presidente, Sr. Manoel José da Silva, bem como ao Diretor Industrial, Sr. Francisco Rogério Gomes Vieira, pela gentileza em nos ceder as biomassas para a realização da pesquisa, assim como por toda a cooperação prestada durante o período.

Ao Instituto SENAI de Tecnologia em Madeira e Mobiliário Carlos Takashi Sasai, em específico à sua Gerente, Sra. Tânia Lucia Guimarães pela cessão do laboratório para realização de ensaios mecânicos e ao colega Ubirajara, pela parceria na execução desses ensaios.

À Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC, em específico à sua Diretora Técnica, Sra. Suelem Marina de Araújo Pontes Farias por permitir a utilização do Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Laboratório de Ensaios em Concreto e do Laboratório de Ensaios em Materiais Cerâmicos.

Ainda no âmbito da FUNTAC, ao colega, Engenheiro Florestal, Sr. Daniel do Nascimento Lima, por toda a ajuda que me foi gentilmente disponibilizada, assim como também à minha colega de turma, Engenheira Florestal, Srta. Fiana Natacha Lima de Oliveira, por toda sua atenção e dedicado auxílio quando da fabricação das amostras.

Ao Prof. Dr. Henrique Jorge de Freitas e ao Prof. Me. Cassio Toledo Messias, por disponibilizarem primeiramente o Laboratório de Anatomia Animal e, a posteriori, o Laboratório de Inspeção e Tecnologia de Produtos de Origem Animal e Vigilância Sanitária, ambos pertencentes ao curso de Medicina Veterinária da UFAC, onde com o auxílio dos seus alunos de graduação, Sr. Alfredo dos Santos Pereira, Srta. Millena do Nascimento Mesquita, e Srta. Karolayne Negreiros Justo, bem como do colega servidor, Técnico em Agropecuária, Sr. Adriano Melo de Queiroz, foram ensaiadas as amostras no calorímetro de combustão.

Ao Prof. Dr. Edcarlos Miranda de Souza pela ajuda nos métodos estatísticos, bem como à Profa. Dra. Almecina Balbino Ferreira pela ajuda com as literaturas acerca do tema.

À colega, Mestre, Sra. Nadma Farias Kunrath, por toda cooperação com materiais e reuniões, assim como ao colega Israel Silva de Souza, pelas dicas das práticas laboratoriais.

Ao colega servidor, Técnico em Laboratório da área de Física, Mestre, Sr. Israel Herôncio Rodrigues de Oliveira Hadad, pela ajuda no entendimento de questões concernentes a pesquisa, bem como por seu espírito sempre solidário.

RESUMO

O alto consumo de energia tem causado grandes preocupações sobre o futuro da humanidade, a consciência ambiental e a questão do esgotamento das fontes de energia não renováveis, incentivando a busca por alternativas de fontes de energia. Nesse cenário, a biomassa e seus resíduos se destacam como fontes promissoras. Sendo o Acre o maior produtor de castanha-do-Brasil, gerando em torno de 6.706 t/ano de resíduos, o presente estudo busca analisar o potencial energético, quanto da liberação de calor a partir da combustão de resíduos de biomassa, briquetados da casca da castanha-do-brasil misturados à serragem da madeira de jacarandá, sendo estes em modelos experimentais. Especificamente, analisaram-se as características mecânicas e físico-químicas para aferição do potencial energético dos briquetes produzidos. As consecuições dos ensaios ocorreram por meio de um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) de um único fator com 11 tratamentos (escalonados na mistura das biomassas) e 5 repetições. Os parâmetros definidos para a produção dos briquetes foram: pressão de compactação (toneladas), granulometria (7 *mesh*; tamanho dos grãos menores ou iguais a 2,83 mm), temperatura ambiente (26 °C) e tempo de prensagem (120 segundos). Na caracterização mecânica identificou-se diferenças estatisticamente significativas a 5% entre os tratamentos para o poder calorífico superior e resistência à compressão, dos quais, em ambos se identificou relação inversa entre as variáveis e a quantidade de casca da castanha-do-brasil. Dentre os tratamentos, T6 (50% de cada biomassa) apresentou o maior potencial energético. Quanto à análise imediata obteve-se Teor de Umidade de 10,35%, Teor de Cinzas de 1,95%, Teor de Materiais Voláteis de 79,66% e Teor de Carbono Fixo de 18,39%, valores que coadunam com a literatura.

Palavras-chave: Briquete, Biomassa, Serragem, Castanha-do-brasil.

ABSTRACT

The energy high consumption has caused major concerns about the future of humanity, environmental awareness and the issue of depletion of non-renewable energy sources, encouraging the search for alternative energy sources. In this scenario, biomass and its residues stand out as promising sources. Acre being the largest producer of Brazil nuts, generating around 6.706 t/year of residues, the present study seeks to analyze the energy potential, as well as the heat release from the combustion of biomass residues, briquettes from the shell, from Brazil nuts mixed to sawdust of rosewood, these being in experimental models. Specifically, the mechanical and physicochemical characteristics were analyzed to measure the energy potential of the briquettes produced. The results of the trials were carried out by a completely randomized single factor design (DIC) with 11 treatments (staggered in the biomass mixture) and 5 replications. The parameters defined for the production of briquettes were: compaction pressure (tons), granulometry (7 mesh; grain size less than or equal to 2.83 mm), room temperature (26 °C) and pressing time (120 seconds). The mechanical characterization identified statistically significant differences at 5% between treatments for higher calorific power and compressive strength, of which, in both, an inverse relationship between the variables and the amount of Brazil nut shell was identified. Among the treatments, T6 (50% of each biomass) presented the highest energy potential. As for the immediate analysis it was obtained Moisture Content of 10.35%, Ash Content of 1.95%, Volatile Material Content of 79.66% and Fixed Carbon Content of 18.39%. literature.

Keywords: Briquette, Biomass, Sawdust, Brazil nuts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura básica da biomassa vegetal da casca da castanha-do-brasil.....	18
Figura 2 - Exemplos de biomassas utilizadas como fonte de energia	19
Figura 3 - Fluxograma das fontes de biomassas e seus processos de conversão energética	25
Figura 4 - Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa	26
Figura 5 - Estrutura da Castanheira (<i>Bertholletia excelsa</i>) e seu fruto	28
Figura 6 - Correia transportadora despejando a casca da castanha-do-brasil.....	35
Figura 7 - Ensacamento da casca da castanha-do-brasil para transporte	35
Figura 8 - Delimitação da Reserva Extrativista Chico Mendes – RESEX.....	35
Figura 9 - Serragem armazenada a céu aberto no pátio da cooperativa	36
Figura 10 - Momento da coleta da serragem da madeira diretamente na máquina.....	37
Figura 11 - Momento do preparo do equipamento para a trituração das biomassas	38
Figura 12 - Detalhe da peneira instalada abaixo do eixo de lâminas de trituração	38
Figura 13 - Biomassas acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e lacradas.....	39
Figura 14 - Conjunto de peneiras sendo preparadas para classificação granulométrica	40
Figura 15 - Balança analítica no momento da pesagem da biomassa dentro do cadinho	45
Figura 16 - Prensa hidráulica de acionamento manual	46
Figura 17 - Kit auxiliar para compactação (prensagem) das biomassas	47
Figura 18 - Rabicho para aquecimento através do princípio da resistência elétrica	48
Figura 19 - Rabicho em aquecimento e termômetro tipo espeto aferindo a temperatura.....	48
Figura 20 - Biomassa da serragem de jacarandá no momento da pesagem	50
Figura 21 - Biomassa da casca da castanha-do-brasil no momento da secagem na estufa	50
Figura 22 - Biomassas armazenadas para pernoite dentro de dessecador com sílica gel.....	51
Figura 23 - Biomassas distintas em fase de preparação antes de misturá-las	51
Figura 24 - Prensa hidráulica do Laboratório de Ensaios em Cerâmica	52
Figura 25 - Verificação do diâmetro da amostra produzida.....	53
Figura 26 - Verificação da altura da amostra produzida	53
Figura 27 - Máquina universal de ensaios do SENAI/CETEMM.....	55
Figura 28 - Calorímetro de combustão.....	56
Figura 29 - Bomba calorimétrica	56
Figura 30 - Estufa com circulação de ar.....	57
Figura 31 - Cadinhos na tampa do forno.....	58
Figura 32 - Cadinhos no interior do forno	58
Figura 33 - Pré-teste sem pré-aquecimento.....	64
Figura 34 - Pré-teste com pré-aquecimento	64
Figura 35 - Rachaduras em amostra de pré-teste de tratamento com pré-aquecimento	65
Figura 36 - Microfissuras em amostra de pré-teste de tratamento sem pré-aquecimento	65
Figura 37 - Falha nas arestas de amostra do pré-teste com tratamento de 30s de prensagem.....	66
Figura 38 - Amostra oriunda de 100% de casca da castanha-do-brasil.....	67
Figura 39 - Amostra oriunda de 100% de serragem da madeira de jacarandá.....	67
Figura 40 - Amostra de tratamentos sem correção dos teores de umidade das biomassas	68
Figura 41 - Amostras de tratamentos com correção dos teores de umidade das biomassas	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da análise elementar das amostras de Kleinlein (2010).....	21
Tabela 2 - Resultados da análise imediata das amostras de Kleinlein (2010).....	23
Tabela 3 - Poder calorífico residual das principais culturas da região amazônica por amostras.....	24
Tabela 4 - Evolução da produção e resíduos de castanha-do-brasil – 2012 até 2017	29
Tabela 5 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 01	42
Tabela 6 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 02.....	43
Tabela 7 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 03	44
Tabela 8 - Esquema de tratamentos para produção de briquetes.....	49
Tabela 9 - Análise imediata e poder calorífico superior dos briquetes	77

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Composição química da biomassa	18
Equação 2 - Porcentagem residual retido nas peneiras	39
Equação 3 - Expansão longitudinal.....	53
Equação 4 - Volume do briquete.....	54
Equação 5 - Densidade aparente	54
Equação 6 - Densidade energética	56
Equação 7 - Teor de umidade.....	57
Equação 8 - Teor de materiais voláteis	58
Equação 9 - Teor de cinzas	59
Equação 10 - Teor de carbono fixo	60
Equação 11 - Modelo do Delineamento Inteiramente Casualizado	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Esquema da composição dos tratamentos para confecções dos briquetes	61
Gráfico 2 - Porcentagem da casca da castanha-do-brasil retidos nas peneiras	63
Gráfico 3 - Expansão longitudinal em função do tempo (0h-24h e 0h-120h) e dos tratamentos	70
Gráfico 4 - Expansão longitudinal em função do tempo (24h-72h e 72h-120h) e dos tratamentos	70
Gráfico 5 - Valores médios da densidade aparente para 0h e 120h em função dos tratamentos	71
Gráfico 6 - Resistência à compressão diametral dos briquetes	72
Gráfico 7 - Poder calorífico superior com inclusão das testemunhas (T1 e T11)	74
Gráfico 8 - Poder calorífico sem incluir as testemunhas (T1 e T11).....	75
Gráfico 9 - Densidade energética	76
Gráfico 10 - Dispersão do PCS em função do TU	78
Gráfico 11 - Dispersão do PCS em função do TC.....	79
Gráfico 12 - Dispersão do PCS em função do TMV	80
Gráfico 13 - Dispersão do PCS em função do TCF	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Normas nacionais e internacionais utilizadas	61
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Biomassa	17
2.1.1	Caracterização Energética da Biomassa.....	19
2.1.2	Análise Elementar	20
2.1.3	Análise Imediata.....	21
2.1.4	Poder Calorífico	23
2.1.5	Conversão Energética	24
2.2	Castanha-do-brasil: matéria-prima	27
2.3	Briquetes.....	30
2.4	A técnica da briquetagem conforme o uso de resíduos regionais.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Local de execução da pesquisa.....	34
3.2	Coleta dos Resíduos.....	34
3.2.1	Casca da castanha-do-brasil.....	34
3.2.2	Madeira.....	36
3.3	Preparação das Biomassas	37
3.3.1	Trituração	37
3.4	Caracterização granulométrica da castanha-do-brasil.....	39
3.5	Pré-testes	40
3.5.1	Parâmetros principais a considerar para formação de briquetes	40
3.5.2	Testes para definição de parâmetros de formação de briquetes	41
3.5.3	Execução dos pré-testes	44
3.6	Execução da produção dos briquetes.....	50
3.6.1	Preparação das biomassas	50
3.6.2	Produção dos briquetes.....	51
3.7	Caracterização dos briquetes produzidos	52
3.7.1	Expansão Longitudinal.....	52
3.7.2	Densidade Aparente.....	54
3.7.3	Resistência à Compressão Diametral	54
3.7.4	Poder Calorífico Superior	55

3.7.5	Densidade Energética	56
3.8	Caracterização físico-química das biomassas briquetadas	57
3.8.1	Determinação do teor de umidade	57
3.8.2	Determinação do teor de materiais voláteis.....	58
3.8.3	Determinação do teor de cinzas	59
3.8.4	Identificação do teor de carbono fixo.....	60
3.8.5	Normas nacionais e internacionais	60
3.9	Delineamento experimental.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Tratamento mecânico da biomassa.....	63
4.1.1	Pré-testes sem correção dos teores de umidade	64
4.1.2	Pré-testes com correção dos teores de umidade.....	68
4.2	Caracterização Mecânica dos briquetes	69
4.2.1	Expansão longitudinal	69
4.2.2	Densidade aparente	71
4.2.3	Resistência à compressão diametral	72
4.2.4	Poder Colorífico Superior	74
4.2.5	Densidade Energética	76
4.3	Caracterização físico-química dos briquetes	77
5	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	APÊNDICE A - Identificação dos teores de umidade das biomassas	89
	APÊNDICE B - Correção dos teores de umidade das biomassas	90
	APÊNDICE C - Esquema de tratamentos para produção de briquetes.....	91
	APÊNDICE D - Análise de variância para a variável resposta densidade aparente, considerando composição das biomassas (tratamentos).....	92
	APÊNDICE E - Análise de variância para a variável resposta carga máxima, considerando composição das biomassas (tratamentos).....	92
	APÊNDICE F - Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior, considerando composição das biomassas (tratamentos).....	92
	APÊNDICE G - Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior, considerando composição das biomassas (tratamentos), sem as testemunhas (T1 e T11)	93
	APÊNDICE H - Análise de variância para a variável resposta densidade energética, considerando composição das biomassas (tratamentos).....	93

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o sistema energético internacional é fortemente dependente de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), cerca de 90% da matriz energética mundial se originam dessas fontes que no longo prazo tem efeitos colaterais degenerativos tanto do ponto de vista econômico, como ambiental e social (GUERRA e NOGUEIRA, 2008). Zhu, et al. (2011) destaca que os combustíveis fósseis, normalmente associados a emissões de CO₂, e sua concentração na atmosfera, contribuem para o aquecimento global, mas também pela escassez desse tipo de fonte de energia.

De acordo com o Relatório da *International Energy Agency* (IEA), publicado em 2016, estima-se que até 2035 haja um aumento de 53% do consumo de energia no mundo e as consequências do aumento do uso de combustíveis fósseis já é uma inquietação perene. No Brasil, somente em 2018 a produção e o consumo de energia no Brasil foram cerca de 288 e 255 Mtep (tep é tonelada equivalente de petróleo), respectivamente, e, esses dados representaram um decréscimo de 1,7 na produção e 1% no consumo, em relação ao ano anterior (BEN, 2019).

O alto consumo de energia tem chamado atenção do futuro da humanidade tanto no que diz respeito à consciência ambiental, quanto sobre o esgotamento de recursos não renováveis, e vêm incentivando a busca por fontes alternativas de energia no mundo e naturalmente no Brasil (ANEEL, 2005).

A participação de fontes renováveis na matriz energética no mundo corresponde a 13,7% em 2015, enquanto no Brasil correspondeu a 42,9% em 2016, seguidos de 43% em 2017 e 45,3% em 2018, respectivamente. Nota-se que esta participação na matriz brasileira é uma das mais elevadas do mundo se mantendo ao longo dos anos e que cerca de 30% das fontes renováveis existentes são provenientes de biomassa (BEN, 2019). O Brasil é um grande produtor florestal e agrícola devido a sua extensão territorial e os recursos que nele habita, com potencial de matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia.

No entanto, sabe-se que a geração de energia a partir de resíduos de biomassa ainda não está consolidada, principalmente quanto à sua eficiência energética, obtenção e transporte. Isso porque os resíduos *in natura* apresentam algumas características que podem restringir seu uso direto como combustível, por exemplo: i) baixa densidade, ii) alto teor de umidade, iii) granulometria irregular, iv) baixo teor de carbono fixo, v) baixo poder calorífico, entre outros (PESSOA FILHO, 2013).

Uma das formas de utilização dessas biomassas é através da briquetagem, definida como sendo uma técnica surgida em 1848 que possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e forma variados a partir de frações finais de qualquer tipo de carvão, por meio da pressão exercida sobre esse material (CARVALHO e BRINCK, 2010).

Conforme Rendeiro (2008), esta técnica é uma forma eficiente de concentrar energia disponível na biomassa, levando em consideração a densidade a granel e o poder calorífico obtido após o processo, e o resultado da compactação de resíduos de base lignocelulósico tem de 2 a 5 vezes mais densidade energética do que qualquer espécie de lenha. Nesse sentido, muitas pesquisas vêm se debruçando ao estudo desta técnica, sobretudo pela vantagem da redução do volume físico do material, o alto valor de capacidade calorífica por volume, das facilidades de transporte, do manuseio, da estocagem e da redução de área para estoque (SOARES et al., 2015).

No que tange as pesquisas que investigam o uso da técnica de briquetagem de biomassa, veja-se, Protásio (2014), Esteves, Abud e Barcellos (2015) e Pimenta et al., (2015) avaliaram o potencial energético de biomassas encontrados na Região Nordeste; Gonçalves, Sartori e Leão (2009), Felfli et al. (2011), Paula et al. (2011) e Soares et al. (2015) analisam o uso de resíduos facilmente obtidos na Região Sudeste; bem como Protásio et al. (2011) e Sellin et al. (2013) ao avaliar os resíduos na Região Sul do Brasil; e Protásio et al. (2011) e Protásio (2014) com biomassa da Região Norte; e, Vale et al. (2007) ao avaliar casca de grãos de café e serragem na Região Centro Oeste.

Neste ínterim, o aprofundamento dos estudos de biomassa como fonte de energia tornou-se imperativa, principalmente como alternativa mais econômica e sustentável. No caso do estado do Acre, identifica-se particularidades, por exemplo, extensas áreas cobertas por florestas tropicais primárias; solos de baixa fertilidade; extrativismo florestal; e, indústria de base florestal (ARAÚJO, 2003), que denotam lacunas a serem exploradas nestes tipos de pesquisas.

Araujo (2003) incorpora ainda o baixo potencial para a produção de energia a partir de recursos hídricos no Acre, como também em grande parte da Região Amazônica, sobretudo em virtude de sua topografia plana, fazendo com que a energia gerada e consumida no estado provenha de usinas termoelétricas movidas a óleo diesel. Além dos altos custos envolvidos, ainda se deve considerar o impacto ambiental gerado pelo uso dessa fonte não renovável.

Portanto, uma agenda de pesquisa em volta do aproveitamento das matérias primas potencialmente encontradas nas economias locais, tem sua relevância em contextos com tantas peculiaridades como no estado do Acre.

Neste escopo, identificou-se extensas áreas de castanheiras nativas, onde há uma grande produção e exportação da castanha-do-brasil. De acordo com o anuário ACRE (2017), de 2013 a 2015, o Acre ocupou a posição de maior produtor e exportador do país de castanha fresca, seca e com casca.

Além do mais, a maior parte do beneficiamento da castanha-do-brasil efetivadas no Acre, são realizadas pela Cooperativa Central de Comercialização Extrativista do Acre – COOPERACRE, com sede em Rio Branco (AC). Em visitas *in loco*, foi possível identificar a subutilização da casca da castanha-do-brasil que muitas vezes é aglomerada para outras finalidades, como por exemplo, insumo de fornalhas em olarias ou mesmo para paisagismo, e tal fato já justificaria a realização deste trabalho.

Outro produto com ênfase na economia local é a madeira, sendo que as indústrias existentes do setor, em específico as serrarias, tipificam-se pelo baixo nível tecnológico, em que a ineficiência do processo produtivo gera grandes desperdícios de madeira, resultando em um elevado volume de resíduos, sendo seu aproveitamento parcial (ARAÚJO, 2003).

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o potencial energético, quando da liberação de calor a partir da combustão de resíduos de biomassa da casca da castanha-do-brasil misturados a serragem da madeira de jacarandá, estes briquetados em modelos experimentais para que, em momento futuro, estas análises possam contribuir de forma significativa às usinas em seus processos de geração e/ou cogeração de energia, tornando as biomassas estudadas como possíveis substitutas às fontes de energia atuais, tal como a própria madeira.

Especificamente, busca-se produzir briquetes a partir de duas biomassas distintas; analisá-los sob o ponto de vista de sua expansão longitudinal; realizar ensaios de compressão diametral; mensurar o poder de liberação de energia calorífica, bem como realizar a análise imediata da biomassa que compõe as amostras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biomassa

A relação entre energia e meio ambiente está cada vez mais entrelaçada, isto porque aumenta o número de estudos e pesquisas voltadas a majorar a diversidade da matriz energética para suprir a demanda mundial de energia e minimizar a dependência dos combustíveis fósseis (PESSOA FILHO, 2013). Preocupa-se com o meio ambiente e busca-se preservá-lo por meio do equilíbrio na utilização dessas fontes de energia. Dentro desse contexto, surge a bioenergia produzida pela biomassa como recurso que tem despertado cada vez mais interesse da comunidade científica.

Por definição, biomassa é qualquer matéria de origem vegetal ou animal que dispõe de bioenergia e que pode ser processada para fornecer formas bioenergéticas mais elaboradas e adequadas para seu uso final (ANEEL, 2005). Do ponto de vista energético, o conceito da biomassa seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica que pode ser utilizado para produção de energia (VASSILEV et al., 2012).

A biomassa sempre esteve presente como fonte de energia na história da sociedade, inicialmente na forma de lenha ou carvão e, a partir de meados do século XX, outras formas de utilização ganharam ênfase (CORTEZ, 2008). Pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, vegetais lenhosos (ex. madeira e seus resíduos), resíduos orgânicos (ex. agrícolas, urbanos e industriais), bem como biomassas biofluidos como os óleos vegetais (ex. mamona e soja). Vassilev et al. (2012) elenca como principais tipos de biomassa:

- i. Biomassa lenhosa: coníferas ou de folhas caducas, angiospermas ou gimnospermas, caule das plantas, galhos, folhas, casca, cavacos, pellets, briquetes, serraria, serragem e outras espécies de madeira.
- ii. Biomassa de espécies herbáceas e agrícolas;
- iii. Gramíneas e flores: painço amarelo, alcachofra, cana, bambu, arundo, alfafa;
- iv. Palhas: cevada, linho, menta, arroz, gergelim, girassol, feijão, milho, aveia, centeio, girassol, trigo;
- v. Outros resíduos: frutas, conchas, cascas, caroços, grãos, sementes, espigas de milho, bagaços, forragem, polpas;
- vi. Biomassa aquática: alga;
- vii. Biomassa animal: cama de frango, carne de ossos, ossos.

viii. Biomassa contaminada e biomassa de resíduos industriais: resíduos sólidos urbanos, madeira de demolição, resíduos derivados de combustível, lodo de esgoto, resíduos hospitalares, papéis, aglomerados, caixas de madeira.

