

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

Evaluation of briquettes produced from Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) bark waste mixture and rosewood (*Dalbergia sp.*) Sawdust for energy purposes

DOI:10.34117/bjdv5n10-192

Recebimento dos originais: 11/09/2019

Aceitação para publicação: 15/10/2019

Jairo Batista Dias

Mestrando em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia do Programa de Pós-Graduação – PPG CITA/Universidade Federal do Acre – UFAC.

Endereço: Estrada Dias Martins, 507, Residencial Saint Germain, apto 404, Jardim de Alah, Rio Branco, Acre. CEP: 69.915-522. Contato: (68) 9 9911-2930.

E-mail: jairobdias@gmail.com

Carlos Eduardo Garção de Carvalho

Prof. Dr. Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN/Universidade Federal do Acre – UFAC.

Endereço: Rua Maria Francisca Ribeiro, 174 – Residencial Calafate II, Bloco A06, apto. 303, Calafate, Rio Branco, Acre. CEP: 69.914-316. Contato: (68) 9 9238-2393.

E-mail: carlosgarcao.ufac@gmail.com

Patrícia Gomes Ribeiro Amorim

Engenheira Florestal, Prof^a. Dr^a. Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN/Universidade Federal do Acre – UFAC.

Endereço: Rodovia AC 10 n. 1528, Bloco 2 Apto. 4 – Condomínio Reserva do Bosque, Rio Branco, Acre. CEP: 69.921-282. Contato: (68) 9 9930-1313.

E-mail: patriciagomesribeiro@gmail.com

Edcarlos Miranda de Souza

Prof. Dr. Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN/Universidade Federal do Acre – UFAC.

Endereço: Rua Francisco Vieira, N 48, Bairro Floresta Sul. CEP: 69.912-341.

E-mail: profedcarlos@hotmail.com

Nadma Farias Kunrath

Mestre em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia.

Endereço: Rua Recanto Verde, 350 - Residencial Riviera Dei Fiori, Quadra 3 - Casa 21. Bairro Conjunto Mariana, Rio Branco, Acre. CEP: 96.919-182. (68) 9 9926-1545.

E-mail: nadfak@gmail.com

Délcio Dias Marques

Prof. Dr. Centro de Ciências Biológicas e da Natureza – CCBN/Universidade Federal do Acre – UFAC.

Endereço: Rua Narciso José de Lima, 145, Guiomard Santos, Rio Branco, Acre, CEP:
69.901-399. Contato: (68) 9 8402-2040.
E-mail: delciomarques@globo.com

RESUMO

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 a serragem da madeira de jacarandá, sendo estes em modelos experimentais. Especificamente, analisou-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 de 15 toneladas, granulometria única de 7 *mesh* (tamanho dos grãos menores ou iguais a 2,83 mm), temperatura ambiente de 26 °C e tempo de prensagem de 120 segundos. Na caracterização mecânica identificou-se diferenças estatisticamente significativas a 5% entre os tratamentos para o PCS e resistência à compressão, dos quais, em ambos identificou-se 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 a análise imediata, obteve-se TU de 10,35%, TC de 1,95%, TMV de 79,66% e TCF de 18,39%, valores que coadunam com a literatura.

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

ABSTRACT

The present study seeks to analyze the energy potential, as well as the heat release from the combustion of biomass residues, Brazil nut shell briquettes mixed with rosewood sawdust, which are in experimental models. The mechanical and physicochemical characteristics to measure the energy potential of the briquettes produced. The results of the assays were carried out by means of a one-factor Fully Randomized Design (DIC) with 11 treatments (staggered in the biomass mixture) and five replications. The parameters defined for the production of briquettes were compaction pressure of 15 tons, single mesh size of 7 mesh (grain size less than or equal to 2.83 mm), ambient temperature of 26 °C and pressing time of 120 seconds. The mechanical characterization identified statistically significant differences at 5% between treatments for PCS 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 immediate analysis, TU of 10.35%, TC of 1.95%, TMV of 79.66% and TCF of 18.39% were obtained, values that are in line with the literature.

Keywords: Briquette. Biomass. Sawdust. Brazil nuts.

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, MORIS, *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, Mesa, *et al.* (2011), Paula, Trugilho, *et al.* (2011) e Soares, Moris, *et al.* (2015) analisam o uso de resíduos facilmente obtidos na Região Sudeste; bem como Protásio *et al.* (2011) e Sellin, Oliveira, *et al.* (2013) ao avaliar os resíduos na Região Sul do Brasil; e Protásio, Alves *et al.* (2011) e Protásio (2014) com biomassa da Região Norte; e, Vale, Gentil, *et al.* (2007) ao avaliar casca de grãos de café e serragem na Região Centro Oeste.

Neste íterim, 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 (ARAUJO, 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 termoeletricas 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 de serraria 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 (ARAUJO, 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 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCAL DE EXECUÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada nas dependências da Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – FUNTAC, situado 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.