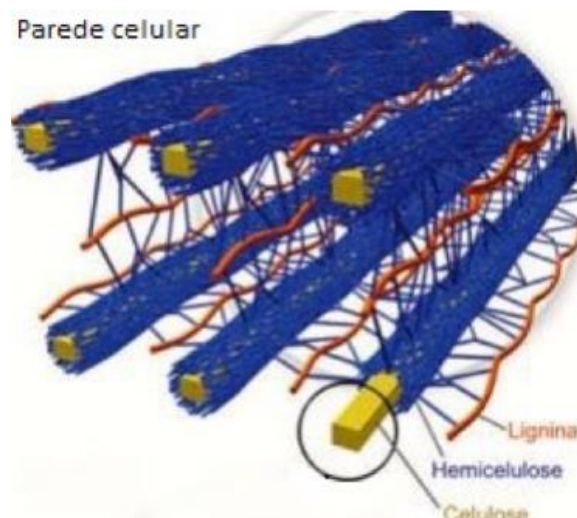
Nessa nuance, ressalta-se que a biomassa vegetal é obtida de vegetação de porte arbóreo de origem nativa ou plantada pelo homem, cujo principal componente é a estrutura lignocelulósica; já os resíduos vegetais significam toda biomassa rejeitada de uma exploração florestal (CIAMPI, 1992). Para resíduos florestais, a sua composição depende do vegetal de origem e, no caso de biomassas agroflorestais residuais, da região, idade e período de coleta do material.

Assim como o petróleo, a biomassa vegetal é um hidrocarboneto, contudo, difere dos combustíveis fósseis por possuir em sua composição química, átomos de oxigênio, exigindo menos oxigênio do ar e, conseqüentemente, sendo menos poluente. Empiricamente, sua composição, de acordo com Nogueira e Rendeiro (2008) é denotada pela Equação (1):

$$C_{3,3-4,9}H_{5,1-7,2}O_{2,0-3,1} \quad (1)$$

Composição esta, estruturada em três famílias de compostos químicos: hemicelulose, celulose e lignina (Figura 1), além de outras menores e a concentração de cada componente varia de acordo com cada espécie (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008; RENDEIRO, 2008; SANTOS, 2012).

Figura 1 - Estrutura básica da biomassa vegetal da casca da castanha-do-brasil



Fonte: Santos et al. (2012)

Alguns exemplos de biomassa com o uso destinado a combustível são expostos a seguir (Figura 2):

Figura 2 - Exemplos de biomassas utilizadas como fonte de energia



Fonte: LIPPEL, 2012a *apud* Paulo Filho, 2013.

O uso da biomassa como fonte de energia renovável se destaca pelas facilidades de armazenamento, conversão, transporte e pela possibilidade de aumentar a sua densidade energética. Sob o conceito sustentável, a biomassa é considerada uma fonte promissora, principalmente em regiões que apresentam abundância de recursos naturais (ANEEL, 2016), no entanto, ainda existe uma gama de resíduos sólidos inexplorados com problemas de subutilização pelas indústrias (SOARES et al., 2015).

2.1.1 Caracterização Energética da Biomassa

De acordo com Rendeiro (2008), as propriedades da biomassa têm influência direta na escolha da tecnologia de conversão devido à sua especificidade no que diz respeito ao conteúdo

de matéria seca, tamanho, forma e consistência, e também nas dificuldades que podem surgir durante a conversão energética.

Estas propriedades são determinadas por meio da caracterização energética por meio de uma gama de testes disponíveis, mas na investigação de um novo material os iniciais e determinantes ensaios a serem realizados são: análise imediata, análise elementar e poder calorífico (PESSOA FILHO, 2013).

As características desejáveis, ou seja, que tornam a biomassa um bom combustível, são: a sua facilidade de secagem, elevado poder calorífico, baixa temperatura de ignição, elevado teor de voláteis e a elevada taxa de combustão. Por outro lado, existem características que dificultam a combustão, por exemplo, umidade, granulometria, densidade e heterogeneidade dos materiais (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

2.1.2 Análise Elementar

Esta análise consiste na determinação dos percentuais mássicos dos elementos de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre contidos na biomassa. Os teores de C, H, O são semelhante nos diferentes tipos de biomassa, já os teores de N apresentam diferenças significativas (VASSILEV et al., 2012).

De acordo com Ciampi (1992), as técnicas utilizadas para essas determinações são ensaios que promovem a destruição oxidativa da amostra e posterior absorção dos produtos em absorventes adequados. O conhecimento da composição química do combustível permite quantificar a relação ar-combustível e prever composição dos gases na saída do processo de combustão ou gaseificação (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

Os teores obtidos pela análise elementar também são determinantes para o cálculo do poder calorífico dos combustíveis, porque quanto mais baixos os valores da relação oxigênio/carbono (O/C) e mais altos os resultados para a relação hidrogênio/carbono (H/C), mais altos serão os valores de poder calorífico e, quanto maior ele for, mais energia disponível à conversão o combustível terá (CORTEZ, 2008; NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008 e VASSILEV et al., 2012).

Dentro desse contexto, Kleinlein (2010) determinou a composição elementar (base seca) de 20 biomassas amazônicas através de um analisador CHNS/O (Perkin Elmer, Series II 2400, EUA), com amostras retidas na peneira de *mesh* 80 e massa de 1,5 mg a 3,0 mg. A Tabela 1 apresenta tais resultados para 5 biomassas selecionadas:

Tabela 1 - Resultados da análise elementar das amostras de Kleinlein (2010)

Biomassa		C	H	N	S	O*
Madeira	Jatobá	50,17	5,77	4,97	0,67	38,42
	Andiroba	48,93	6,11	5,03	0,52	39,41
	Ipê	52,23	6,08	5,47	0,69	35,52
	Açaí	46,17	6,01	4,33	0,13	43,37
Cascas e caroços	Castanha-do-pará	49,93	5,23	4,98	0,78	39,08
	Tucumã	51,35	6,5	5,18	0,11	36,08
	Casca de côco	51,22	5,71	5,05	0	38,17

Fonte: Kleinlein (2010)

* Os valores de oxigênio foram obtidos por diferença.

Importa aqui enfatizar que a casca da castanha-do-pará (castanha-do-brasil) apresentou a combinação: menor relação O/C e a maior relação H/C, o que indicaria *a priori* valores mais altos de poder calorífico dentre as biomassas estudadas.

2.1.3 Análise Imediata

A análise imediata consiste na determinação dos teores de umidade (TU), materiais voláteis (TMV), cinzas (TCZ) e carbono fixo (TCF). De acordo com Rendeiro e Nogueira (2008), a partir de 2008 o Brasil passou a ter normas para a realização de análise imediata em biomassa vegetal. Os ensaios seguem as normas brasileiras (ABNT) para carvão mineral ou seguem a norma ASTM para madeira.

Teor de Umidade (TU) caracteriza a proporção de água na forma livre presente no mesmo, ou seja, a impureza que reduz a energia térmica (CIAMPI, 1992). Um teor de umidade alto significa ter uma massa maior de água para ser vaporizada, o que significa maior consumo de energia e redução da temperatura do processo, além de redução da razão de equivalência combustível/ar e da frente de chama (VIRMOND et al., 2012).

O valor do teor de umidade diminui pela seguinte ordem de espécies de biomassa: madeira e biomassa lenhosa > herbáceas e erva agrícola > herbáceas e resíduos agrícolas > herbáceas e biomassa agrícola > biomassa contaminada > biomassa aquática (VASSILEV et al., 2010).

Teor de Cinzas (TC) é o teste primário para determinar o potencial de uso e o valor econômico de um combustível. Cinzas é o resíduo inorgânico restante depois de o combustível ser queimado em condições específicas (CIAMPI, 1992). Protário et al., (2012) alerta que altas concentrações de cinzas podem diminuir o poder calorífico e causar perda de energia, portanto,

recomenda-se menor concentração de compostos que agregam elementos que não são relevantes na reação da combustão.

O teor de cinzas da biomassa diminui geralmente pela seguinte ordem: biomassa aquática > biomassa contaminada > herbáceas e biomassa agrícola > herbáceas e resíduos agrícolas > herbáceas e erva agrícola > madeira e biomassa lenhosa. Para a madeira e biomassa lenhosa, o teor de cinzas diminui pela seguinte ordem: folhas > casca > troncos (VASSILEV et al., 2010).

Teor de Materiais Voláteis (TMV) é a fração do material sob a forma de gases e vapores, quando o material é aquecido em condições específicas (CIAMPI, 1992). Este teor influencia a temperatura de ignição e a velocidade de reação, sendo quanto maior o teor mais rápido o consumo da biomassa nos processos de conversão, já o carbono fixo é consumido mais lentamente (VIRMOND et al., 2012).

O teor de voláteis nas diferentes espécies de biomassa diminui geralmente pela seguinte ordem: herbáceas e erva agrícola > madeira e biomassa lenhosa > herbáceas e biomassa agrícola > herbáceas e resíduos agrícolas > biomassa contaminada > biomassa aquática. O teor extremamente elevado de material volátil é característico de algumas madeiras e biomassas lenhosas, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de papel (VASSILEV et al., 2010).

Teor de Carbono Fixo (TCF) é obtido de forma indireta, pois é um valor calculado pela subtração do somatório dos teores de materiais voláteis e cinzas. De acordo com Ciampi (1992), pode-se pensar no carbono fixo como o material sólido, deixado após a liberação dos materiais voláteis, que é queimado como combustível. O teor de carbono fixo é um parâmetro importante para dimensionar gaseificadores, porque a conversão deste componente em gases determina a velocidade de gaseificação e seu rendimento (BASU, 2010).

O conteúdo de carbono fixo da biomassa varia entre 1 a 38%, e geralmente diminui pela seguinte ordem: herbáceas e resíduos agrícolas > herbáceas e biomassa agrícola > madeira e biomassa lenhosa > herbáceas e erva agrícola > biomassa aquática > biomassa contaminada. Teores elevados de carbono fixo são característicos de algumas cascas de madeira, de resíduos herbáceos e de biomassa agrícola (VASSILEV et al., 2010).

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por Kleinlein (2010) com relação a análise imediata das 20 Biomassas amazônicas.

Alto teor de umidade e de cinzas contribuem para a diminuição do Poder Calorífico Superior (PCS), enquanto que os altos teores de voláteis e carbono fixo contribuem para o aumento do PCS. De acordo com Kleinlein (2010) a biomassa com maior umidade é a da casca da castanha-do-pará (castanha-do-brasil) com 14,48% e este valor provavelmente decorre do

processamento de extração da amêndoa. Quanto ao teor de cinzas, a castanha-do-pará (castanha-do-brasil) também obteve o maior percentual o que pode ser devido ao método de coleta e transporte.

Tabela 2 - Resultados da análise imediata das amostras de Kleinlein (2010)

Biomassa		TU	TCF	TMV	TC
Madeira	Jatobá	9,4	20,57	79,06	0,37
	Andiroba	9,11	15,92	83,42	0,66
	Ipê	8,95	8,44	91,34	0,21
Casca e caroços	Açaí	9,32	19,91	78,88	1,21
	Castanha-do-pará*	14,48	13,55	66,68	19,77
	Tucumã	6,08	17,02	78,56	4,42
	Casca de côco	10,53	20,41	49,75	0,14

Fonte: Kleinlein (2010)

* Nascimento (2012) para ouriço da castanha-do-brasil encontrou TMV = 86,27, TC= 13,36.

Quanto aos teores de carbono fixo e voláteis (diminuem o PCS), a casca e caroço da castanha-do-brasil também apresentaram menores valores, o que significa menos contribuição para o aumento do PCS. Nestes casos, o uso da casca e caroços da castanha-do-brasil deve ser realizado um pré-tratamento para seu uso como energia (KLEINLEIN, 2010).

2.1.4 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como o conteúdo energético libertado durante a conversão energética de um combustível, e apresenta-se em termos do conteúdo de energia por unidade de massa expressa por joule por grama (J/g) ou caloria por grama (cal/g) (CIAMPI, 1992).

Biomassas com poder calorífico semelhante aos combustíveis fósseis são misturas heterogêneas de complexas matérias orgânicas (componentes estruturais e minerais orgânicos) e, em menor composição, matéria inorgânica (minerais, mineralóides e materiais amorfos), contendo várias fases sólidas e fluidas intimamente associadas a diferentes conteúdos e de diversas origens (VASSILEV, BAXTER e VASSILEVA, 2013).

Para se obter o valor, seu cálculo é separado em dois valores: superior (PCS) e inferior (PCI). O poder calorífico superior é a quantidade de energia na forma liberada pela combustão completa de uma unidade de massa de combustível seco, sendo a água proveniente da combustão do hidrogênio de composição condensada ao estado líquido e o calor que é derivado

desta condensação recuperado. O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água, ou ainda, o valor obtido quando se considera a água no estado de vapor ao final da combustão (CIAMPI, 1992; QUIRINO et al., 2004).

O PCS¹ estabelece o potencial energético teórico contido no combustível e é obtido experimentalmente por meio de um equipamento chamado calorímetro, instrumento destinado a medir as transformações energéticas onde há alterações de temperatura e/ou transferência de calor no ambiente. Já o PCI ele é obtido deduzindo o PCS à quantidade de energia em forma de calor necessária para vaporizar a água presente na amostra, mais a água formada da combustão do hidrogênio contidos na amostra (CIAMPI, 1992).

Sabe-se que PC é uma das principais propriedades investigadas para a utilização de uma biomassa como combustível, ou a quantidade de calor que o provável combustível libere através da queima de uma unidade de massa. Na Tabela 3 é apresentado o poder calorífico dos principais resíduos analisados por Kleinlein (2010):

Tabela 3 - Poder calorífico residual das principais culturas da região amazônica por amostras

Biomassa		PCS	PCI
Madeira	Jatobá	20,35	17,05
	Andiroba	19,78	16,53
	Ipê	20,64	17,35
Casca e caroços	Açaí	19,26	17,23
	Castanha-do-pará*	20,51	17,18
	Tucumã	22,22	20,72
	Casca de côco	20,86	18,4

Fonte: Kleinlein (2010)

Valores semelhantes ao encontrado em Nascimento (2012), PCS = 20,02 MJ/Kg e PCI=16,75 MJ/Kg, para o ouriço da castanha-do-brasil.

2.1.5 Conversão Energética

Muito embora se reconheça as disponibilidades bioenergéticas da biomassa, ela *in natura* como combustível possui baixa eficiência energética, pois trata de um combustível heterogêneo de baixa qualidade, devido algumas características gerais que dificultam o seu uso

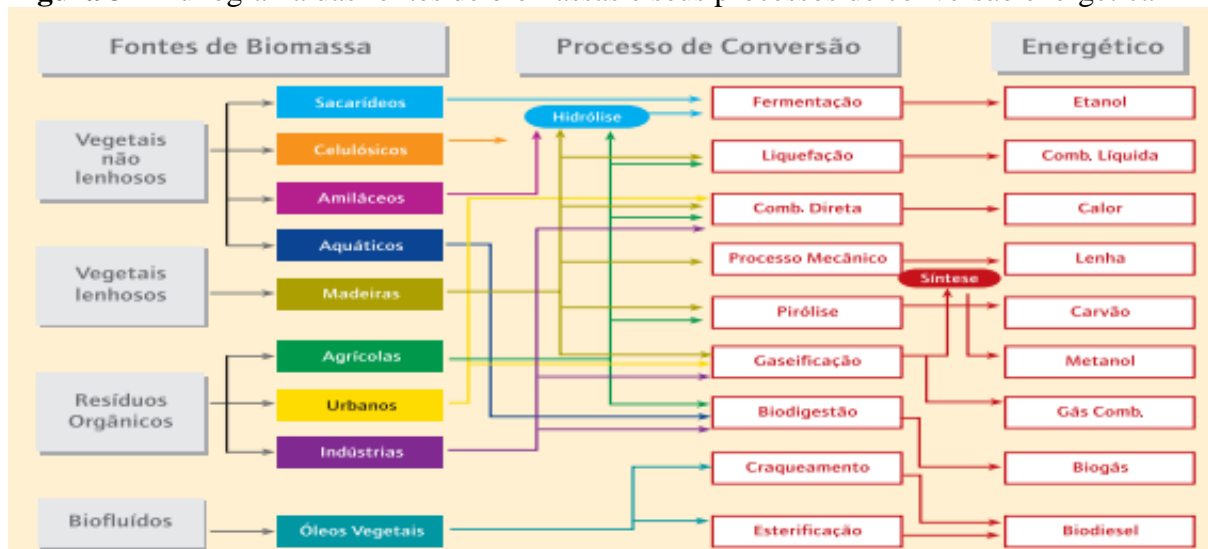
1 Normalmente, em publicações, o PCS é citado como poder calorífico (PC), exceto quando especificado em texto que se trata de PCI.

direto, por exemplo, alto teor de umidade, baixo poder calorífico, granulometria irregular e baixo teor de carbono fixo associado ao alto teor de matérias voláteis (RODRIGUES, 2009; GONÇALVES, 2010; PAULO FILHO, 2013).

Para o uso dessa matéria-prima é necessário a utilização de processos industriais com o intuito de melhorar e padronizar as propriedades energéticas. Nogueira (2008) destaca que a biomassa encontrada na natureza para ser transformada em combustível, seja por meio da combustão direta ou pela gaseificação, necessita de tratamento termomecânico para seu uso de modo eficaz.

A Figura 3 apresenta as fontes de energia e seus processos de conversão energética. As fontes de biomassa são separadas em três principais grupos: vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos, e resíduos orgânicos, que além de apresentar as principais fontes, apresenta também os principais processos de conversão da biomassa em energéticos.

Figura 3 - Fluxograma das fontes de biomassa e seus processos de conversão energética



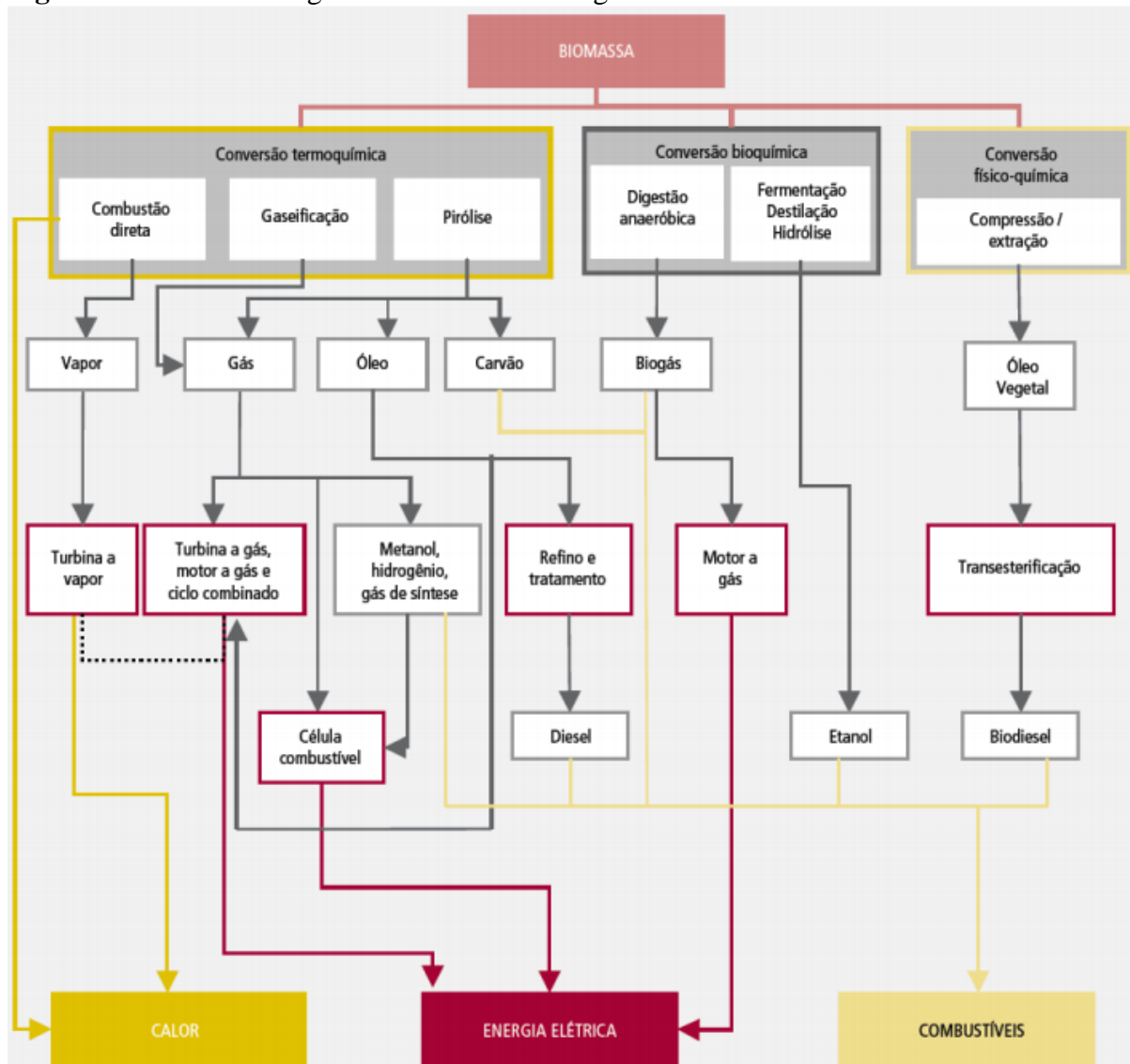
Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN (1982) adaptado por CENBIO (2010)

Existem diversos processos de conversão de biomassa: combustão, gaseificação, liquefação, entre outros. Nestes, vários parâmetros podem ser adotados para a otimização dos processos, podendo variar: temperatura, taxa de aquecimento, atmosfera, tipo, forma, vazão e sentido de combustíveis, e reatores (NOGUEIRA, 2008).

Dependendo da tecnologia utilizada para o aproveitamento da biomassa, ela pode ser transformada em calor, eletricidade e combustíveis. Existem métodos para a classificação da energia da biomassa que consideram as rotas tecnológicas a serem adotadas para sua utilização ou seu nível de desenvolvimento tecnológico (NOGUEIRA e LORA, 2003 *apud* PESSOA FILHO, 2009).

Com o objetivo de se aproveitar a energia presente nas diversas biomassas, foram desenvolvidos os mais variados processos de conversão, que são classificados, segundo a natureza de processamento primário: termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos, conforme Figura 4:

Figura 4 - Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa



Fonte: (TOLMASQUIM, 2007)

A conversão termoquímica ocorre quando a energia “quimicamente armazenada” na biomassa é convertida em calor por meio da combustão. Uma larga variedade de tecnologias capazes de converter a biomassa em energia está disponível através da via termoquímica, e sua diferenciação está associada à quantidade de oxigênio que é fornecido ao processo, tendo como referência o valor do coeficiente estequiométrico (número que antecede cada fórmula química), resultando nas vias de combustão direta, pirólise e gaseificação (BRASIL, 2007).

A conversão bioquímica consiste na utilização de processos biológicos e químicos, que incluem a digestão anaeróbica, a fermentação/destilação e a hidrólise. Já a via de conversão físico-química é aquela em que utiliza-se técnicas para disponibilização de lipídios através da compressão e esmagamento de matérias vegetais diversas e extração dos óleos vegetais, que posteriormente, sofrerão transformações químicas (BRASIL, 2007).

No Brasil, tecnologias para utilizar a biomassa de forma sustentável já vêm sendo desenvolvidas e aplicadas há um longo tempo, e algumas já vêm apresentando excelentes resultados, utilizando as biomassas: lenha, carvão vegetal, óleos vegetais, resíduos vegetais, casca de arroz, cana de açúcar, dentre outros (CORTEZ, 2008; SOARES et al., 2015). Atualmente as tecnologias mais utilizadas e estudadas na conversão da biomassa em outros tipos de energia são a combustão direta.

Importa ressaltar que diferentes biomassas são utilizadas para a produção de energia conforme a região e/ou local de produção e aqui é importante observar que o Brasil possui uma das maiores diversidades de biomassa do planeta, por este motivo possui vantagens comparativas para liderar a agricultura de energia, com ênfase das biomassas regionais.

2.2 Castanha-do-brasil: matéria-prima

A castanheira, uma árvore nativa da região Amazônica, apresenta divisão botânica, a partir da seguinte classificação, é *Angiosperma* da classe *Dicotiledônea*, da ordem *Myrtiflorae*, pertencente à família das *Lecthidaceae*, gênero *Bertholletia*, espécie *excelsea*. Originária do Brasil, a árvore de castanha-do-brasil foi descrita em 1808, pelos pesquisadores Humboldt, Bompland e Kunth, e recebeu a denominação botânica de árvore majestosa da Amazônia (ENRÍQUEZ, SILVA E CABRAL, 2003 *apud* SANTOS, 2012).

Conhecida como castanha-do-pará em muitas regiões do Brasil, em 18 de setembro de 1961 foi publicado o Decreto-Lei nº 51.209, denominou como castanha-do-brasil, e também utilizada aqui neste trabalho. Comumente encontrada numa vasta região da floresta amazônica, sendo o país um dos maiores produtores mundiais do fruto, com uma safra média de 35 mil toneladas (SANTOS, 2012).

É uma espécie arbórea de grande porte, podendo medir de 50 a 60m de altura e é considerada uma espécie nativa da Amazônia. É uma árvore de tronco escuro, liso com ramos apenas próximos da extremidade; as flores são brancas e grandes; o fruto é globoso (ouriço), chegando a pesar 1,5 kg e abriga 12 a 22 sementes, que são as castanhas (CAVALCANTE, 1991).

Os principais resíduos provenientes do cultivo e do processamento da castanha-do-brasil são o ouriço (fruto da castanheira) e as cascas. Estima-se que para cada tonelada de castanha limpa, geram-se 1,4 toneladas de resíduos (Ferreira, 2009 *apud* Dias et. al, 2012). Conforme sequência de imagens abaixo (Figura 5), podemos observar uma árvore da castanheira (*Bertholletia excelsa*) em **A**; seu fruto, vulgo ouriço, em **B**; suas sementes em **C**; as amêndoas comestíveis em **D**; e as cascas da semente, que constituem grande parte dos resíduos do processo de extração das amêndoas, em **E**.

Figura 5 - Estrutura da Castanheira (*Bertholletia excelsa*) e seu fruto



Fonte: Internet.

Além do valor nutricional das amêndoas, há ainda a possibilidade de obtenção de derivados, por exemplo, o leite da castanha e o óleo. O aproveitamento das cascas da semente no processo de extração das amêndoas constitui uma oportunidade nova de geração de renda para as famílias que vivem desta atividade.

A Tabela 4 apresenta a evolução da produção da castanha para os três principais estados produtores obtidos com dados da Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura do IBGE correspondente aos anos de 2012-2017.

Somente em 2017, foram produzidas 26.191 toneladas de castanha, com uma estimativa de resíduos de 36.667 toneladas. Verifica-se que de 2012 a 2015, o Estado do Acre liderou a produção total no país e de 2016-2017 ficou em segundo lugar, perdendo apenas para o Amazonas. Estima-se, no acumulado de 2012-2017, um total de 96.517 toneladas de resíduos

da castanha-do-brasil somente produzido pelo Estado do Acre. Estes resíduos (seja ele o ouriço ou a casca) podem servir como fonte de renda para a economia local (NOGUEIRA et al., 2014).

Tabela 4 - Evolução da produção e resíduos de castanha-do-brasil – 2012 até 2017

	Extração Vegetal (t)						Resíduos Gerados (t)
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2017 ^a
Brasil	38.805	38.300	37.499	40.643	34.664	26.191	36.667
Acre	14.088	13.599	13.684	14.038	8.742	4.790	6.706
%	(36,3%) ^b	(35,5%) ^b	(36,5%) ^b	(34,5%) ^b	(25,2%) ^b	(18,3%) ^b	
Amazonas	10.478	11.785	12.901	13.983	14.945	12.786	17.900
%	(27,0%)	(30,8%)	(34,4%)	(34,4%)	(43,1%)	(48,8%)	
Pará	10.449	9.023	6.903	7.697	6.866	4.186	5.860
%	(26,9%)	(23,6%)	(18,4%)	(18,9%)	(19,8%)	(16,0%)	

Fonte: (IBGE, 2017)

a. Estimativa utilizada para calcular os resíduos gerados baseado em Ferreira (2009) *apud* Dias et. al. (2012).

b. Participação na produção total do país.

A produção da castanha possui importante papel social em grande parte da região Amazônica, nos Estados do Acre, Amazonas, Pará, Roraima, Rondônia, bem como em boa parte do Maranhão Tocantins e do Mato Grosso (ARAUJO, 2003). Mais especificamente, a espécie ocorre no Acre (próximos aos rios Amazonas, Madeira, Negro, Purus e afluentes), no Pará (próximo aos rios Trombetas, Tapajós, Xingu, Tocantins e afluentes), Amazonas (próximo aos rios Amazonas, Madeira, Negro, Purus e afluentes) e Mato Grosso (próximo ao rio Araguaia).

Quirino et al., (2004) avaliaram o poder calorífico superior de 258 espécies de madeira e de 18 tipos de resíduos lignocelulósicos e encontraram um valor médio de poder calorífico de 19.721 kJ/kg para espécies florestais e de 18.941 kJ/kg para resíduos lignocelulósicos. No estudo realizado por Oliveira e Lobo (2002) sobre o potencial energético do ouriço da castanha-do-brasil, chegaram no poder calorífico superior (PCS) de 19.769 kJ/kg, evidenciando o potencial destes resíduos para uso como fonte de energia (NOGUEIRA et al., 2014).

Utilizando o ouriço, Nascimento (2012) com o objetivo de avaliar o seu potencial energético em processos de termoconversão, concluiu PCS de 20,20 MJ/kg. Na mesma linha, Farias (2012) realizou estudo sobre a caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético e estimou PCS do ouriço da castanha-do-brasil no intervalo entre 18,87 e 19,15 MJ/kg, a depender da granulometria utilizada no experimento.

Resultados semelhantes também são encontrados para a casca da castanha-do-brasil. Por exemplo, Kleinlein (2010) caracterizou energeticamente 20 espécies diferentes de madeiras, cascas e sementes de bambus da região Amazônica, dentre elas a casca da castanha-do-brasil e concluiu em um poder calorífico superior de 20,51 MJ/kg. Valor este que corrobora para o valor de PCS de 20,28 MJ/kg apresentado por Nogueira e Rendeiro (2008). Mais recentemente, Pereira, Nobre e Bianchi, (2019) ao analisar o poder calorífico da casca da castanha-do-brasil coletados em Castanhal-PA concluiu em 7092,5 kcal/kg.

Em síntese, estudos sobre o uso dos resíduos da castanha-do-brasil como insumo energético vem ratificando sua potencialidade, sobretudo quanto seu uso passa por processos de tratamento e conversão energético adequados.

2.3 Briquetes

Biomassa *in natura* normalmente apresentam baixa densidade e elevada friabilidade, bem como outras características inconvenientes para obtenção de bioenergia, por exemplo falta de uniformidade granulométrica e rápida combustão (DIAS et al., 2012).

Em um estudo recente, Carmona et al. (2017) ao avaliar o potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos produzidos a partir da extração comercial das castanhas, concluíram que a biomassa residual apresentou baixo poder calorífico e alto teor de umidade. Os autores sugeriram que a utilização desses materiais deveria passar por um processo termomecânico.

Dentre as diversas soluções para o aproveitamento de biomassa, o processo de briquetagem surge como uma solução economicamente viável para o uso do resíduo como fonte de energia transformando-os em algo útil (RENDEIRO, 2008).

Briquetagem nada mais é do que pequenas partículas de material sólido que são prensadas para formar blocos de forma definida, dos quais, utiliza-se de materiais diversos, subprodutos do beneficiamento industrial convertendo-os em produtos de maior valor comercial (RENDEIRO, 2008).

Em outras palavras, a briquetagem é uma técnica resultante da aplicação de pressão, em uma mistura de pequenas partículas de material sólido carbonizado com um aglutinante, dentro dos moldes matrizes, através de orifícios entre cilindros rotativos ou outros artifícios semelhantes, com o objetivo de formar blocos compactos de forma definida (DIAS et al., 2012).

Quirino e Brito (1991) afirmam que a briquetagem é uma forma eficiente para concentrar energia disponível da biomassa. Conforme o autor, 1,00m³ de briquetes contém

pelos menos 5 vezes mais energia do que 1,00m³ de resíduos, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico médio do material.

Para uso eficaz da bioenergia das biomassas e seus resíduos é desejável uma alta densidade energética, isto é, uma maior quantidade de energia por unidade do volume (PROTÁSIO et al., 2012), portanto, briquetagem transforma resíduos de baixa densidade em produto densificado e com alto potencial energético (QUIRINO et al., 2004).

A primeira patente relacionada à briquetagem foi concedida a Willian Easby, em 1848. O processo desenvolvido possibilitava a formação de aglomerados sólidos de tamanho e formas variados. No Brasil, uma das primeiras iniciativas de utilização industrial do processo de briquetagem ocorreu no início da década de 60 na Companhia Siderúrgica Belgo Madeira (CSBM) em Minas Gerais, com a instalação de um equipamento da empresa alemã Humboldt, para briquetagem de finos de carvão vegetal (CARVALHO e BRINCK, 2010).

Embora, a primeira utilização da técnica tenha ocorrido na década de 60, atualmente ainda não há uma metodologia ou normas específicas para a fabricação e comercialização de briquetes. Muitos estudos utilizam métodos próprios ou adaptam normas da ABNT utilizados para carvão vegetal. O principal movimento para a normatização de briquetes no Brasil é do Serviço Florestal Brasileiro (SFB/MMA) que propõem classes de qualidade (DIAS et al., 2012).

O processo de fabricação dos briquetes divide-se em: i) moagem ou trituração; ii) classificação do carvão; iii) mistura do aglutinante; iv) prensagem; e v) secagem dos briquetes. Os briquetes também podem ser produzidos com mais de um tipo de material e são denominados de briquetes compostos. Sua produção é igual a de um briquete simples, com exceção da fase de mistura das matérias primas (CARVALHO e BRINK, 2004).

No que tange a qualidade dos briquetes, estes estão diretamente relacionados com as propriedades dos resíduos utilizados. O teor de cinzas, a umidade, temperatura, pressão, emprego de aglutinantes e principalmente a heterogeneidade no tamanho das partículas são fatores que comprometem a qualidade dos briquetes (DIAS et al., 2012).

Adiciona-se Quirino e Brito (1991) que ao analisarem quatro procedências de briquetes produzidos no Brasil, três de procedência dos Estados Unidos e duas da Argentina. Realizaram análises imediatas (ABNT NBR 8112, 1986), densidade relativa aparente (método da balança hidrostática) e a densidade aparente verdadeira (método do picnômetro), poder calorífico superior (calorímetro isotérmico baseado ABNT NBR 8633, 1984), dentre outros testes, concluíram que a compactação também é fator preponderante para a qualidade de um briquete de carvão vegetal e de seu comportamento na combustão.

Após o processo de fabricação e averiguado sua qualidade, o produto gerado como combustível pode ser usado diretamente em caldeiras e queimadores industriais e fornos, com uma variedade de aplicações tanto industrial como doméstico. As características termofísicas típicas dos briquetes de biomassa são em média: poder calorífico superior em torno de 19,2 MJ/kg, umidade de 12%, carbono fixo de 14%, materiais voláteis de 84%, cinzas de 2% e densidade de 1200kg/m³ (RENDEIRO, 2008; DIAS et al., 2012; PESSOA FILHO, 2013).

Atualmente muitas pesquisas vêm se debruçando nessa seara, sobretudo pela vantagem do método proporcionar, por exemplo, redução do volume físico da biomassa utilizada ou mesmo pelo potencial calorífico que podem apresentar, como também sua combustão que propicia uma regularidade térmica na fornalha (RENDEIRO, 2008; DIAS et al., 2012; PESSOA FILHO, 2013). Por outro lado, as desvantagens associadas a este processo se referem ao investimento em equipamentos e energia despendida na briquetagem.

2.4 A técnica da briquetagem conforme o uso de resíduos regionais

Nos estudos sobre o uso de biomassa por meio de briquetagem, há uma vasta literatura científica investigando notadamente com materiais potencialmente encontrados nas economias locais. Por exemplo, Felfli et al. (2011) realizaram um estudo de briquetagem de biomassa e suas perspectivas no Brasil a partir de resíduos disponíveis no país e concluíram que madeira, casca de arroz, e casca de café são os resíduos mais promissores para a briquetagem no curto prazo.

Gonçalves (2010) avaliou a energia de briquetes produzidos com Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) coletados na Usina de Reciclagem e Compostagem de Lixo sediada em Lençóis Paulista - SP e madeira de *Eucalyptus grandis*, fabricando com 0, 5, 10, 15, 20 e 25% de RRSU com resíduos de madeira contendo 12% de umidade. Utilizando como parâmetros de escolha da melhor mistura a análise de combustibilidade x cinzas e a resistência e energia utilizável, concluíram que o briquete com 25% de RRSU apresentou maior poder calorífico útil.

Protásio et al. (2011), estudaram briquetes produzidos a partir de casca de café, serragem de eucalipto e resíduos da colheita do milho, bem como a influência do tempo após a compactação dos briquetes. Para isso, a biomassa foi seca na estufa e os briquetes produzidos em uma briquetadeira laboratorial à temperatura de 120 °C com tolerância de mais ou menos 5 °C e pressão de 15 Mpa. Dos resultados, observaram que a casca de café moída apresentou maior valor médio de densidade a granel e estatisticamente as biomassas estudadas

apresentaram o mesmo poder calorífico e concluíram que os resultados encontrados reforçam a potencialidade de utilização energética dos briquetes oriundo da compactação da casca de café.

Por sua vez, Pessoa Filho (2013) analisou e definiu o potencial energético de briquetes de capim braquiária (*Brachiaria ssp.*) produzidos pela empresa BRIQFENO Industria e Comércio de Feno LTDA localizada em Minas Gerais. Sellin et al. (2013) ajuizaram os resíduos da banana, folha e pseudocaule encontrado em Joinville-SC, do qual apresenta uma produção significativa de banana. Após efetuarem a análise química, análise termogravimétrica, análise térmica diferencial, resistência mecânica e teor de umidade, concluíram que as propriedades térmicas e físico-químicas desses resíduos são potenciais candidatos à produção de briquetes como combustível em diversas aplicações.

Utilizando os resíduos das palmeiras do babaçu dado o considerável suprimento de resíduos no território brasileiro, sobretudo no norte do Brasil, e contemporizada pela sua importância social para as comunidades extrativistas. Para isso, coletou o material na área rural do Novo Tocantins – TO, do qual foi investigado por Protásio et al. (2014). Já Soares et al. (2015) modelaram briquetes com a utilização de resíduos do pó borra de café e serragem de madeira eucalipto obtidas em Sorocaba-SP. Após análises pertinentes concluíram que os briquetes contendo somente borra de café na composição apresentaram valores inferiores de resistência máxima e compressão quando comparados a todos os outros briquetes moldados também com serragem.

Esteves, Abud e Barcellos (2015) a partir de biomassa residual do côco verde encontrado na cidade de Maceió – AL, caracterizaram o potencial energético das cascas de côco verde por meio do processo de briquetagem classificando em pó e fibra; a biomassa estudada apresentou poder calorífico de 18,48 e 19,47 MJ/kg, respectivamente. Na mesma linha, Pimenta et al. (2015) utilizaram esta biomassa coletada em Touros – RN tendo como principal resultado a viabilidade técnica de se aproveitar as cascas do côco como matéria-prima para a produção de carvão vegetal.

Por fim, destaca-se recente estudo de Kunrath (2016), no qual considerou o processo de extração da gordura da amêndoa do coco de murmuru (*Astrocaryum spp.*) realizado em uma usina de extração de óleo no Estado do Acre e avaliou os resíduos como a casca e a gordura residual na produção de briquetes por meio de análise das propriedades físicas, químicas e energéticas. Num esquema fatorial de 5x4 de proporções aglutinantes e frações de *mesh*, concluiu que os briquetes com 20% de aglutinante e granulometria de 200 mesh são os mais recomendáveis comercialmente, tanto do ponto de vista da densidade aparente, quanto pela densidade energética.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de execução da pesquisa

A pesquisa foi realizada nas dependências da Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC, situada no distrito industrial da cidade de Rio Branco – Acre, especificamente no Laboratório de Tecnologia da Madeira, no Laboratório de Ensaio em Concreto e no Laboratório de Ensaio em Materiais Cerâmicos.

Na Universidade Federal do Acre – UFAC, para a realização dos ensaios no calorímetro, foram utilizadas as dependências do Laboratório de Inspeção e Tecnologia de Produtos de Origem Animal e Vigilância Sanitária do Centro de Ciências Biológicas da Natureza – CCBN.

Por fim, para a realização dos ensaios de resistência à compressão diametral, nas amostras briquetadas, o ambiente foi o Laboratório do antigo Centro de Tecnologia da Madeira e do Mobiliário – CETEMM do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, atual Instituto SENAI de Tecnologia em Madeira e Mobiliário Carlos Takashi Sasai, também situado no Distrito Industrial da cidade de Rio Branco – Acre.

3.2 Coleta dos Resíduos

3.2.1 Casca da castanha-do-brasil

Os resíduos da castanha-do-brasil foram coletados nas dependências da Usina de Beneficiamento de castanhas-do-brasil da COOPERACRE, localizado as margens da BR-364, parque industrial da cidade de Rio Branco – Acre. Na ocasião, foram fornecidas pela cooperativa um total de 08 (oito) sacas de 25 kg cada, de casca de castanha-do-brasil (Figura 6), as quais foram encaminhadas e armazenadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da FUNTAC (Figura 7). Tratou-se, portanto, de uma doação onde, de forma recíproca, a referida cooperativa terá a oportunidade de conhecer os resultados deste trabalho, pelo fato do mesmo tornar-se público após a sua conclusão, o que trará benefícios a ela própria, seja em ganho no potencial energético, seja na redução de custo na compra de insumos.

Figura 6 - Correia transportadora despejando a casca da castanha-do-brasil



Fonte: Arquivo do autor.

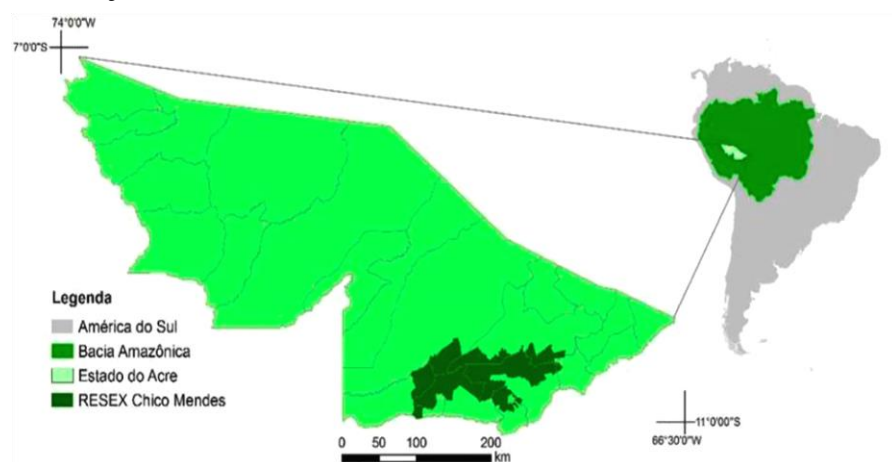
Figura 7 - Ensacamento da casca da castanha-do-brasil para transporte



Fonte: Arquivo do autor.

Importante salientar que por tratar-se de uma produção de origem extrativista, não há uma localização exata do ponto da coleta da castanha-do-brasil, mas sim uma região de coleta. Esta referida região, abrange uma grande extensão territorial, sendo em sua maior parte nos limites da Reserva Extrativista Chico Mendes. A RESEX, como é denominada esta reserva em questão, está contida nas regiões do entorno e dentro dos municípios de Rio Branco, Capixaba, Assis Brasil, Brasiléia, Epitaciolândia, Xapuri e Sena Madureira, todas no Estado do Acre (Figura 8).

Figura 8 - Delimitação da Reserva Extrativista Chico Mendes – RESEX



Fonte: ICMBio (2017).

Muito embora a reserva extrativista possa englobar parte destes municípios anteriormente mencionados, segundo informações da própria Cooperativa, a maioria quase que absoluta, dos resíduos coletados e disponibilizados à pesquisa seriam oriundos de localidades pertencentes a 03 (três) municípios, sendo eles Brasiléia, Epitaciolândia e Xapuri.

3.2.2 Madeira

Os resíduos da madeira, a exemplo da casca da castanha-do-brasil, inicialmente também foram fornecidos pela cooperativa num número de duas sacas de 25 kg cada, sendo que a própria cooperativa os adquire em serrarias locais por valores não divulgados.

Esses resíduos possuem, em sua composição, várias espécies de madeiras e são provenientes de pelo menos três serrarias locais.

Ocorre que estes resíduos em especial encontravam-se estocados a céu aberto (Figura 9), portanto totalmente exposto a intempéries, além de visivelmente possuírem um alto grau de contaminação, uma vez que estavam diretamente sobre o solo de chão batido.

Figura 9 - Serragem armazenada a céu aberto no pátio da cooperativa



Fonte: Arquivo do autor.

Desta forma, pensando na produção dos briquetes e, conseqüentemente na obtenção de amostras o mais livre possível de agentes contaminantes, optou-se pelo máximo rigor a ser empregado, o que claramente nos levará a resultados mais assertivos.

Assim, realizamos o descarte em absoluto dos resíduos de madeira anteriormente coletados para que fosse realizada uma segunda coleta, dessa vez de forma a preservar a integridade dos resíduos.

Assim, os resíduos da madeira foram coletados no Galpão dos Marceneiros Comunitários (Figura 10), sede da Cooperativa dos Moveleiros do Acre – COOPERMÓVEIS,

localizado no Distrito Industrial de Rio Branco. Totalmente em regime de doação, esta coleta, em número de duas sacas de aproximadamente 25 kg cada, se deu de forma diferenciada. Extraíu-se essa segunda biomassa diretamente da máquina denominada tupia de mesa, na medida em que esta produzia seu resíduo, sendo, portanto, proveniente de uma única peça de madeira.

Figura 10 - Momento da coleta da serragem da madeira diretamente na máquina



Fonte: Arquivo do autor.

A madeira em questão foi identificada a nível de gênero denominado *Dalbergia*, mas sem identificação de espécie, muito embora haja indícios de tratar-se da espécie *spruceana*, única com registro na região utilizando-se o método comparativo com amostras da Xiloteca do Laboratório de Anatomia da Madeira, UFAC, campus Rio Branco.

3.3 Preparação das Biomassas

3.3.1 Trituração

As biomassas foram, separadamente, submetidas ao processo de inspeção visual e retiradas, manualmente, toda e qualquer impureza encontrada em seu meio. Em seguida, uma sacola plástica foi cuidadosamente conectada à boca de saída do triturador, com o propósito de que fosse feita a captação da biomassa já processada, sem que desta forma fosse perdida nenhuma parte do material, em específico nenhuma de granulometria mais fina. Ato contínuo, deu-se início a trituração por meio do equipamento denominado triturador desintegrador de partículas (Figura 11), marca MAQTROX, modelo B-609.

Figura 11 - Momento do preparo do equipamento para a trituração das biomassas



Fonte: Arquivo do autor.

Neste equipamento, foi instalado em sua estrutura interna uma peneira de 7 *mesh* (Figura 12), ou seja, foi instalado um dispositivo, cuja abertura da malha é de exatamente 2,83 milímetros, por onde a massa resultante da trituração transpassa.

Figura 12 - Detalhe da peneira instalada abaixo do eixo de lâminas de trituração



Fonte: Arquivo do autor.

Não há, portanto, um número de vezes em que houve o processamento do material, pois vê-se claramente que o material é submetido continuamente ao processamento até que seja possível, finalmente, a coleta do resíduo desejado no saco plástico previamente instalado.

Assim, toda a massa utilizada na pesquisa possui tamanho médio de grão de 2,83 mm ou menos, uma vez que não foi realizado o reprocessamento da biomassa com uma segunda peneira para que fosse obtida uma definição de faixa granulométrica a trabalhar, daí a notação descrita nas tabelas como sendo maior ou igual a sete (≥ 7 *mesh*).

Ao final da trituração, as duas biomassas resultantes dos processamentos foram devidamente pesadas, acondicionadas separadamente em sacos plásticos, identificadas e lacradas (Figura 13), tendo sido processadas 2 (dois) quilogramas de cada biomassa.

Figura 13 - Biomassas acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e lacradas



Fonte: Arquivo do autor.

3.4 Caracterização granulométrica da castanha-do-brasil

A biomassa proveniente da casca da castanha-do-brasil, após submetida ao processo de trituração, foi classificada por meio de peneiramento mecânico, conforme prescrito na norma ABNT NBR 7217 (1987), ocasião em que foram utilizadas um número de cinco peneiras em sequência escalonada conforme abertura da malha. Dessa forma, por ocasião de estarem disponíveis as peneiras apresentadas a seguir, foram utilizadas as com abertura de malha de 20, 35, 60, 80 e 100 *mesh*, além do fundo. 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 14). Após agitação por 5 minutos as partes foram separadas conforme granulometria e devidamente pesadas. A porcentagem de resíduo retida nas peneiras é expressa pela Equação (2):

$$M = (MR/MT) \cdot 100 \quad (2)$$

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

De acordo com Silva et al. (2015), uma variável importante para a confecção de briquetes é a granulometria do material, que pode interferir na sua compactação, resultado em valores diferentes da força máxima suportada pelo material utilizado. Para esta pesquisa, utilizou-se a seguinte malha de abertura das peneiras: 20 *mesh* (> 0,841mm), 35 *mesh*

(0,500mm), 60 *mesh* (0,250mm), 80 *mesh* (0,210mm), 100 *mesh* (0,149mm) e fundo (< 0,149mm).

Figura 14 - Conjunto de peneiras sendo preparadas para classificação granulométrica



Fonte: Arquivo do autor.

3.5 Pré-testes

3.5.1 Parâmetros principais a considerar para formação de briquetes

No intuito de estabelecer as melhores condições para a formação dos briquetes, foram realizadas consultas em trabalhos pré-existentis acerca dos critérios de escolha dos parâmetros de produção empregados. Dentre eles, destaca-se, Kunrath (2016) como base teórica e lógica a proceder inicialmente no presente trabalho.

Para obtenção de um bom briquete, um dos parâmetros levados em consideração é o tempo efetivo de prensagem da biomassa dentro do molde, possuindo este uma fundamental importância dentro do processo, uma vez que o tempo em que as partículas da biomassa passam em contato umas com as outras, bem como com as paredes do próprio molde, em situação de fricção e atrito constante, acaba por gerar calor e, conseqüentemente liberar o mínimo de umidade das biomassas, quando não, podendo liberar também óleos residuais das mesmas.

Outro parâmetro reside na decisão da utilização ou não de agentes aglutinantes que possam garantir a coesão das amostras a briquetar, uma vez que muitos trabalhos demonstraram que apenas através da adição de uma base aglutinadora é que os briquetes atingem as suas

formações ideais. Todavia, os chamados aditivos muitas vezes conferem a amostra não apenas uma força maior de coesão, mas sim potencializando a queima da biomassa.

A pressão mínima utilizada no processo de compactação traduz-se em um importante parâmetro, dado a vasta literatura existente acerca do tema.

O teor de umidade da biomassa briquetada numa faixa recomendada pela literatura também consiste em fator primordial à obtenção de um satisfatório briquete, ocorrendo em muitos trabalhos a necessidade da correção destes teores.

A utilização ou não de um pré-aquecimento nos moldes metálicos que dão forma ao briquetado, configura-se como outro parâmetro importante, uma vez que o calor gerado na fricção da compactação pode ou não ser o suficiente para a coesão das partículas da biomassa.

Por fim, o tamanho da partícula (granulometria) utilizada na confecção dos briquetes é um fator preponderante no acerto da constituição do briquetado.

Em síntese, o primeiro parâmetro é o tamanho de cada amostra, que optou-se por 20 gramas. Na busca dos outros parâmetros, realizou-se pré-testes para determiná-los utilizando os melhores critérios, sobretudo na boa formação dos briquetes. Para isso, levou-se em consideração: i) tempo de prensagem da biomassa dentro do molde; ii) utilização ou não de aglutinantes; iii) pressão mínima utilizada no processo de compactação; iv) teor de umidade da biomassa briquetada; v) utilização ou não de pré-aquecimento nos moldes metálicos; por fim, vi) tamanho da partícula (granulometria).

3.5.2 Testes para definição de parâmetros de formação de briquetes

Com base nas ponderações mencionadas no item anterior, foram definidos alguns esquemas de tratamentos, o primeiro deles (Tabela 5) possuindo um total de 6 tratamentos com 3 repetições cada, estabelecidas como constantes a pressão em 15 toneladas, a granulometria maior ou igual a 7 mesh e as composições das duas biomassas como 50% de cada.

Desta forma, a observação neste primeiro teste foi totalmente voltada pra qual temperatura dever-se-ia utilizar (se ambiente ou de 150°C) e, em quanto tempo de prensagem (se 30, 120 ou 300 segundos) as amostras deveriam ser submetidas para a obtenção de briquete satisfatoriamente formados.

Tabela 5 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 01

TRATAMENTOS	REPETIÇÕES	PRESSÃO [t]	GRANULOMETRIA [mesh]	COMPOSIÇÃO		TEMPERATURA	TEMPO DE PRENSAGEM [s]	SIMBOLOGIA DO TRATAMENTO	
				CASCA DE CASTANHA DO BRASIL [%]	SERRAGEM DE MADEIRA [%]				
T ₁	R ₁	15	≥ 7	50	50	SEM PRÉ-AQUECIMENTO Temperatura Ambiente [26 ±1 °C]	30	T ₁ R ₁	
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₁ R ₂	
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₁ R ₃	
T ₂	R ₁	15	≥ 7	50	50		120	T ₂ R ₁	
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₂ R ₂	
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₂ R ₃	
T ₃	R ₁	15	≥ 7	50	50			300	T ₃ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	50	50				T ₃ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	50	50				T ₃ R ₃
T ₄	R ₁	15	≥ 7	50	50	COM PRÉ-AQUECIMENTO Temperatura Aquecida [150 ±3 °C]	30	T ₄ R ₁	
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₄ R ₂	
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₄ R ₃	
T ₅	R ₁	15	≥ 7	50	50		120	T ₅ R ₁	
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₅ R ₂	
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₅ R ₃	
T ₆	R ₁	15	≥ 7	50	50		300	T ₆ R ₁	
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₆ R ₂	
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₆ R ₃	

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

Amostras devidamente produzidas e tomadas as notas com relação aos melhores parâmetros, foi realizado um novo esquema de tratamentos (Tabela 6), possuindo um total de 5 tratamentos com 5 repetições cada, estabelecidas como constantes a pressão em 15 toneladas, a granulometria maior ou igual a 7 mesh, a temperatura em sendo a ambiente e o tempo de prensagem em sendo de 120 segundos.

Desta forma, a observação neste segundo teste foi totalmente voltada pra as composições das duas biomassas, sendo variados os percentuais de 0 à 100 %, com incremento de 25%).

Tabela 6 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 02

TRATAMENTOS	REPETIÇÕES	PRESSÃO [t]	GRANULOMETRIA [mesh]	COMPOSIÇÃO		TEMPERATURA	TEMPO DE PRENSAGEM [s]	SIMBOLOGIA DO TRATAMENTO
				CASCA DE CASTANHA DO BRASIL [%]	SERRAGEM DE MADEIRA [%]			
T ₁	R ₁	15	≥ 7	0	100	Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₁ R ₁
	R ₂	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₁ R ₂
	R ₃	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₁ R ₃
	R ₄	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₁ R ₄
	R ₅	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₁ R ₅
T ₂	R ₁	15	≥ 7	25	75	Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₂ R ₁
	R ₂	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₂ R ₂
	R ₃	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₂ R ₃
	R ₄	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₂ R ₄
	R ₅	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₂ R ₅
T ₃	R ₁	15	≥ 7	50	50	Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₃ R ₁
	R ₂	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₃ R ₂
	R ₃	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₃ R ₃
	R ₄	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₃ R ₄
	R ₅	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₃ R ₅
T ₄	R ₁	15	≥ 7	75	25	Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₄ R ₁
	R ₂	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₄ R ₂
	R ₃	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₄ R ₃
	R ₄	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₄ R ₄
	R ₅	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₄ R ₅
T ₅	R ₁	15	≥ 7	100	0	Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₅ R ₁
	R ₂	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₅ R ₂
	R ₃	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₅ R ₃
	R ₄	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₅ R ₄
	R ₅	15	≥ 7			Ambiente [26 ± 1 °C]	120	T ₅ R ₅

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

Novamente, com as amostras devidamente produzidas e tomadas as notas com relação aos melhores parâmetros, observou-se que em atenção à literatura, deveria haver a identificação do teor de umidade das biomassas e, a depender dos percentuais existentes, estes deveriam ser corrigidos para uma faixa sugerida que, de acordo com Quirino e Brito (1991), o teor da umidade ideal da matéria-prima para a produção de briquetes, seria em torno de 8 a 12 % e que o resíduo com umidade acima desta referida faixa indicada produziria um briquete com baixa estabilidade, desfazendo-se quando em estoque ou quando posto em marcha de transporte.

Assim, foi realizada a identificação do teor de umidade das biomassas, sendo utilizados os métodos estabelecidos pela norma ABNT 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. Com as análises realizadas em triplicata, ficou constatado o mesmo estar fora da faixa percentual sugerida. Em seguida, foram iniciados os ensaios nas biomassas para que fosse realizada a correção desses teores por meio da secagem destas, tendo havido logo êxito.

Então, realizou-se o pré-teste 03 e nele, repetiu-se o esquema de tratamentos realizados no pré-teste 01, desta vez com os teores de umidade das biomassas previamente corrigidas (Tabela 7).

Tabela 7 - Esquema de tratamentos para realização do pré-teste 03

TRATAMENTOS	REPETIÇÕES	PRESSÃO [t]	GRANULOMETRIA [mesh]	COMPOSIÇÃO		TEMPERATURA	TEMPO DE PRENSAGEM [s]	SIMBOLOGIA DO TRATAMENTO
				CASCA DE CASTANHA DO BRASIL [%]	SERRAGEM DE MADEIRA [%]			
T ₂	R ₁	15	≥ 7	50	50	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₂ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₂ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₂ R ₃
T ₅	R ₁	15	≥ 7	50	50	Aquecida [150 ±3°C]	120	T ₅ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	50	50			T ₅ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	50	50			T ₅ R ₃

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

Nota: Pré-teste realizado (com prévia correção da umidade das biomassas) para comparativo com os tratamentos T2 e T5 do pré-teste 01.

3.5.3 Execução dos pré-testes

Na preparação de todos os pré-testes realizados, primeiramente as biomassas correspondentes a cada tratamento foram pesadas por meio de uma balança analítica da marca Shimadzu, modelo AY 220, com resolução de 0,0001 g (Figura 15), utilizando-se para tal o auxílio de cadinhos cerâmicos que tiveram previamente suas massas taradas.

Figura 15 - Balança analítica no momento da pesagem da biomassa dentro do cadinho



Fonte: Arquivo do autor.

Assim, para cada pré-teste realizado, a depender das proporções estabelecidas, as massas das diferentes biomassas foram sendo pesadas, havendo a constância entre os diversos pré-testes apenas o total em massa por unidade amostral, ou seja, cada briquete deve possuir massa total de 20 gramas.

Após a realização das pesagens, as biomassas foram misturadas e acondicionadas em sacos plásticos com lacre tipo zíper e uma a uma foram sendo identificadas conforme esquema de tratamento previamente estabelecido.

As prensagens propriamente ditas, no caso do pré-teste 01, foram realizadas nas dependências do Laboratório de Ensaios em Concretos da FUNTAC, em equipamento denominado prensa hidráulica de acionamento manual, de marca SOLOTEST, onde sua capacidade limite de carga é de 120.000 kg, com resolução de 40 kg (Figura 16).

Figura 16 - Prensa hidráulica de acionamento manual



Fonte: Arquivo do autor.

Foi utilizado para o processo de compactação (prensagem) das biomassas, um kit auxiliar, no qual consiste em um molde cilíndrico circular de 100 mm de comprimento, com furo passante de 35 mm de diâmetro (tolerância dimensional de +0,3 mm), 77 mm de diâmetro externo, pistão de 100 mm de comprimento e diâmetro de 35 mm (tolerância dimensional de -0,3 mm), base para acomodação do cilindro circular reto de dimensões compatíveis com o cilindro circular e, calota para auxílio na expulsão dos briquetes, cujo diâmetro externo é igual ao do cilindro circular, o diâmetro interno é de 44 mm e a altura é de 37,90 mm (Figura 17).

Figura 17 - Kit auxiliar para compactação (prensagem) das biomassas



Fonte: Arquivo do autor.

Importante salientar que o caráter geométrico do molde, confere às amostras a forma de um cilindro circular reto.

Com relação à necessidade de realização de pré-aquecimento dos moldes, os tratamentos em cujas amostras foram realizadas nesta configuração foram objeto de muita discussão, dado o caráter de improviso necessário para a realização do referido pré-aquecimento. Entretanto, ciente do fato de que a temperatura é um fator condicionante na aglutinação das partículas, em específico à 150°C, foi dada continuidade para a obtenção dessas amostras, sendo utilizado o popularmente conhecido rabicho para aquecimento (Figura 18), que nada mais é que um dispositivo capaz de aquecer através do princípio da resistência elétrica.

Figura 18 - Rabicho para aquecimento através do princípio da resistência elétrica



Fonte: Arquivo do autor.

As verificações de temperatura dos moldes foram realizadas por meio de termômetro tipo espeto da marca KASVI, modelo K-29 5030, cuja amplitude de medição do equipamento de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 19).

Com relação às tomadas de temperatura do cilindro, importante salientar que a temperatura registrada diretamente na base do cilindro atingiu, como previsto, os 150°C . No entanto, em virtude da transferência de calor se dá da base do cilindro em direção à parte superior, não foi possível a obtenção da constância da temperatura por toda extensão do cilindro, havendo muitas vezes diferenças de até 50°C entre os pontos da base e superior do cilindro.

A etapa de resfriamento dos briquetes ao saírem do molde cilíndrico ocorreu sempre com exposição à temperatura ambiente, sem a utilização de dessecadores.

Figura 19 - Rabicho em aquecimento e termômetro tipo espeto aferindo a temperatura



Fonte: Arquivo do autor.

Após a obtenção das amostras, estas foram acondicionadas de volta nos sacos plásticos de identificação correspondente para posterior inspeção visual.

Por fim, após definidas as condições e parâmetros necessários à obtenção de boas amostras, foi realizado um novo esquema de tratamentos (Tabela 8), possuindo um total de 11 tratamentos com 5 repetições cada, estabelecidas como constantes a pressão em 15 toneladas, a granulometria maior ou igual a 7 mesh, a temperatura em sendo a ambiente e o tempo de prensagem em sendo de 120 segundos.

Tabela 8 - Esquema de tratamentos para produção de briquetes

TRATAMENTOS	NÚMERO DE REPETIÇÕES	PRESSÃO [t]	GRANULOMETRIA [mesh]	TEMPERATURA	TEMPO DE PRENSAGEM [s]	SIMBOLOGIA DO TRATAMENTO
				SEM PRÉ-AQUECIMENTO [temperatura ambiente]		
T ₁	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₁ R ₁ ... T ₁ R ₅
T ₂	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₂ R ₁ ... T ₂ R ₅
T ₃	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₃ R ₁ ... T ₃ R ₅
T ₄	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₄ R ₁ ... T ₄ R ₅
T ₅	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₅ R ₁ ... T ₅ R ₅
T ₆	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₆ R ₁ ... T ₆ R ₅
T ₇	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₇ R ₁ ... T ₇ R ₅
T ₈	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₈ R ₁ ... T ₈ R ₅
T ₉	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₉ R ₁ ... T ₉ R ₅
T ₁₀	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₁₀ R ₁ ... T ₁₀ R ₅
T ₁₁	5	15	≥ 7	Ambiente [26 ±1°C]	120	T ₁₁ R ₁ ... T ₁₁ R ₅

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

Destaca-se, portanto um único fator efetivamente variável, estando as respectivas composições das biomassas, sendo variadas relativamente de modo a se complementarem em 100% e/ou em 20 gramas, havendo variações em seus valores absolutos, com percentuais de 0 à 100 %, com incremento de 10%.

Salientando que este último esquema de tratamentos deverá ser realizado com as devidas correções dos teores de umidade das biomassas envolvidas no processo.

3.6 Execução da produção dos briquetes

3.6.1 Preparação das biomassas

Para correção do teor de umidade, utilizou-se os métodos estabelecidos pela norma ABNT NBR 8112 (1986) destinada a análise imediata de carvão vegetal, considerando que não existe norma nacional para análise imediata de resíduos vegetais.

Em função da quantidade de biomassa a ser manuseada em processo de secagem, inicialmente utilizou-se bandejas metálicas onde a altura do material dentro da bandeja fosse equivalente à quando realizado anteriormente em cadinho. Assim, foram pesadas e secas 1 kg de cada biomassa (Figuras 20 e 21).

Figura 20 - Biomassa da serragem de jacarandá no momento da pesagem



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 21 - Biomassa da casca da castanha-do-brasil no momento da secagem na estufa



Fonte: Arquivo do autor.

Desta forma, após a conclusão da correção do teor de umidade das biomassas, as mesmas tornaram a ser armazenadas em sacos plásticos devidamente lacrados e identificados e, por conseguinte, foram armazenadas dentro de dessecador com sílica gel (Figura 22), local no qual pernoitaram.

Figura 22 - Biomassas armazenadas para pernoite dentro de dessecador com sílica gel



Fonte: Arquivo do autor.

No dia seguinte, após apenas vinte horas no dessecador, as biomassas foram pesadas, fracionadas (Figura 23), misturadas e acondicionadas em sacos plásticos com lacre e, uma a cada vez, foram sendo identificadas conforme as concentrações pré-estabelecidas.

Figura 23 - Biomassas distintas em fase de preparação antes de misturá-las



Fonte: Arquivo do autor.

3.6.2 Produção dos briquetes

As prensagens, no caso da produção dos briquetes para a pesquisa, foram realizadas nas dependências do Laboratório de Ensaio em Cerâmica da FUNTAC, em prensa hidráulica de marca EMIC, com capacidade limite de carga de 1.000 kN, com resolução de 0,1 kN e avanço regulável (Figura 24).

Figura 24 - Prensa hidráulica do Laboratório de Ensaio em Cerâmica



Fonte: Arquivo do autor.

Esta prensa, por possuir um curso de apenas 25 mm em seu deslocamento, dado o caráter do emprego no laboratório em que se encontra, necessitou da utilização dos discos (calços) em ferro fundido para auxiliar no processo de compactação. Dessa forma, a compressão era iniciada e logo era interrompida para que fosse adicionado um ou mais discos auxiliares, não havendo, portanto, a compactação em golpe único, de forma contínua.

Outra particularidade deste equipamento reside no fato de que há nele um dispositivo que nos permite regular o avanço da mesa. No entanto, essa dita regulagem não ocorre de maneira tão controlada, podendo facilmente, em operação, ultrapassar os limites de emprego de carga pré-estabelecidas.

Importante salientar que as cargas empregadas nos experimentos seguramente não foram excedidas, levando-se em consideração uma tolerância dimensional do próprio equipamento de 0,1 kN.

Assim, produziu-se amostras de 11 tratamentos distintos, com 05 repetições, resultando 55 briquetes produzidos, conforme o esquema de tratamentos de variação da composição escalonadas entre as duas biomassas em relações inversas, já apresentados na Tabela 8.

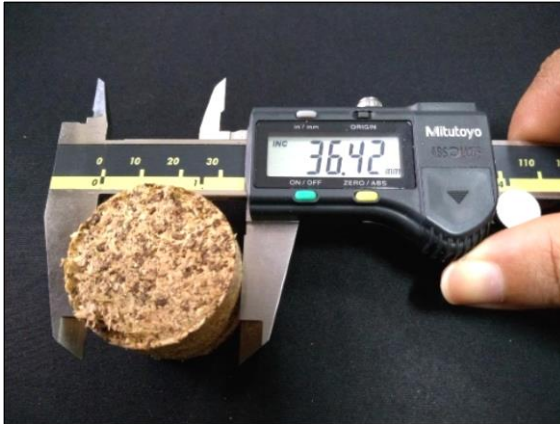
3.7 Caracterização dos briquetes produzidos

3.7.1 Expansão Longitudinal

A expansão longitudinal foi obtida por meio da aferição das dimensões diâmetro e altura dos briquetes com o auxílio de um paquímetro digital da marca Mitutoyo, de resolução

igual a 0,01 mm (Figura 25 e 26), de acordo com o sugerido em Oliveira (2013) e Kunrath (2016), sendo a primeira medição logo após a produção dos briquetes, e as seguintes ao término das 24, 72 e 120 horas, respectivamente.

Figura 25 - Verificação do diâmetro da amostra produzida



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 26 - Verificação da altura da amostra produzida



Fonte: Arquivo do autor.

Os briquetes produzidos foram armazenados em sacos plásticos lacrados durante o período das medições, para que a umidade presente no ar atmosférico não influenciasse na expansão longitudinal da amostra.

A expansão longitudinal (El) dos briquetes foi calculada por meio da diferença entre o comprimento longitudinal da amostra após um determinado tempo da compactação (l_f) e o comprimento longitudinal da amostra logo após a compactação (l_o), dividido pelo comprimento longitudinal da amostra logo após a compactação (l_o), tudo multiplicado por cem, conforme a Equação (3) a seguir:

$$El = ((l_f - l_o) / l_o) \cdot 100 \quad (3)$$

Onde: (El) é dado em [%]; (l_o) é dado em [mm]; e (l_f) em [mm].

Para as características de expansão longitudinal, foram analisadas as variações em três intervalos distintos, e um quarto como sendo a totalidade dos intervalos, sendo eles: *i*) de 0h-24h (de zero até as vinte e quatro horas); *ii*) de 24h até 72h (de vinte e quatro até as setenta e duas horas); *iii*) de 72h até 120h (de setenta e duas até as cento e vinte horas) e; *iv*) de 0h até 120h (de zero até cento e vinte horas).

3.7.2 Densidade Aparente

Ao término das 120 horas pós-produção dos briquetes, aferiu-se a massa de cada amostra por meio da balança analítica de marca Shimadzu, modelo AY 220 com resolução de 0,0001g. As medidas correspondentes à altura e ao diâmetro foram aferidas com um paquímetro digital, da marca Mitutoyo e resolução de 0,01mm, sendo realizadas três medições em posições diferentes para a altura e para o diâmetro.

O cálculo do volume foi realizado considerando a forma geométrica da amostra como sendo um cilindro circular reto. Desta forma, o cálculo do volume do briquete ($Volbr$) foi realizado multiplicando a constante (π) ao diâmetro (\emptyset) do briquete, este último elevado ao quadrado, vezes a altura do briquete (h), dividido por (4), dividindo tudo por (1000), conforme Equação (4) a seguir:

$$Volbr = ((\pi \cdot \emptyset^2 \cdot h) / 4) / 1000 \quad (4)$$

Onde: ($Volbr$) é dado em [cm^3]; (π) é uma constante determinada pela razão entre o perímetro de um círculo e o seu diâmetro, podendo ser considerada como sendo igual a 3,1416 (sendo uma constante, sua unidade é dada de forma adimensional); (\emptyset) é dado em [mm]; e (h) é dado em [mm].

Após a determinação do volume do briquete, foi calculado a densidade aparente do briquete (ρa) que é a razão entre a massa do briquete (m) e o volume do briquete ($Volbr$), conforme a Equação (5) a seguir:

$$(\rho a) = (m) / (Volbr) \quad (5)$$

Onde: (ρa) é dado em [$g \cdot cm^{-3}$]; (m) é dado em [g]; e ($Volbr$) em [cm^3].

3.7.3 Resistência à Compressão Diametral

Conhecido como sendo um ensaio destrutivo, o ensaio de resistência à compressão diametral visa à aplicação de determinada carga no sentido do diâmetro do corpo de prova. Assim, a carga é aplicada no sentido transversal dos briquetes, perpendicular à pressão de compactação, até que haja a detecção por parte do equipamento, por meio de suas células de carga, de uma carga máxima, esta última detectada em virtude da resistência máxima alcançada imediatamente antes da fratura e/ou fissura da amostra.

Com metodologia orientada pela norma COPANT 464 (1972), específica para madeira, já configurada no equipamento, realizou-se o ensaio nas 55 amostras, 45 dias após a compactação da massa, no SENAI/CETEMM, utilizando uma máquina universal de ensaios - EMIC (Figura 27), com capacidade máxima de 10.000 kgf (100 kN), modelo DL 10.000. Utilizou-se uma célula de carga de capacidade de 200 kgf, 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 27 - Máquina universal de ensaios do SENAI/CETEMM



Fonte: Arquivo do autor

3.7.4 Poder Calorífico Superior

Para a determinação do poder calorífico das biomassas briquetadas, seguiu-se a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (1984), utilizando-se o calorímetro de combustão do Laboratório de Inspeção e Tecnologia de Produtos de Origem Animal e Vigilância Sanitária do Centro de Ciências Biológicas da Natureza – CCBN.

O calorímetro (Figura 28) nos fornece o chamado Poder Calorífico Superior (PCS) das biomassas analisadas. Para obter esses valores, primeiro, inseriu-se em média de 0,33 g de matéria, isenta de umidade no interior de uma capsula denominada bomba calorimétrica.

Figura 28 - Calorímetro de combustão



Fonte: Arquivo do autor

Ato contínuo, acoplou-se a bomba no interior do calorímetro adiabático de marca IKA e modelo C-200 (Figura 29), ocorrendo a combustão em 8 minutos após todos os parâmetros serem inseridos no equipamento pelo operador. Como resposta, o equipamento fornece os valores, em calorias por grama [$\text{cal}\cdot\text{g}^{-1}$] diretamente no visor do calorímetro, equivalente à unidade [$\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}$].

Figura 29 - Bomba calorimétrica



Fonte: Arquivo do autor

3.7.5 Densidade Energética

A densidade energética (ρ_e) é a quantidade de energia por unidade de volume de uma biomassa (PESSOA E FILHO, RENDEIRO, 2008; RODRIGUES, 2009). De outra forma, o produto da densidade aparente (ρ_a) com o poder calorífico superior (PCS) também nos fornece a densidade energética. Assim, conforme a Equação (6) a seguir:

$$(\rho_e) = (\rho_a) \cdot (PCS) / (1.000.000) \quad (6)$$

Onde: (ρ_e) é dado em $[\text{cal}\cdot\text{m}^{-3}]$; (ρ_a) é dado em $[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$; e (PCS) em $[\text{kcal}\cdot\text{kg}^{-1}]$.

3.8 Caracterização físico-química das biomassas briquetadas

3.8.1 Determinação do teor de umidade

Baseado na norma ABNT NBR 8112 (1986), as amostras foram separadas em porções de 5,0 g por meio de verificação em balança analítica da marca Shimadzu, modelo AY 220, com resolução de 0,0001 g e, posteriormente acondicionadas em cadinho cerâmico sem tampa, em regime de triplicatas. Em seguida, foram colocados os cadinhos com as biomassas dentro da estufa de secagem da marca QUIMIS (Figura 30), com circulação de ar, sendo posteriormente ajustada de forma a obter $103\pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, pelo período de 120 minutos.

Figura 30 - Estufa com circulação de ar



Fonte: Arquivo do autor

Ao término deste tempo, as amostras foram resfriadas em dessecador com sílica gel por 15 minutos, ou até que sua temperatura se tornou mais amena para manipulação. Em seguida, pesou-se a biomassa. Essas operações de aquecimento e resfriamento foram sistematicamente repetidas até atingir peso constante ou até que a diferença do percentual de perda de umidade de uma mesma amostra seja inferior a 1,5%. Dessa forma, de acordo com a Equação (7) abaixo:

$$(TU) = ((M0 - M1) / M0) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde: (TU) é teor de umidade dado em [%]; $(M0)$ é a massa inicial da amostra em [g]; e $(M1)$ é a massa final da amostra em [g].

Importante salientar que as triplicatas dizem respeito à média dos tratamentos, pois não havia material suficiente para realizar triplicatas das repetições. Dessa forma, foram coletadas 3,0 g de cada repetição dentro de um mesmo tratamento, misturando-as e em seguida, com os 15 g realizada a divisão para realização de triplicatas das médias dos tratamentos.

3.8.2 Determinação do teor de materiais voláteis

Baseado na norma ABNT NBR 8112 (1986), a determinação do teor de materiais voláteis das biomassas, as amostras isentas de umidade são separadas em porções de 1,0 g por meio de verificação em balança analítica da marca Shimadzu, modelo AY 220, com resolução de 0,0001g e, posteriormente acondicionadas em cadinhos cerâmicos com tampa, em regime de triplicatas e, posicionadas na porta do forno mufla (Figura 31), marca QUIMIS, onde este foi previamente aquecido a uma temperatura de 900 °C, com tolerância de mais ou menos 10 °C, permanecendo nesta posição por 3 minutos.

Figura 31 - Cadinhos na tampa do forno



Fonte: Arquivo do autor

Figura 32 - Cadinhos no interior do forno



Fonte: Arquivo do autor

Ato contínuo, o cadinho foi posicionado dentro do forno mufla (Figura 32) com a porta fechada e permaneceu desta forma por 7 minutos. Após esse processo, o material foi resfriado em dessecador com sílica gel, até massa constante ou até que a diferença relativa entre os valores dos teores de materiais voláteis do mesmo resíduo seja inferior a 2%.

O teor de material volátil (*TV*) foi calculado por meio da diferença entre a massa inicial do cadinho mais a amostra de biomassa (*M_i*) e a massa final do cadinho mais a biomassa da amostra (*M_f*), dividido pela massa da amostra seca (*M*), tudo multiplicado por cem, conforme Equação (8) a seguir:

$$(TV) = ((M_i - M_f) / M) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde: (TV) é dado em [%]; (Mi) é dado em [g]; (Mf) é dado em [g]; e (M) em [g].

Importante salientar que para a realização deste ensaio, os materiais foram classificados entre 80 e 100 *mesh*, com auxílio das peneiras vibratórias, uma vez que a norma ABNT NBR 8112 (1986) determina granulometria inferior a 0,210mm e superior a 0,150mm. Isto posto, e ciente da inexistência de quantidade suficiente de material em cada unidade de repetição para se realizar triplicatas das repetições, foram aproveitadas 1,0 g da sobra dos materiais que foram secos anteriormente na determinação do teor de umidade e realizados os ensaios em triplicata das médias dos tratamentos para a determinação dos teores de materiais voláteis.

3.8.3 Determinação do teor de cinzas

Baseado na norma ABNT NBR 8112 (1986), para a determinação do teor de cinzas das biomassas, as amostras isentas de umidade e de materiais voláteis foram separadas em porções de 1,0 g por meio de verificação em balança analítica da marca Shimadzu, modelo AY 220, com resolução de 0,0001g e, posteriormente acondicionadas em cadinhos cerâmicos sem tampa, em regime de triplicatas e, posicionadas no interior do forno mufla, marca QUIMIS, onde este foi previamente aquecido a uma temperatura de 700 °C, com tolerância de mais ou menos 10 °C, permanecendo nesta posição por 30 minutos com a porta do forno aberta e mais 30 minutos com a porta do forno fechado, até que a calcinação ocorresse completamente.

Em seguida, foram retirados os cadinhos da mufla e colocados em dessecador com sílica gel para esfriar e depois pesado para determinação da massa final. O processo foi sistematicamente repetido até que se atingiu peso constante ou até que, segundo a norma ABNT NBR 8112 (1986), a diferença relativa entre os valores de teor de cinza do mesmo resíduo seja inferior a 10%.

Dessa maneira, o teor de cinzas (CZ) foi calculado por meio da diferença entre a massa do cadinho mais a biomassa residual após a combustão (M_1) e a massa do cadinho (M_0) , dividido pela massa da biomassa residual seca (M) , tudo multiplicado por cem, conforme Equação (9) a seguir:

$$(CZ) = ((M_1 - M_0) / M) \cdot 100 \quad (9)$$

Onde: (CZ) é dado em [%]; (M_0) é dado em [g]; (M_1) é dado em [g]; e (M) em [g].

Importante salientar que para a realização deste ensaio, as biomassas foram classificadas utilizando uma peneira de 80 *mesh*, com o auxílio de peneiras vibratórias, uma vez que a norma determina granulometria inferior a 0,210mm.

Isto posto, e ciente da inexistência de quantidade suficiente de material em cada unidade de repetição para se realizar triplicatas das repetições, foram aproveitadas 1,0 g da sobra dos materiais que foram secos anteriormente na determinação do teor de umidade e realizados os ensaios em triplicata das médias dos tratamentos para a determinação dos teores de cinza.

3.8.4 Identificação do teor de carbono fixo

A determinação do carbono fixo (*CF*), 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 (*CZ*) e o teor de voláteis (*TV*), conforme a Equação (10) a seguir:

$$(CF) = 100 - (CZ + TV) \quad (10)$$

Onde: (*CF*), (*CZ*) e (*TV*) são dados em [%].

Importante salientar que, ciente da inexistência de quantidade suficiente de material em cada unidade de repetição para se realizar triplicatas das repetições na determinação de teores de materiais voláteis e de cinzas, foram aproveitadas 1,0 g da sobra dos materiais que foram secos anteriormente na determinação do teor de umidade, para cada um dos dois ensaios mencionados (materiais voláteis e cinzas) e realizados os ensaios em triplicata, considerando as médias dos tratamentos para as respectivas determinações de teores, cito materiais voláteis e cinzas. Dessa forma, conseqüentemente, os resultados dos teores de carbono fixo dizem respeito a uma média dos tratamentos.

3.8.5 Normas nacionais e internacionais

Em síntese, os experimentos foram baseados em normas internacionais e nacionais relacionadas ao tema proposto, conforme Quadro 1:

Quadro 1 - Normas nacionais e internacionais utilizadas

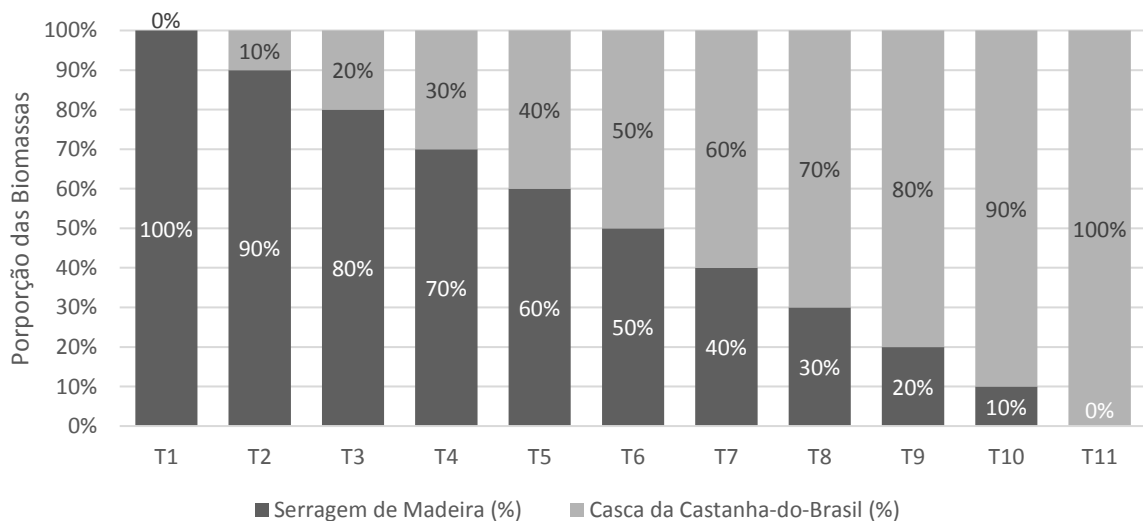
Umidade	Materiais Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo	Poder Calorífico
(ABNT NBR 8112, 1986)	(ABNT NBR 8112, 1986)	(ABNT NBR 8112, 1986)	(ABNT NBR 8112, 1986)	(ABNT NBR 8633, 1984)
(ASTM E871-82, 2006)	(ASTM E872-82, 2006)	(ASTM E1755-01, 2007)	(ASTM E870-82, 2006)	(ASTM E711-87, 2004)
ISSO 589	ISSO 562	ISSO 1171	-	ISSO 1928
DIN 52183	DIN 51720	DIN 51719	-	DIN 51900

Fonte: Adaptado por Nogueira e Rendeiro (2008)

Devido à ausência de normas específicas para briquetes, a metodologia experimental fora conduzida a partir de normas nacionais destinadas a análise de carvão vegetal: ABNT NBR 8633/1984, NBR 8112/1986, NBR 6923/1981.

3.9 Delineamento experimental

Para a confecção dos briquetes foram utilizados a composição entre as duas biomassas em 11 proporções distintas com apenas 1 dimensão granulométrica de (≥ 7 mesh), conforme apresentado no Gráfico 1. O primeiro tratamento (T1) e o último tratamento (T11) corresponde às composições únicas de biomassa de casca da castanha-do-brasil e serragem de madeira, respectivamente, como testemunhas. No esquema delineado, os briquetes foram reproduzidos com cinco repetições por tratamento, o que totalizou 55 unidades amostrais.

Gráfico 1 - Esquema da composição dos tratamentos para confecções dos briquetes

Fonte: Dados da Pesquisa.

Para consecução dos ensaios, os resultados aferidos foram tabulados e organizados por meio de planilhas eletrônicas e as respectivas análises foram realizadas por meio do *software* estatístico Minitab 19.

Os efeitos dos tratamentos experimentais foram analisados por meio de um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) de um único fator com 11 níveis (tratamentos) e 5 repetições, de acordo com modelo verificado na Equação (11):

$$y_{ij} = m + t_i + \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

Onde: (y_{ij}) é o valor observado na unidade experimental que recebeu o tratamento (i), na repetição (j); (m) é uma constante comum a todas as unidades experimentais; (t_i) é o efeito tratamento (i); e, (ε_{ij}) é o erro aleatório (resíduo).

Para testar a hipótese de que as médias de dois ou mais tratamentos eram iguais, utilizou-se a Análise de Variância (ANOVA) a um nível de significância de 5%. Neste caso, a hipótese nula afirma que todas as médias dos tratamentos são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente. Nos casos em que o teste F indicou diferença estatística entre o efeito dos tratamentos, realizou-se o teste de comparação múltipla de Tukey com o mesmo nível de significância.

Para complementar os testes, optou-se também por um teste não paramétrico (teste sem distribuições) sempre que a pressuposição de normalidade dos resíduos fosse afetada. Para contornar estes problemas, realizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para determinar as medianas de dois ou mais grupos diferem estatisticamente a um nível de significância de 5%.

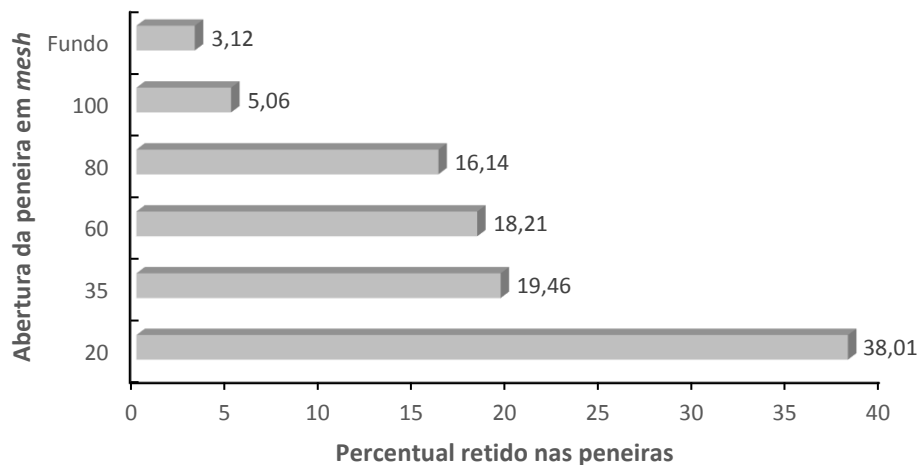
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das diversas análises dos briquetes da mistura da casca da castanha-do-brasil com a serragem da madeira de jacarandá, cujo objetivo é avaliar e definir o potencial energético das biomassas briquetadas como combustível.

4.1 Tratamento mecânico da biomassa

O Gráfico 2 apresenta a classificação granulométrica da casca da castanha-do-brasil pós processo de trituração:

Gráfico 2 - Porcentagem da casca da castanha-do-brasil retidos nas peneiras



Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

Os materiais acumulados na peneira de 20 *mesh* e no fundo foram os que apresentaram os maiores e menores percentuais, sendo de 38,01 e 3,12, respectivamente. Já o segundo maior percentual de resíduos acumulado foi na peneira de 35 *mesh* (19,46%), seguidos da peneira de 60 *mesh* (18,21%), 80 *mesh* (16,14%) e 100 *mesh* (5,06%).

Protásio et al. (2011) ressaltam que as diferenças na granulometria da biomassa após a trituração, devem-se provavelmente decorrentes das características iniciais (naturais/estruturais) dos resíduos.

Nesse sentido, constatou-se que a distribuição granulométrica da biomassa, dado as peneiras disponíveis, apresentaram diferenças discretas entre as peneiras de 35, 60 e 80 *mesh*. Portanto, esse comportamento, provavelmente, deve-se ao caráter pouco fibroso da biomassa, admitindo então que as partículas possuam certa fragilidade, acarretando no momento da trituração que as lâminas do triturador desempenhem papel semelhante a de um moinho de varas ou esferas. Esse comportamento confere ao particulado uma maior homogeneidade.

4.1.1 Pré-testes sem correção dos teores de umidade

Na busca por parâmetros ótimos que auxiliem na formação dos briquetes, foram executados alguns pré-testes que vieram a nos mostrar algumas respostas iniciais. Assim, após a realização do pré-teste 01, onde foram produzidas 18 amostras em 6 distintos tratamentos com 3 repetições cada, ficou evidente que os tratamentos nos quais foram utilizados pré-aquecimento, estes não possuíam em suas estruturas uma homogeneidade, havendo em vários pontos rachaduras (Figura 33 e 34).

Figura 33 - Pré-teste sem pré-aquecimento **Figura 34** - Pré-teste com pré-aquecimento



Fonte: Arquivo do autor.



Fonte: Arquivo do autor.

Souza (2014) observou que essas fraturas decorriam da imediata expulsão dos briquetes do molde, assim que eles se formavam. Problema resolvido com o resfriamento do cilindro antes da expulsão do briquete. Observou ainda que quando o resfriamento ocorre de forma muito rápida, o choque térmico provoca rachaduras na superfície dos briquetes, para a liberação do calor retido no miolo. Em contrapartida, supôs que briquetes formados com partículas grossas apresentam uma maior eficiência na liberação do calor, não ocasionando rachaduras em resfriamentos rápidos.

Estas rachaduras também foram identificadas de forma visual nos tratamentos com pré-aquecimento (Figura 35), imediatamente após a retirada da amostra do molde cilíndrico.

Figura 35 - Rachaduras em amostra de pré-teste de tratamento com pré-aquecimento



Fonte: Arquivo do autor.

Entretanto, as amostras oriundas de tratamentos sem pré-aquecimento também apresentaram imperfeições em sua estrutura, muito embora tenham ocorrido apenas algumas chamadas microfissuras (Figura 36), com proporções consideravelmente menores que as primeiras. Ainda, foi observado no momento que estas rachaduras não eram ocasionadas por vibrações ou impactos oriundos do processo mecânico de compactação, muito comum em materiais frágeis, mas sim que poderiam estar relacionadas ao teor de umidade presente nas biomassas.

Figura 36 - Microfissuras em amostra de pré-teste de tratamento sem pré-aquecimento



Fonte: Arquivo do autor.

Outro fator importante foi o tempo de prensagem que não apresentou, visualmente, diferença significativa entre os tempos de 120 e 300 segundos. Já para o tempo de prensagem de trinta segundos, foram verificadas pequenas desconstruções ao longo das arestas das amostras (Figura 37).

Figura 37 - Falha nas arestas de amostra do pré-teste com tratamento de 30s de prensagem



Fonte: Arquivo do autor.

Uma vez que as amostras tenham conseguido a formação desejada, ou seja, havia nelas uma força de coesão necessária às suas formações, não foi mais considerada a adição de agentes aglutinantes em sua composição, muito embora nenhum acompanhamento tenha sido realizado, para este pré-teste, ao longo do tempo, tal como a verificação da expansão longitudinal, para que a decisão em não se fazer uso de agentes aglutinantes fosse tomada. Além disso, o uso de aglutinantes encarece a fabricação dos briquetes.

Outro fato é de que o material sofre influência e degradação de sua composição química a partir da exposição a altas temperaturas.

Segundo Karunanithy et al. (2012) e Granada et al. (2002) a lignina pode atuar como substância termoplástica ou aglutinante durante a compactação da biomassa na briquetagem, fazendo com que as partículas fiquem mais aderidas entre si, tendo por consequência, possíveis elevações nas propriedades mecânicas. Além disso, a pressão durante a compactação da biomassa promove um entrelaçamento entre as partículas e por estas estarem muito próximas, forças de atração intensas são promovidas fazendo com que permaneçam unidas.

Após a realização do pré-teste 02, onde foram produzidas 25 amostras em 5 distintos tratamentos com 5 repetições cada, ficou evidente que os tratamentos nos quais o percentual de casca da castanha-do-brasil foi igual 75% e 100%, as amostras apresentaram uma mais baixa força de coesão entre as partículas, em especial as que continham em sua a casca da castanha-

do-brasil em sua totalidade (Figura 38). Ao passo que as amostras com 100% de serragem de madeira de jacarandá apresentaram uma boa formação (Figura 39). Viu-se aí a necessidade da diminuição do incremento, certamente para 10%, afim de que fosse possível estudar melhor este comportamento.

Figura 38 - Amostra oriunda de 100% de casca da castanha-do-brasil



Fonte: Arquivo do autor.

Figura 39 - Amostra oriunda de 100% de serragem da madeira de jacarandá



Fonte: Arquivo do autor.

Por fim, a correção do teor de umidade não se mostrou necessária ao analisarmos os resultados visuais das amostras, sobretudo os cujos tratamentos não se utilizaram de pré-aquecimento.

Todavia, como forma de produzir um chamado efeito comparativo, foi realizado o pré-teste 03, este utilizando-se dos mesmos parâmetros utilizados por ocasião do pré-teste 01, com apenas dois tratamentos em específico, sendo o T₂' E T₅', mas desta vez com as devidas correções dos teores de umidade para a faixa de 8% até 12%.

4.1.2 Pré-testes com correção dos teores de umidade

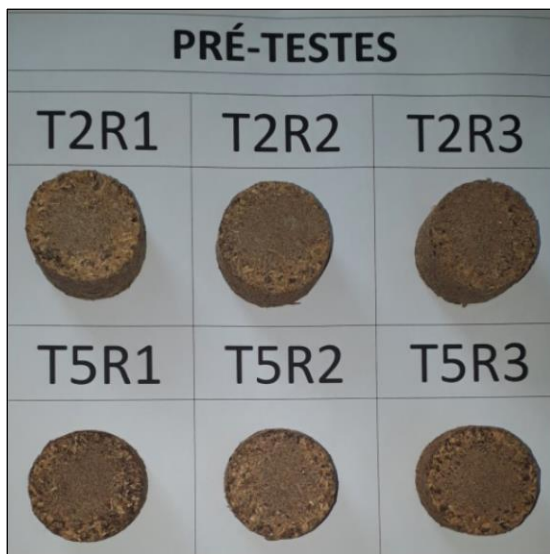
Para a realização do pré-teste 03, foram identificados os teores das biomassas (Apêndice A), bem como os valores corrigidos das umidades das biomassas (Apêndice B). Na identificação dos teores de umidade, constatou-se para a casca da castanha-do-brasil, um percentual de umidade em torno de 17,49%, enquanto para a serragem da madeira de Jacarandá, este valor ficou em torno de 15,49%. Notadamente, valores acima de 12% são considerados não ideais no processo de briquetagem (RENDEIRO, 2008).

Desta forma, para fins deste trabalho, realizou-se a correção dos teores de umidade das biomassas por meio de secagem, no qual, culminou para teores em torno de 8,22% e 9,23% para a casca da castanha-do-brasil e serragem de Jacarandá, respectivamente.

Determinados e corrigidos os teores de umidade das biomassas, deu-se início a produção das amostras do pré-teste 03, para que estas pudessem servir de objeto de comparação frente as amostras do pré-teste 01, que não passaram pela referida correção.

Importante salientar que a confecção das amostras do pré-teste 03 se deu na mesma prensa hidráulica em que os tratamentos T₂ e T₅, do pré-teste 01 foram produzidos anteriormente. Assim, os resultados visuais foram registrados (Figuras 40 e 41) e puderam ser avaliados.

Figura 40 - Amostra de tratamentos sem correção dos teores de umidade das biomassas



Fonte: Arquivos do autor.

Figura 41 - Amostras de tratamentos com correção dos teores de umidade das biomassas



Fonte: Arquivos do autor.

Desta feita, mais uma vez não foi visualizada nenhuma diferença entre o conjunto de tratamento T₂ e T_{2'}, tão pouco entre os T₅ e T_{5'}. Entretanto, para efeito de futuras comparações

com resultados de outras pesquisas, ficou estabelecido que as amostras que seriam utilizadas e analisadas neste trabalho passariam pelo processo de correção dos teores de umidade para a faixa dita ideal, anteriormente mencionada.

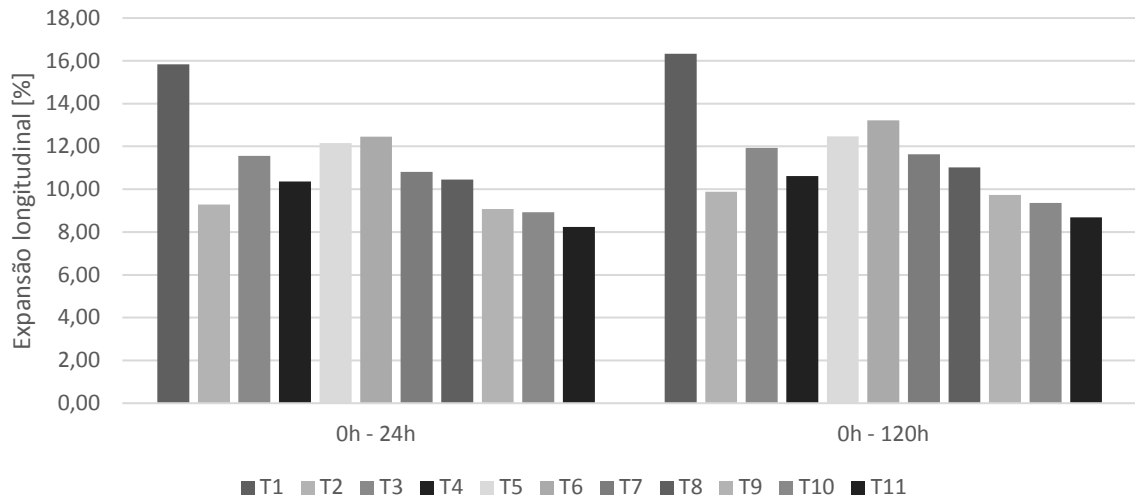
4.2 Caracterização Mecânica dos briquetes

O processo de produção da briquetagem resultou em cinquenta e cinco amostras distribuídas em onze distintos tratamentos com cinco repetições cada, propostos (Apêndice C), derivados da observação de diversos pré-testes, bem como das escolhas mais convenientes quanto aos parâmetros necessários à produção dessas amostras, que culminaram em sucesso.

4.2.1 Expansão longitudinal

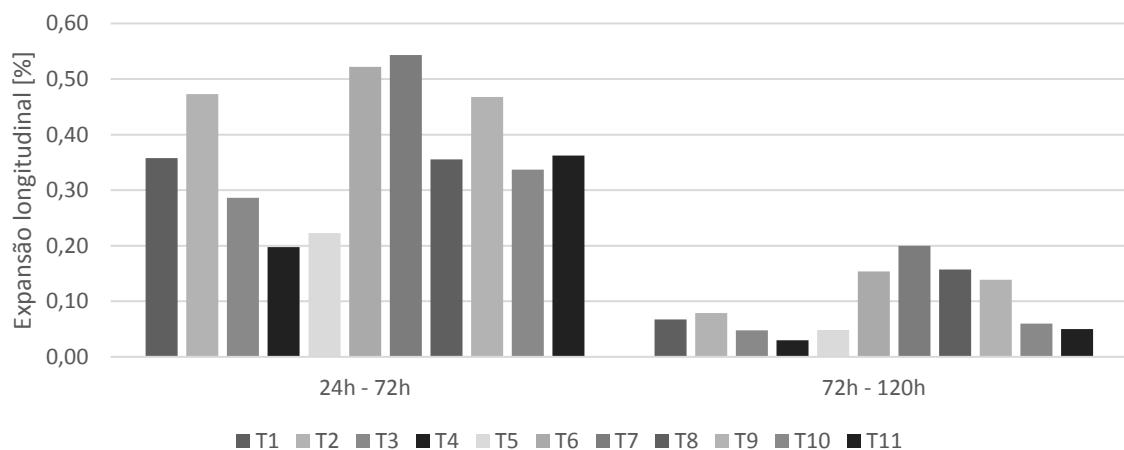
O Gráfico 3 apresenta o comportamento das variações da expansão longitudinal dos briquetes ao longo do intervalo (0h-24h) e para a totalidade dos intervalos (0h-120h) em função dos tratamentos amostrais utilizados. O Gráfico 4 apresenta o comportamento das variações da expansão longitudinal dos briquetes ao longo dos intervalos (24h-72h) e (72h-120h) em função dos tratamentos amostrais utilizados,

Verificou-se que no intervalo de 0h-24h, a variação mínima e máxima encontrada entre os tratamentos foi de 8,24% e 15,83%, respectivamente. Comparativamente, no intervalo que representa a totalidade dos intervalos, de 0h-120h, a variação mínima e máxima encontrada entre os tratamentos foi de 8,69 e 16,33%, respectivamente. Com relação ao comportamento médio da variação dos tratamentos para os intervalos de 0h-24h e 0h-120h, esses foram de 10,83% e 11,35%, respectivamente. Os mesmos intervalos assumiram coeficientes de variações de 19,83 e 18,97, com desvio padrão de 2,148 e 2,154.

Gráfico 3 - Expansão longitudinal em função do tempo (0h-24h e 0h-120h) e dos tratamentos

Fonte: Dados da pesquisa.

Observou-se que as maiores expansões longitudinais dos tratamentos ocorreram nas primeiras 24 horas, visto que ao término das 120h, elas representaram quase que a totalidade da variação ocorrida nas 24 horas iniciais. Isso porque nos intervalos intermediários (24h-72h e 72h-120h), as variações médias foram menores, conforme averigua-se comparando as escalas entre os dois gráficos.

Gráfico 4 - Expansão longitudinal em função do tempo (24h-72h e 72h-120h) e dos tratamentos

Fonte: Dados da Pesquisa.

Outrossim, observa-se que as maiores expansões se deram nos briquetes do tratamento T6 (13,22%), enquanto que as menores expansões ocorreram nos briquetes T10 (9,36%), sendo os tratamentos ordenados quanto à sua expansão da seguinte maneira: T6 > T5 > T3 > T7 > T8 > T4 > T2 > T9 > T10. Maior expansão dos briquetes indica que não ocorreu uma boa adesão

entre as partículas, o que pode influenciar na resistência mecânica dos briquetes (CHISOSTOMO, 2011).

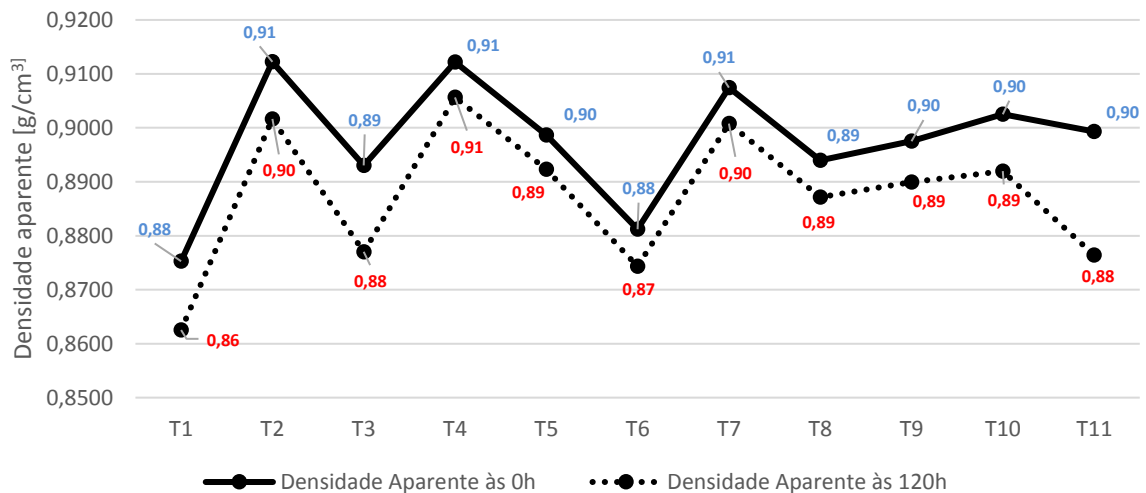
A compactação dos resíduos e a expansão longitudinal é influenciada pela granulometria utilizada para confecção dos briquetes (FERNANDEZ et al., 2017). Observando a classificação granulométrica do material, no que tange ao tamanho de partícula utilizada para confecção dos briquetes (Gráfico 2), tem-se que a maior parte da biomassa ficou retida na peneira de 20 *mesh* (partículas maiores).

Contudo, conforme apontado por Fernandes *et al.* (2007), vale salientar que a expansão dos briquetes não é apenas influenciada pelo tamanho da partícula do material compactado, mas também há outros fatores que devem interferir no processo, como por exemplo, a característica das fibras (comprimento, espessura de parede) e os constituintes das fibras (celulose, hemicelulose e lignina).

4.2.2 Densidade aparente

O Gráfico 5 apresenta os valores médios da densidade aparente dos briquetes, em g/cm^3 , por tratamento, considerando o tempo após compactação.

Gráfico 5 - Valores médios da densidade aparente para 0h e 120h em função dos tratamentos



Fonte: Dados da Pesquisa.

Observa-se que a densidade aparente média às 0h e 120h, foram de 0,89 e 0,88, com coeficiente de variação de 1,29% e 1,50%, respectivamente. As variações entre o tempo de avaliação dos briquetes não foram significativas a 5% pelo Teste F². Em outras palavras, os tratamentos analisados apresentaram estatisticamente a mesma média de densidade aparente.

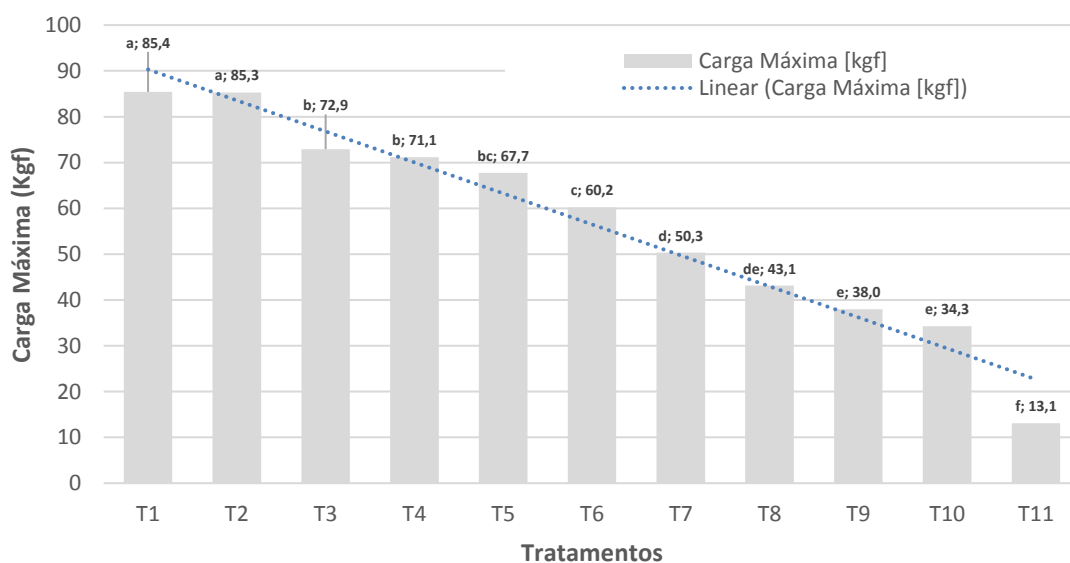
Dias et al. (2012) ressaltam que a análise da densidade aparente é de suma importância para a compactação, uma vez que quanto maior a densidade, maior a razão energia/volume. Além do mais, destaca que produtos de alta densidade são desejáveis em termos de transporte, armazenamento e manuseio.

Ainda os autores, asseveram que, em geral, a densidade aparente dos briquetes variam entre 0,5 e 1,2 g.cm⁻³ e no caso em questão, obteve-se valores mínimo e máximo de 0,863 e 0,906, respectivamente, com destaque para o T4 (30% de casca de castanha-do-brasil), seguidos de T2 (10% de casca de castanha-do-brasil) e T7 (60% de casca de castanha-do-brasil). Veja-se que estes resultados para T4, T2 e T7, poderão influenciar na qualidade dos briquetes produzidos devido à acomodação das partículas no momento da compactação. Por outro lado, T1 (100% de casca de castanha-do-brasil) foi o que apresentou menor valor médio de densidade aparente.

4.2.3 Resistência à compressão diametral

O Gráfico 6 apresenta o comportamento da resistência à compressão diametral em função dos tratamentos amostrais desta pesquisa, observou-se que as médias diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste F e pelo teste Kruskal-Wallis. Além disso, pelo teste de médias (Tukey) foram realizados para identificar quais os tratamentos diferem entre si.

Gráfico 6 - Resistência à compressão diametral dos briquetes



Fonte: Dados da pesquisa.

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Percebe-se uma relação inversa entre a resistência à compressão e a quantidade de casca da castanha-do-brasil adicionada ao tratamento, como denota a linha de tendência (linha pontilhada). Pode-se inferir que a serragem tem maior efeito para melhorar as propriedades mecânicas dos briquetes moldados devido, provavelmente, à estrutura de pequenas fibras presentes na serragem da madeira (SOARES et al., 2015).

Sabe-se que tanto a serragem quanto a casca da castanha-do-brasil são materiais lignocelulósicos, ou seja, possuem em sua composição lignina, celulose, polioses, além de extrativos e cinzas de sais minerais. A lignina é a principal responsável pela resistência mecânica das plantas ao dobramento e impacto, além da celulose, e no caso estas características são mais presentes nas fibras de serragem do que nas cascas da castanha-do-brasil (SOARES et al., 2015).

Além disso, os resultados foram estatisticamente distintos e, no geral, para os 11 tratamentos avaliados, obteve-se carga máxima entre 13,06 kgf (T11) a 85,42 kgf (T1), com média de 56,49 kgf, coeficiente de variação de 40,49% e desvio padrão de 22,87.

Nota-se que T1 e T2 foram os briquetes com maior resistência à compressão, contudo, sabendo que o tratamento T1 é uma das testemunhas, possuindo 100% de serragem em sua composição, considera-se, portanto, T2 como sendo o tratamento com melhor resposta ao ensaio com valor médio de 85,28 kgf.

Uma possível explicação para este resultado estaria no valor da densidade aparente (PAULA et al., 2011), no entanto, não é possível inferir esta relação, uma vez que os tratamentos não diferiram estatisticamente, conforme Gráfico 4. Outra explicação estaria na escolha da granulometria, uma vez que ela influencia na aglomeração das partículas e, conseqüentemente, nas propriedades físico-mecânicas dos briquetes (QUIRINO e BRITO, 1991).

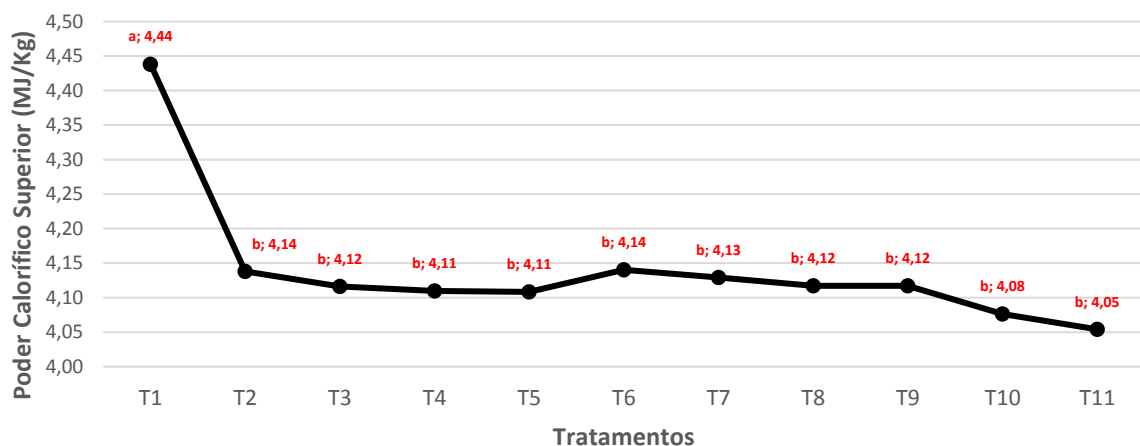
Normalmente, as pesquisas na área costumam utilizar os chamados “finos” granulométricos, ou seja, tamanhos de grãos a partir de 35 *mesh*, todavia, comercialmente tornaria o processo de briquetagem mais oneroso já que depreenderia mais energia no processo.

Por outro lado, excetuando o T11 (testemunha), tem-se que T8, T9 e T10 não diferiram estatisticamente, mas foram os de menor compressão diametral. Ressalta-se que esses resultados não desclassificam esses tratamentos para a produção de energia, apenas indicam aprofundamento dos estudos (PROTÁSIO et al., 2011).

4.2.4 Poder Calorífico Superior

O poder calorífico é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassas (PROTÁSIO et al., 2011). O Gráfico 7 apresenta os valores médios encontrados na determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) dos briquetes para cada tratamento. Na análise da variância entre os tratamentos, observou-se que médias diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste F^3 , mas não significativos pelo teste Kruskal-Wallis.

Gráfico 7 - Poder calorífico superior com inclusão das testemunhas (T1 e T11)



Fonte: Dados da Pesquisa.

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Pelo teste de Tukey verificou-se que apenas T1 diferia estatisticamente das demais médias de tratamentos. Sabendo que tanto T1 quanto T11 representam as testemunhas do experimento, dos quais o reserva a condição de extremidades (*outliners*)⁴ fazendo com que a ANOVA perdesse seu poder sensível de teste. Para contornar tal situação, excluíram-se as testemunhas e realizou-se a ANOVA⁵ e o teste Tukey para identificar tratamentos que diferem entre si.

O Gráfico 8 apresenta tais resultados, no qual verificou-se p -valor igual 0,04, portanto, as médias dos tratamentos diferem estatisticamente a um nível de significância de 5%, no mais, realizou-se o teste de médias (Tukey) para inferir sobre a magnitude das diferenças entre os tratamentos.

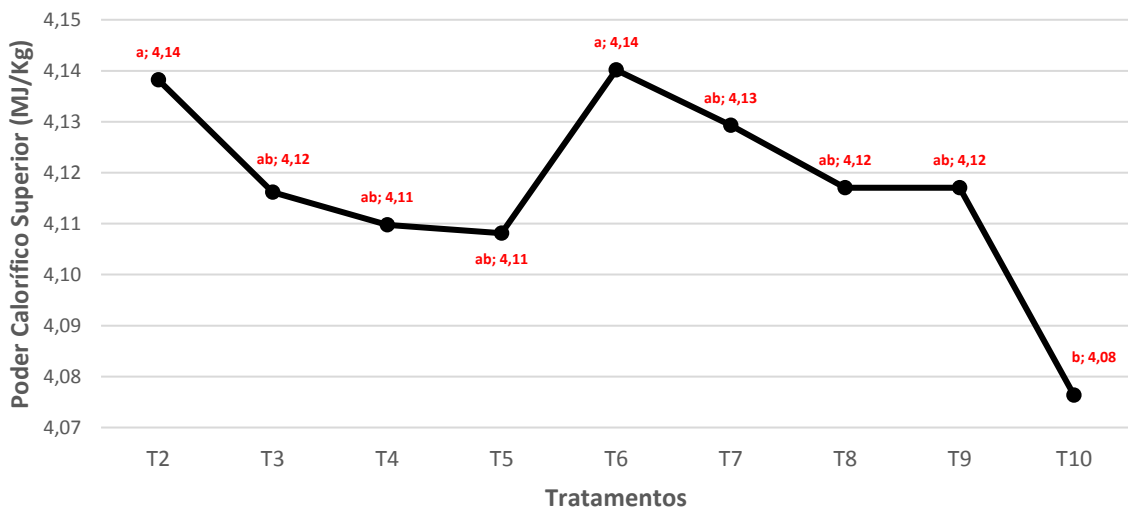
3 Apêndice F.

4 *Outlier* é uma observação que apresenta um grande afastamento das demais da série e normalmente implica em prejuízos de interpretação dos resultados de testes estatísticos aplicados a amostra.

5 Apêndice G.

É possível inferir que o PCS apresentou uma relação inversa com a quantidade de casca da castanha-do-brasil utilizada nos tratamentos, ou seja, na medida que havia um incremento do percentual da biomassa proveniente da casca da castanha-do-brasil, houve um decaimento do PCS. Contudo, ressalta-se que a produção de briquetes compostos (mistura de duas biomassas), obtém-se médias ponderadas de suas propriedades e composições, logo, essa relação com o PCS, embora variando em escala pequena, pode ser decorrente da interação entre as propriedades e composições das duas biomassas (LIPPEL, 2019).

Gráfico 8 - Poder calorífico sem incluir as testemunhas (T1 e T11)



Fonte: Dados da Pesquisa

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Em geral, o PCS variou em torno de 4,14 MJ/kg, em média, com coeficiente de variação de 2,46% e desvio padrão de 0,10. Quirino et al. (2004) realizaram um levantamento bibliográfico dos valores de PCS da madeira disponíveis na literatura e encontraram um valor médio de PCS de 19.721 kJ/kg, enquanto que Nogueira e Rendeiro (2008) apresentam o PCS de 43 espécies amazônicas, dentre elas a casca da castanha-do-brasil, com valor médio de 20.280 kJ/kg.

Desta feita, observa-se que os valores encontrados neste trabalho apresentaram-se menores do que os relacionados na literatura. Comparando o PCS da casca da castanha-do-brasil obtido com o resultado encontrado em Kleinlein (2010) para o mesmo material, o mesmo apresentou um valor de 20,51 MJ/kg, valor este muito acima dos apresentados no Gráfico 8. O mesmo ocorre para Carmona et al. (2019) com valores médios de 10,62 MJ/kg.

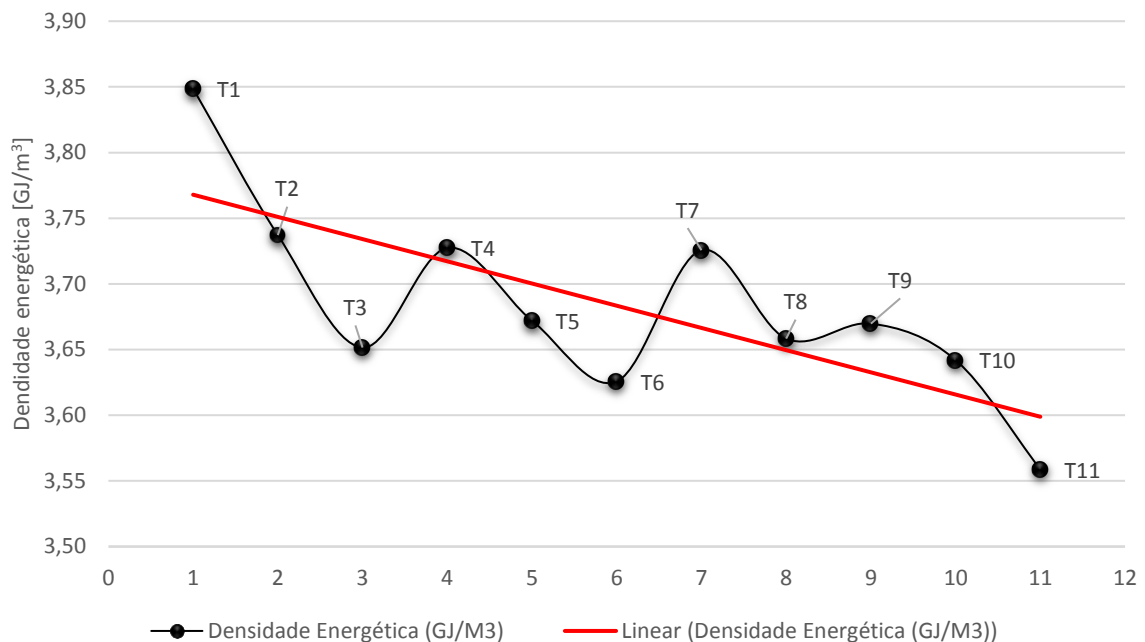
Analisando o efeito entre os tratamentos, observa-se que T6 (50% casca da castanha-do-brasil) tem PCS significativamente mais elevado do que T10 (90% casca da castanha-do-

brasil). Além disso, verifica-se que T3, T4, T5, T7, T8 e T9 foram estatisticamente iguais a 5% de significância pelo teste de Tukey. Esse resultado é um indicativo da superioridade de T6 como potencialidade energética em termos relativos.

4.2.5 Densidade Energética

O Gráfico 9 apresenta os valores médios obtidos da densidade energética dos briquetes para cada tratamento. Na análise da variância entre os tratamentos, observou-se que médias não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste da F^6 , todavia, encontrou-se diferença significativa ao nível de 5% pelo teste Kruskal-Wallis (teste não paramétrico).

Gráfico 9 - Densidade energética



Fonte: Dados da Pesquisa.

* Médias dos tratamentos não diferem entre si a 5% de significância pelo Teste F.

Examina-se que a densidade energética entre as médias dos tratamentos, variou de 3,56 GJ/m³ a 3,84 GJ/m³, com coeficiente de variação de 2,04% e desvio padrão de 0,075. Portanto, pelas estatísticas descritivas, análoga as análises de densidade aparente, é possível perceber que não houve grandes variações entre os tratamentos, o que coaduna com o resultado do teste F pela aceitação da hipótese nula de que os tratamentos possuem médias iguais.

4.3 Caracterização físico-química dos briquetes

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise química imediata, Teores de Umidade (TU), Teores de Materiais Voláteis (TMV), Teores de Cinza (TC), Teores de Carbono Fixo (TCF) e, Poder Calorífico Superior (PCS). Na análise da variância entre os tratamentos, observou-se que médias não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste da F.

Observa-se que das propriedades químicas dos briquetes oriundos das biomassas aqui analisadas, os valores médios foram muito próximos entre eles, com coeficientes de variação em torno de 1% a 5%. Também, observou-se desvio padrão muito próximo de zero, o que indica homogeneidade dos resultados. Tais apontamentos corroboram com os resultados dos Testes F não significativos a um nível de significância a 5%.

Tabela 9 - Análise imediata e poder calorífico superior dos briquetes

Tratamentos	TU (%)	TC (%)	TMV (%)	TCF (%)	PCS (MJ/Kg)
T1	10,2092	1,7356	84,4733	13,7910	4,4383
T2	10,2262	1,9223	84,3033	13,7743	4,1382
T3	10,2602	1,7867	84,0100	14,2033	4,1162
T4	10,2755	1,9250	84,0033	14,0717	4,1098
T5	10,2756	1,9897	83,8167	14,1937	4,1081
T6	10,3503	1,9767	83,6533	14,3700	4,1402
T7	10,3600	2,0000	83,4967	14,5033	4,1293
T8	10,4511	2,0801	82,2700	15,6499	4,1170
T9	10,4741	2,0080	83,1567	14,8353	4,1170
T10	10,4988	2,0100	83,1467	14,8433	4,0763
T11	10,5026	2,0085	82,9733	15,0182	4,0540
Estatística Descritiva					
Média	10,35	1,95	83,57	14,48	4,14
Mediana	10,35	1,99	83,65	14,37	4,12
*CV (%)	1,08	5,28	0,78	3,92	2,46
Desvio Padrão	0,11	0,10	0,65	0,57	0,10
Máximo	10,50	2,08	84,47	15,65	4,44
Mínimo	10,21	1,74	82,27	13,77	4,05
Correlação com PCS	-0,55	-0,71	0,65	-0,60	1,00

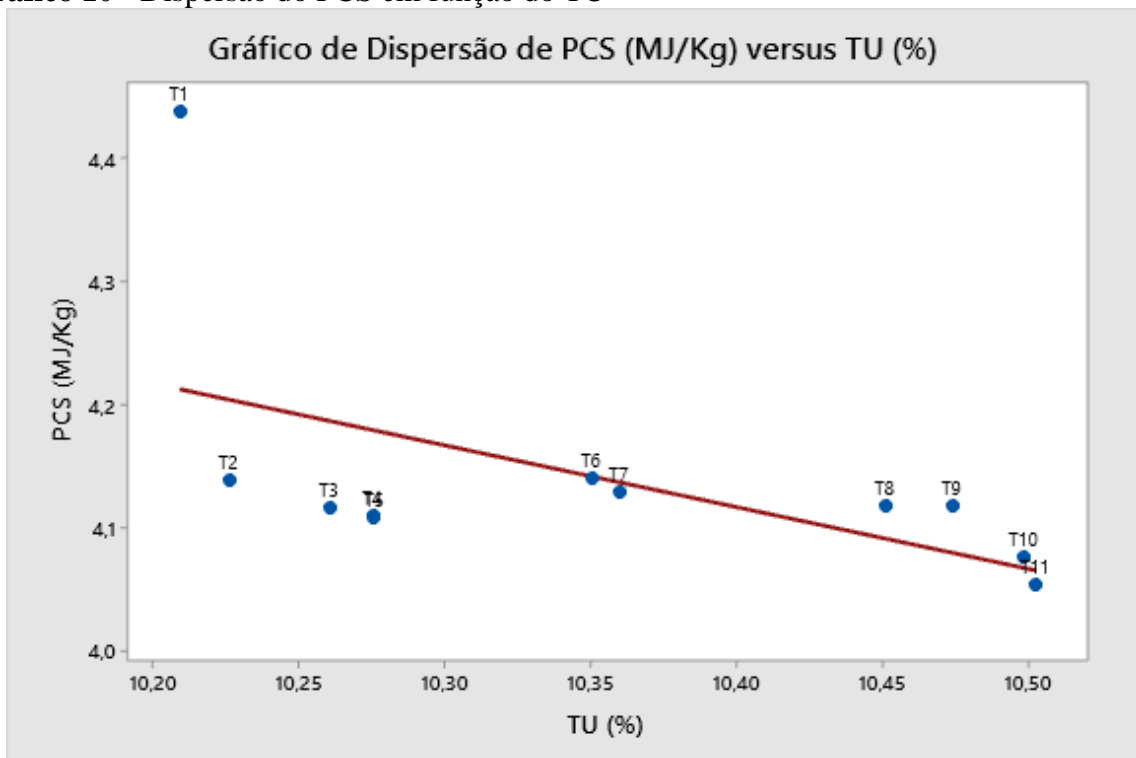
Fonte: Dados da Pesquisa.

* CV= coeficiente de variação.

No que tange ao teor de umidade, infere-se um valor médio entre os tratamentos de 10,35%, valor este condizente com a literatura especializada que apontam as características típicas de briquetes com teores de umidade em torno de 10% a 12% (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008; DIAS et al., 2012; VIRMOND et al., 2012).

Uma correlação⁷ negativa de (-0,55) foi identificado entre o TU e o PCS, confirmando o que prediz a literatura de que altos teores de umidade contribuem para a diminuição do PCS. Além disso, verifica-se que quanto maior a porcentagem da casca da castanha-do-brasil nos tratamentos maior o teor de umidade, conforme o Gráfico 10 que apresenta esta relação:

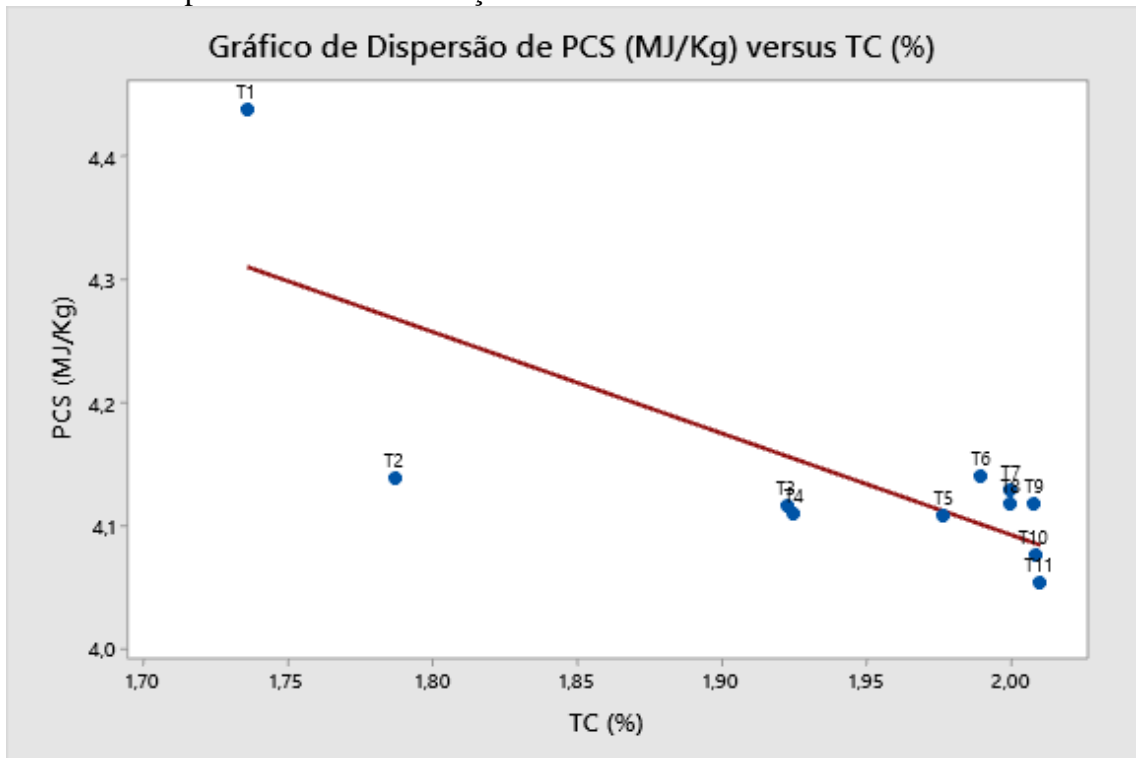
Gráfico 10 - Dispersão do PCS em função do TU



Fonte: Dados da Pesquisa.

Quanto ao teor de cinzas, averigua-se um valor médio entre tratamentos de 1,95%, também condizente com a literatura que estima em torno de 2% (DIAS et al., 2012). Importante aqui destacar que análogo ao teor de umidade, quanto maior o teor de cinzas maior seria sua contribuição para a diminuição do Poder Calorífico Superior (PCS), assim sendo, aferiu-se uma correlação negativa de (-0,71), ratificando a literatura (QUIRINO e BRITO, 1991), conforme demonstrado no Gráfico 11.

⁷ Correlação entre dois conjuntos de dados, dado por: $correl(X, Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}$.

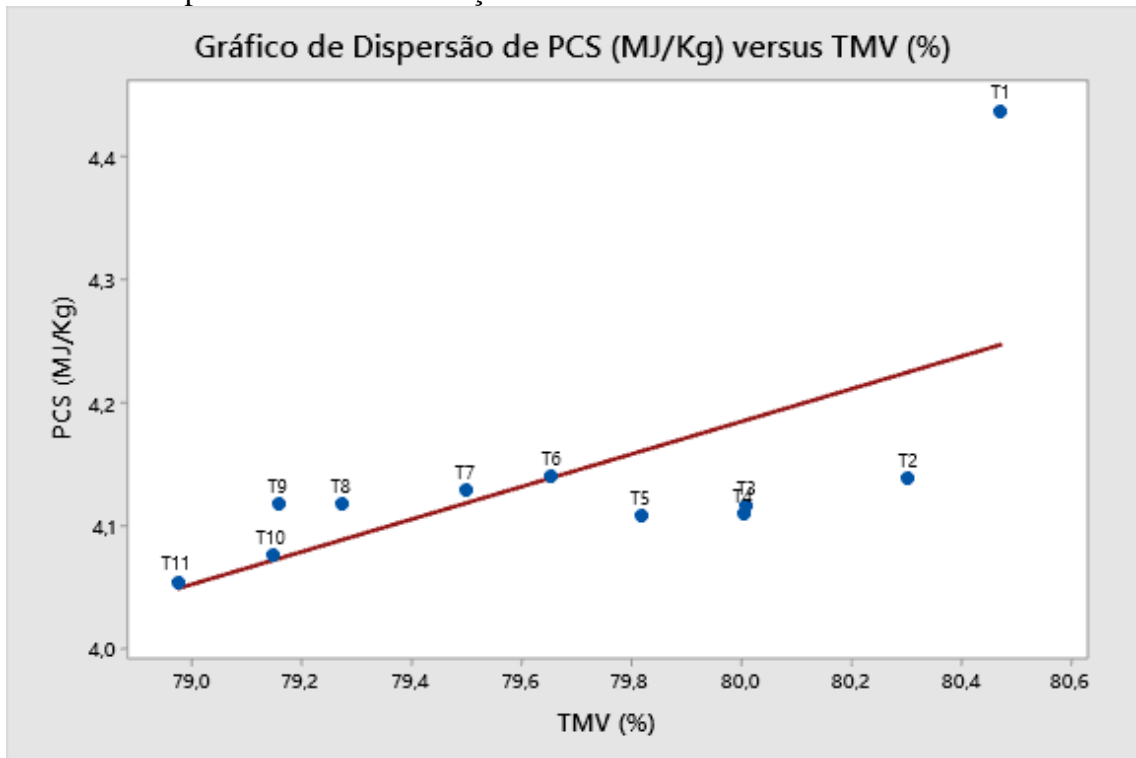
Gráfico 11 - Dispersão do PCS em função do TC

Fonte: Dados da Pesquisa.

De acordo com Quirino e Brito (1991), a elevada correlação inversa entre o teor de cinzas e o poder calorífico é explicado pelo fato da cinza ser material de origem mineral, não-orgânica, inerte e não-combustível, e, o poder calorífico depender de material orgânico presente no combustível.

Portanto, tendo o teor de cinzas ficado em torno de 2% e o teor de umidade abaixo de 12%, estes resultados combinados são bons indicativos da aplicabilidade das biomassas em processos termoquímicos, tendo em vista que valores acima destes reduzem a energia disponível no combustível, bem como ocasionam problemas operacionais no processo de combustão (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008; DIAS et al., 2012; VIRMOND et al., 2012).

Quanto ao teor de materiais voláteis, deduz-se um valor médio em torno de 79,66%, que também condiz com a literatura especializada em biomassas amazônicas, dos quais preconiza a variação em torno de 50% a 80% (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008). Adiciona-se a análise a correlação linear positiva entre PCS e TMV de (+0,65), conforme evidenciado no Gráfico 12.

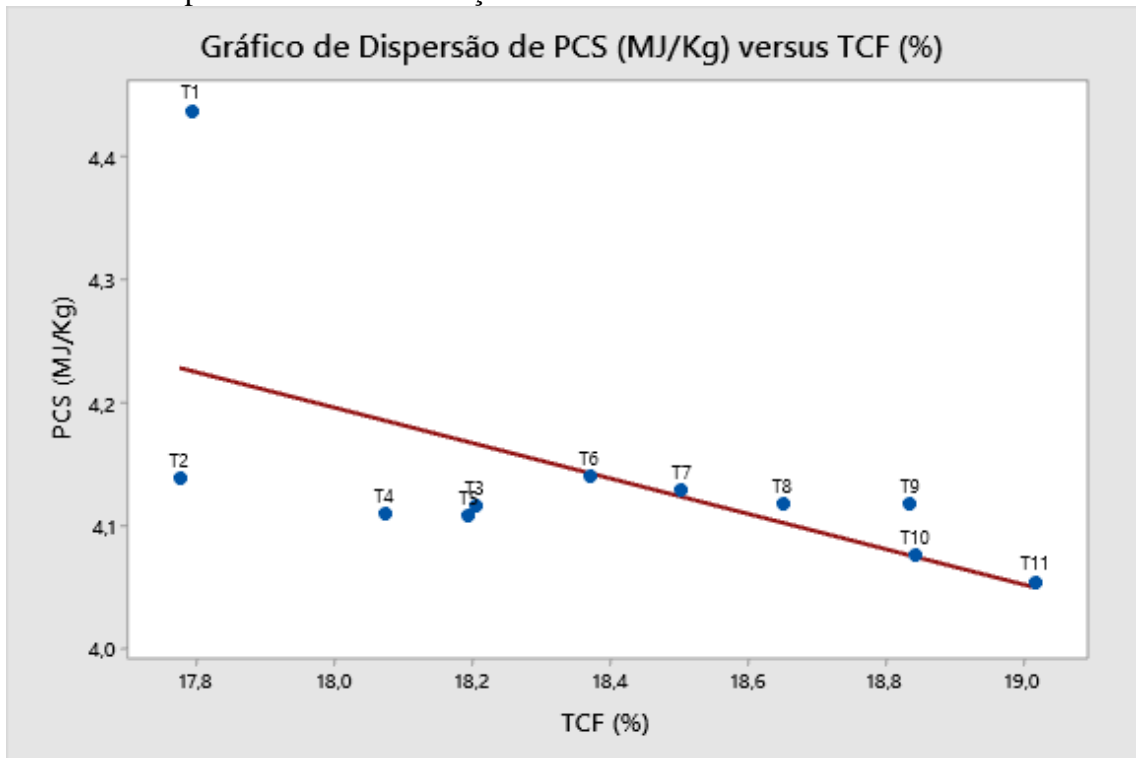
Gráfico 12 - Dispersão do PCS em função do TMV

Fonte: Dados da Pesquisa.

Sabe-se que quanto maior o teor de material volátil, maior a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama, e nestes casos, portanto, valores acima dos desejáveis poderiam diminuir o poder calorífico dos tratamentos.

Por fim, no que se refere o teor de carbono fixo constata-se valores médios em torno de 18,39%, com coeficiente de variação 2,30%. Tais valores coadunam com os valores de Nogueira e Rendeiro (2008), que encontraram para a casca da castanha-do-brasil carbono fixo em torno de 27,1%. Esta média entre os tratamentos estão abaixo da literatura especializada que denota um valor desejável de 20-30% que implica numa queima mais fácil e rapidamente consumível durante a combustão (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008).

Também, extraiu-se que a correlação entre o PCS e o TCF foi negativo em (-0,60), indicando uma relação inversa entre eles. O Gráfico 13 apresenta essa relação:

Gráfico 13 - Dispersão do PCS em função do TCF

Fonte: Dados da Pesquisa.

Visualmente observa-se, Gráfico 13, que o PCS diminui mesmo com o aumento do TCF, o que pode ser atribuído ao comportamento dos materiais voláteis, que possuem entre outros elementos o hidrogênio que possui um bom poder calorífico, mas quando é eliminado junto a outros materiais voláteis causaria uma redução do PCS (FARIAS, 2012).

5 CONCLUSÕES

A confecção dos briquetes foi realizado por meio de um Delineamento Inteiramente Casualizado com 5 repetições, sendo o fator de variação o percentual das biomassas, com correção de umidade (na faixa de 10 a 12% conforme a literatura), com granulometria maior ou igual a 7 *mesh* (grãos menores ou iguais a 2,83mm), tempo de prensagem de 120 segundos (2 minutos) e pressão de prensagem de 15 toneladas.

Na caracterização mecânica foram realizados análise das seguintes propriedades: expansão longitudinal, densidade aparente, poder calorífico superior, densidade energética e resistência à compressão. As propriedades densidade aparente e densidade energética apresentaram resultados estatisticamente não significativos a um nível de confiança de 95%, enquanto o poder calorífico superior e resistência à compressão, pelo menos uma das médias diferiram estatisticamente entrem si.

Na análise do Poder Calorífico Superior averiguou-se que decai na medida que há um incremento do percentual da casca da castanha-do-brasil, ou seja, há uma relação inversa, variando entre 4,14 a 4,05 kJ/kg. Dentre os tratamentos, o tratamento T6 (50% de cada biomassa) se mostrou estatisticamente mais elevado denotando elevado potencial energético em comparação aos demais.

Quanto a resistência à compressão, também observou uma relação inversa entre a propriedade e o percentual de casca da castanha-do-brasil utilizado nas amostras. Dentre os tratamentos, T6 foi o terceiro maior com 60,20 kgf, também denotando qualidade do produto, já que representa os esforços compressivos na estocagem e no transporte.

Na caracterização físico-química foram realizados por meio da análise imediata, ou seja, determinação dos teores: umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Os resultados apontam em torno de 10,35% para teor de umidade, de 1,95% para teor de cinzas, de 79,66% para teor de materiais voláteis e, 18,39%, em que ambos coadunam com os valores encontrados na literatura científica (QUIRINO e BRITO, 1991; NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008; DIAS et al., 2012; VIRMOND et al., 2012).

Em síntese, através dos experimentos realizados, pode-se afirmar a possibilidade de aplicação do uso da casca da castanha-do-brasil para briquetagem, sem necessidade de aglutinantes (ou ligante) para a formação de briquetes em prensa hidráulica e sem utilização de pré-aquecimentos.

Os resultados do PCS são favoráveis ao reaproveitamento da casca da castanha-do-brasil, devido ao potencial energético dos briquetes contendo esses resíduos, notadamente quando acrescido de serragem na proporção 1:1 (Tratamento T6).

No entanto, aqui ressalta a necessidade do aprofundamento de pesquisas relacionados as propriedades como a densidade aparente e densidade energética, a fim de obter melhores *insights*, principalmente para ser implementado nas indústrias como valor comercial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL: Atlas de Energia Elétrica.** Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2005.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1755-01: Standard Test Method for Ash in Biomass.** [S.l.], p. 3p. 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E711-87: Standard Teste Methods for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by Bomb Calorimeter.** [S.l.], p. 8p. 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E870-82: Standard Test Methods for Analysis of Woods Fuels.** [S.l.], p. 2p. 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E871-82: Standard Teste Method Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels.** [S.l.], p. 2p. 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E872-82: Standard Teste Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels.** [S.l.], p. 3p. 2006.
- ARAUJO, H. J. B. D. **Aproveitamento de resíduos das indústrias de serraria do Acre para fins energéticos.** Embrapa - Acre. Rio Branco, p. 38p. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923: Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra.** [S.l.]. 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Determinação da composição granulométrica.** [S.l.]. 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Carvão vegetal - Análise Imediata - Método de ensaio.** [S.l.]. 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633: Determinação do poder calorífico.** [S.l.]. 1984.
- BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory.** [S.l.]: Academic Press, 2010.
- BEN. **Balanco Energético Nacional.** Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2019.
- CARMONA, I. N. et al. **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de castanha-do-pará (Bertholletia excelsa Bonpl.** In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis. **Anais.** 2017.

CARVALHO, A. D.; BRINCK, V. Briquetagem. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratament de Minérios**. 5ª Edição. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap. 16, p. 683-702.

CAVALCANTE, P. B. **Frutas Comestíveis da Amazônia**. 5ª. ed. Belém: CNPQ: Museu Paraense Emílio Goeldi, 1991. 279 p.

CHISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, p. 80. 2011.

CIAMPI, G. J. D. S. **Desenvolvimento de um calorímetro para a determinação do conteúdo energético de combustíveis sólidos**. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Federal de Campinas. Campinas, p. 105. 1992.

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS - **COPANT 464: Maderas: método de determinacion de la compresión axial o paralela al grano**. [S.l.]. 1972.

CORTEZ, L. A. B. Caracterização da Biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. p. 31-60.

DIAS, J. M. C. D. S. et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, adroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia - Documentos (INFORTECA-E)**, Brasília, 2012.

ESTEVES, M. R. L.; ABUD, A. K.; BARCELLOS, K. M. Avaliação do potencial energético das cascas de coco verde para aproveitamento na produção de briquetes. **Scientia Plena**, 2015.

FARIAS, F. O. M. **Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 113. 2012.

FELFLI, F. F. et al. Biomassa briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bionergy**, 2011. 236-242.

FERNANDEZ, B. O. et al. Características Mecânicas e Energéticas de Briquetes Produzidos a partir de Diferentes Tipos de Biomassa. **Revista Virtual de Química**, 9, 2017. 29-38.

GONÇALVES, J. E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis**. Univerisdade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho". [S.l.], p. 119. 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**, Campina Grande, 2009. 657-661.

GUERRA, R. S.; NOGUEIRA, M. F. M. Caracterização da Geração de Energia Elétrica na Amazônia. In: RENDEIRO, G., et al. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida -**

Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª Edição. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. Cap. Capítulo 1, p. 19-28.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração vegetal e da Silvicultura.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [S.l.]. 2017.

KLEINLEIN, W. A. **Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas.** Universidade Federal do Pará. Belém. 2010.

KUNRATH, N. F. **Avaliação de briquetes produzidos a partir da casca de coco do mumbuca (*Astrocaryum spp*) para diferentes fins energéticos.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Acre. Rio Branco, p. 101. 2016.

NASCIMENTO, V. F. **Caracterização de biomassas amazônicas - ouriço de castanha-do-brasil, ouriço de sapucaia e caroço do fruto do tucumã - visando sua utilização em processos de termoconversão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 148. 2012.

NOGUEIRA, M. F. M. Princípios para uso de biomassa como combustível. In: RENDEIRO, G., et al. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida - Soluções Energéticas para a Amazônia.** [S.l.]: Ministério de Minas e Energia, 2008. Cap. 2, p. 29-50.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética da biomassa vegetal. In: RENDEIRO, G., et al. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida - Soluções Energéticas para a Amazônia.** [S.l.]: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NOGUEIRA, R. M. et al. Avaliação da carbonização do ouriço da castanha-do-brasil em forno tipo tambor. **Embrapa-Acre - Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2014.

OLIVEIRA, J. M. D. C. D.; LOBO, P. C. Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica. **Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural**, 2002.

OLIVEIRA, R. R. L. D. **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba, p. 80. 2013.

PAULA, L. E. D. R. E. et al. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, 2011. 103-112.

PEREIRA, D. T. D. O.; NOBRE, J. R. C.; BIANCHI, M. L. Energy quality of waste from Brazil nut (*bertholletia excelsa*), in the state of Pará. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 5, n. n. 4, 2019. 3258-3265.

PESSOA FILHO, J. S. **Análise Térmica e Energética de Briquetes de Capim Braquiária.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, p. 110. 2013.

PIMENTA, S. et al. Utilização de resíduos de coco (cocos nucifera) carbonizado para a produção de briquetes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, 2015. 137-144.

- PROTÁSIO, T. D. P. **Biomassa residual do coco babaçu: Potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras. Lavras. P. 173. 2014.
- PROTÁSIO, T. D. P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, 31, 2011. 273-283.
- PROTÁSIO, T. D. P. et al. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 16, 2012. 1252-1258.
- PROTÁSIO, T. D. P. et al. Qualidade e avaliação energética do carvão vegetal dos resíduos do coco babaçu para uso siderúrgico. **Ciência e Agrotecnologia**, 38, n. n. 5, 2014. 435-444.
- QUIRINO, W. F. et al. Poder Calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Biomassa & Energia**, 1, 2004. 173-182.
- QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991.
- RENDEIRO, G. Pré-tratamento da biomassa. In: RENDEIRO, G., et al. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida - Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. Cap. Capítulo 4, p. 64-72.
- RODRIGUES, T. O. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. Universidade de Brasília. [S.l.], p. 82. 2009.
- SANTOS, O. V. D. **Estudo das potencialidades da castanha-do-brasil: produtos e subprodutos**. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 215. 2012.
- SELLIN, N. et al. Use of Banana culture wast to produce briquettes. **Chemical Engineering Transactions**, 32, 2013. 349-354.
- SILVA, D. A. D. et al. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, 45, n. n. 4, 2015. 713-722.
- SOARES, L. D. S. et al. Utilização de Resíduos de Borra de café e Serragem na Modelagem de Briquetes e Avaliação de Propriedades. **Revista Matéria**, 2015. 550-560.
- TOLMASQUIM, M. **Plano Nacional de energia 2030**. Conselho Nacional de Política Energética - CNPE. Brasília. 2007.
- VASSILEV, S. et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, 89, 2010. 913-933.
- VASSILEV, S. V. et al. An overview of the organic and inorganic phase compotion of biomass. **Fuel**, 94, 2012. 1-33.

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; VASSILEVA, C. G. An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic. **Fuel**, 112, 2013. 391-449.

VIRMOND, E. et al. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management**, 32, October 2012. 1952-1961.

ZHU, X. et al. Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated biomass based bioenergy industry. **Bioresource Technology**, 2011. 1344-1351.

APÊNDICE A - Identificação dos teores de umidade das biomassas

Tipos de Biomassas	Amostras	Tara do Cadinho [g]	Massa Inicial da Biomassa [g]		Massa verificada na 1ª Pesagem [g]		Massa verificada na 2ª Pesagem [g]		
			Data e Hora: 14/11/2018 às 09h:35min		Data e Hora: 14/11/2018 às 11h:48min		Data e Hora: 14/11/2018 às 13h:59min		
Serragem de Jacarandá - SJ	SJ1	31,6884	5,0000		36,0276		36,0217		
	SJ2	32,1359	5,0000		36,4681		36,4677		
	SJ3	37,1243	5,0000		41,4538		41,4527		
Casca da Castanha do Brasil - CB	CB1	34,7496	5,0000		39,0047		39,0013		
	CB2	34,1178	5,0000		38,3777		38,3749		
	CB3	32,9891	5,0000		37,2476		37,2468		
Tipos de Biomassas	Amostras	Tara do Cadinho [g]	VALORES REAIS DO TEOR DE UMIDADE DAS BIOMASSAS						
			Massa Inicial	Massa da 1ª Pesagem	Umidade Extraída da Amostra em relação a Massa Inicial [%]	Massa da 2ª Pesagem (Esta será a Massa Final)	Umidade Extraída da Amostra em relação a Massa da 1ª Pesagem [%]	Teor de Umidade da Massa Inicial de Biomassa	Média do Teor de Umidade da Massa Inicial de Biomassa
Serragem de Jacarandá - SJ	SJ1	31,6884	5,0000	4,3392	13,2160	4,3333	0,1360	15,3855	15,4424
	SJ2	32,1359	5,0000	4,3322	13,3560	4,3318	0,0092	15,4255	
	SJ3	37,1243	5,0000	4,3295	13,4100	4,3284	0,0254	15,5161	
Casca da Castanha do Brasil - CB	CB1	34,7496	5,0000	4,2551	14,8980	4,2517	0,0799	17,6000	17,4951
	CB2	34,1178	5,0000	4,2599	14,8020	4,2571	0,0657	17,4508	
	CB3	32,9891	5,0000	4,2585	14,8300	4,2577	0,0188	17,4343	

Fonte: Arquivo do autor.

APÊNDICE B - Correção dos teores de umidade das biomassas

CORREÇÃO DOS TEORES DE UMIDADE PARA EFEITO COMPARATIVO COM OS PRÉ-TESTES SEM SECAGEM INICIAL										
CADINHO	TARA DO CADINHO [g]	MASSA INICIAL (APENAS BIOMASSA) [g]	TEMPO DE ESTUFA [h:min:s]	MASSA (BIOMASSA E CADINHO) APÓS TEMPO [g]	MASSA FINAL PÓS SECAGEM (APENAS BIOMASSA) [g]	DIFERENÇA ENTRE MASSAS INICIAL E FINAL (APENAS BIOMASSA) [g]	MASSA TOTAL APÓS SECAGEM DE 1h [g]	MASSA (APENAS BIOMASSA) APÓS SECAGEM DE 1h [g]	TEORES DE UMIDADE [%]	TEOR MÉDIO DE UMIDADE [%]
1C -	31,6889	14,5259	00:10:00	45,8385	14,1496	0,3763				
1M -	34,7503	14,5098	00:08:00	48,8241	14,0738	0,4360				
2C -	32,1363	14,5311	00:10:00	46,3002	14,1639	0,3672				
2M -	34,1172	14,2530	00:08:00	47,9392	13,8220	0,4310				
3C -	37,1254	14,5866	00:10:00	51,3232	14,1978	0,3888				
3M -	32,9868	14,5412	00:08:00	47,0481	14,0613	0,4799				
CADINHO	TARA DO CADINHO [g]	MASSA INICIAL (APENAS BIOMASSA) [g]	TEMPO DE ESTUFA [h:min:s]	MASSA (BIOMASSA E CADINHO) APÓS TEMPO [g]	MASSA FINAL PÓS SECAGEM (APENAS BIOMASSA) [g]	DIFERENÇA ENTRE MASSAS INICIAL E FINAL (APENAS BIOMASSA) [g]	47,5710	12,9854	9,3028	9,2343
1 TU(C)	34,5856	14,5723	00:10:00	48,7790	14,1934	0,3789				
2 TU(C)	34,5874	14,5956	00:10:00	48,7749	14,1875	0,4081				
3 TU(C)	34,5892	14,5423	00:10:00	48,7792	14,1900	0,3523				
1 TU(M)	36,1588	14,5564	00:08:00	50,2596	14,1008	0,4556				
2 TU(M)	36,1758	14,5659	00:08:00	50,2699	14,0941	0,4718				
3 TU(M)	36,1639	14,5394	00:08:00	50,2764	14,1125	0,4269	49,2014	13,0426	8,1134	8,2205
2 TU(M)	36,1758	14,5659	00:08:00	50,2699	14,0941	0,4718				
3 TU(M)	36,1639	14,5394	00:08:00	50,2764	14,1125	0,4269				

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa

APÊNDICE C - Esquema de tratamentos para produção de briquetes

ESQUEMA DE TRATAMENTOS PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES								
Tratamento	Repetição	Pressão [t]	Granulometria [mesh]	Composição [%]		Temperatura Ambiente [° C]	Tempo de Prensagem [s]	Simbologia do Tratamento
				Casca da Castanha-do-Brasil	Serragem de Jacarandá			
T ₁	R ₁	15	≥ 7	0	100	26 ± 1	120	T ₁ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	0	100	26 ± 1	120	T ₁ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	0	100	26 ± 1	120	T ₁ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	0	100	26 ± 1	120	T ₁ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	0	100	26 ± 1	120	T ₁ R ₅
T ₂	R ₁	15	≥ 7	10	90	26 ± 1	120	T ₂ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	10	90	26 ± 1	120	T ₂ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	10	90	26 ± 1	120	T ₂ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	10	90	26 ± 1	120	T ₂ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	10	90	26 ± 1	120	T ₂ R ₅
T ₃	R ₁	15	≥ 7	20	80	26 ± 1	120	T ₃ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	20	80	26 ± 1	120	T ₃ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	20	80	26 ± 1	120	T ₃ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	20	80	26 ± 1	120	T ₃ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	20	80	26 ± 1	120	T ₃ R ₅
T ₄	R ₁	15	≥ 7	30	70	26 ± 1	120	T ₄ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	30	70	26 ± 1	120	T ₄ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	30	70	26 ± 1	120	T ₄ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	30	70	26 ± 1	120	T ₄ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	30	70	26 ± 1	120	T ₄ R ₅
T ₅	R ₁	15	≥ 7	40	60	26 ± 1	120	T ₅ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	40	60	26 ± 1	120	T ₅ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	40	60	26 ± 1	120	T ₅ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	40	60	26 ± 1	120	T ₅ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	40	60	26 ± 1	120	T ₅ R ₅
T ₆	R ₁	15	≥ 7	50	50	26 ± 1	120	T ₆ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	50	50	26 ± 1	120	T ₆ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	50	50	26 ± 1	120	T ₆ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	50	50	26 ± 1	120	T ₆ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	50	50	26 ± 1	120	T ₆ R ₅
T ₇	R ₁	15	≥ 7	60	40	26 ± 1	120	T ₇ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	60	40	26 ± 1	120	T ₇ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	60	40	26 ± 1	120	T ₇ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	60	40	26 ± 1	120	T ₇ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	60	40	26 ± 1	120	T ₇ R ₅
T ₈	R ₁	15	≥ 7	70	30	26 ± 1	120	T ₈ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	70	30	26 ± 1	120	T ₈ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	70	30	26 ± 1	120	T ₈ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	70	30	26 ± 1	120	T ₈ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	70	30	26 ± 1	120	T ₈ R ₅
T ₉	R ₁	15	≥ 7	80	20	26 ± 1	120	T ₉ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	80	20	26 ± 1	120	T ₉ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	80	20	26 ± 1	120	T ₉ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	80	20	26 ± 1	120	T ₉ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	80	20	26 ± 1	120	T ₉ R ₅
T ₁₀	R ₁	15	≥ 7	90	10	26 ± 1	120	T ₁₀ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	90	10	26 ± 1	120	T ₁₀ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	90	10	26 ± 1	120	T ₁₀ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	90	10	26 ± 1	120	T ₁₀ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	90	10	26 ± 1	120	T ₁₀ R ₅
T ₁₁	R ₁	15	≥ 7	100	0	26 ± 1	120	T ₁₁ R ₁
	R ₂	15	≥ 7	100	0	26 ± 1	120	T ₁₁ R ₂
	R ₃	15	≥ 7	100	0	26 ± 1	120	T ₁₁ R ₃
	R ₄	15	≥ 7	100	0	26 ± 1	120	T ₁₁ R ₄
	R ₅	15	≥ 7	100	0	26 ± 1	120	T ₁₁ R ₅

Fonte: Elaboração a partir dos dados da pesquisa.

APÊNDICE D - Análise de variância para a variável resposta densidade aparente, considerando composição das biomassas (tratamentos)

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	FC	P-VALOR
Tratamento	10	0,00892	0,000892	1,15	0,349*
Erro	44	0,034119	0,000775		
Total Corrigido	54	0,043038			
TESTE Kruskal-Wallis					
	10				<i>p</i> -valor = 0,027

* *p*-valor > 0,05, estatisticamente não significativo a 5% pelo Teste F.

APÊNDICE E - Análise de variância para a variável resposta carga máxima, considerando composição das biomassas (tratamentos)

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	FC	P-VALOR
Tratamento	10	26150,3	2615,03	138,91	0,00*
Erro	44	828,3	18,82		
Total Corrigido	54	26978,6			
TESTE Kruskal-Wallis					
	10				<i>p</i> -valor = 0,000*

* *p*-valor < 0,05, estatisticamente significativo a 5% pelo Teste F.

APÊNDICE F - Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior, considerando composição das biomassas (tratamentos)

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	FC	P-VALOR
Tratamento	10	29792	2979	2,74	0,010*
Erro	44	4725	1089		
Total Corrigido	54	77717			
TESTE Kruskal-Wallis					
	10				<i>p</i> -valor = 0,002*

* *p*-valor < 0,05, estatisticamente significativo a 5% pelo Teste F.

APÊNDICE G - Análise de variância para a variável resposta poder calorífico superior, considerando composição das biomassas (tratamentos), sem as testemunhas (T1 e T11)

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	FC	P-VALOR
Tratamento	8	836	104,5	2,33	0,04*
Erro	36	1618	44,95		
Total Corrigido	44	2454,1			
TESTE Kruskal-Wallis					
	10				$p\text{-valor} = 0,061^{**}$

* $p\text{-valor} < 0,05$, estatisticamente significativo a 5% pelo Teste F.

** $p\text{-valor} < 0,10$, estatisticamente significativo a 10% pelo Teste F.

APÊNDICE H - Análise de variância para a variável resposta densidade energética, considerando composição das biomassas (tratamentos)

ANOVA					
FV	GL	SQ	QM	FC	P-VALOR
Tratamento	10	0,2994	0,02994	0,73	0,69*
Erro	44	1,7988	0,04088		
Total Corrigido	54	2,0982			
TESTE Kruskal-Wallis					
	10				$p\text{-valor} = 0,028^{**}$

* $p\text{-valor} > 0,05$, estatisticamente não significativo a 5% pelo Teste F.

** $p\text{-valor} < 0,05$, estatisticamente significativo a 5% pelo Teste F.