2.2 COLETA DOS RESÍDUOS

2.2.1 Casca da castanha-do-brasil

Os resíduos foram coletados na Usina de Beneficiamento de castanhas-do-brasil da COOPERACRE, localizada às 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, as quais foram encaminhadas e armazenadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da FUNTAC. 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 à mesma, seja em ganho no potencial energético, seja na redução de custo na compra de insumos.

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, Etipaciolândia, Xapuri e Sena Madureira, todas no Estado do Acre.

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

2.2.2 Madeira

Os resíduos da madeira, foram coletados no Galpão dos Marceneiros Comunitários, 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. Extraiu-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.

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.

2.3 PREPARAÇÃO DAS BIOMASSAS

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 desintegrador, da marca VENCEDORA MAQTRON, modelo B-609, com o propósito de que fosse feita a captação da biomassa já processada.

Assim, toda a massa utilizada na pesquisa possui tamanho médio de grão de 2,83 milímetros 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, tendo sido processadas 2 (dois) quilogramas de cada biomassa.

2.4 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 mecânica orbital com 250 rpm fixa. 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 (1):

$$M = (MR/MT) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: (*M*) é o percentual do 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, Yamaji, *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).

2.5 PRÉ-TESTES: PRINCIPAIS PARÂMETROS

No intuito de estabelecer as melhores condições para a formação dos briquetes, foram realizadas consultas em trabalhos pré-existentes 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.

O primeiro parâmetro é o tamanho de cada amostra, que optou-se por 20 gramas. Na busca dos 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).

Após os testes realizados, definiu-se os parâmetros para a produção dos briquetes assim especificados: pressão de compactação de 15 toneladas, granulometria única de 7 *mesh* (tamanho dos grãos menores ou iguais a 2,83 mm), temperatura ambiente de 26 °C e tempo de prensagem de 120 segundos.

2.6 EXECUÇÃO DA PRODUÇÃO DOS BRIQUETES

2.6.1 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. Posteriormente, as biomassas tornaram a ser armazenadas em sacos plásticos devidamente lacrados e identificados e, por conseguinte, foram armazenadas dentro de dessecador com sílica gel, local no qual pernoitaram.

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

2.6.2 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 Fundação de Tecnologia do Estado do Acre – 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. 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, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Esquema de tratamentos para produção de briquetes

Tratamentos	Número de repetição	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.

2.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BRIQUETES PRODUZIDOS**2.7.1 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, de acordo com o sugerido em Oliveira (2013), sendo a primeira medição logo após a produção dos briquetes, e as seguintes ao término das 24, 72 e 120 horas, respectivamente.

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 (2) a seguir:

$$El = ((l_f - l_o) / l_o) \cdot 100 \quad (2)$$

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-72h (de vinte e quatro até as setenta e duas horas); *iii*) de 72h-120h (de setenta e duas até as cento e vinte horas) e; *iv*) de 0h-120h (de zero até cento e vinte horas).

2.7.2 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 (Vol_{br}) 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 (3) a seguir:

$$Vol_{br} = ((\pi \cdot \emptyset^2 \cdot h) / 4) / 1000 \quad (3)$$

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, calculou-se a densidade aparente do briquete (ρ_a) que é a razão entre a massa do briquete (m) e o volume do briquete ($volbr$), conforme a equação (4) a seguir:

$$(\rho_a) = (m) / (volbr) \quad (4)$$

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

2.7.3 Resistência à compressão diametral

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), 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.

2.7.4 Poder calorífico

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.

Primeiro, inseriu-se em média de 0,33 g de matéria, isenta de umidade no interior de uma capsula denominada bomba calorimétrica. Ato contínuo, acoplou-se a bomba no interior do calorímetro adiabático de marca IKA e modelo C-200, 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 [$cal \cdot g^{-1}$] diretamente no visor do calorímetro, equivalente à unidade [$kcal \cdot kg^{-1}$].

2.7.5 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 fornece a densidade energética, conforme a equação (5):

$$(\rho_e) = (\rho_a) \cdot (PCS) / (1.000.000) \quad (5)$$

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 [$\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$].

2.8 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS BIOMASSAS BRIQUETADAS

2.8.1 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 0,0001g 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, com circulação de ar, sendo posteriormente ajustada de forma a obter $103 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, pelo período de 120 minutos.

Ao término deste tempo, as amostras foram resfriadas em dessecador com sílica gel por 15 minutos, ou até que sua temperatura torne-se 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 (6) a seguir:

$$(TU) = ((M0 - M1) / M0) \cdot 100 \quad (6)$$

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].

2.8.2 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, marca QUIMIS, onde este deverá ser

previamente aquecido a uma temperatura de 900 °C, com tolerância de mais ou menos 10 °C, permanecendo nesta posição por 3 minutos.

Ato contínuo, o cadinho foi posicionado dentro do forno mufla com a porta fechada e permaneceu desta forma por 7 minutos. Após esse processo, o material foi resfriado em 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 (7) a seguir:

$$(TV) = ((M_i - M_f) / M) \cdot 100 \quad (7)$$

Onde: (*TV*) é dado em [%]; (*M_i*) é dado em [g]; (*M_f*) é dado em [g]; e (*M*) em [g].

2.8.3 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 (*M₁*) e a massa do cadinho (*M₀*), dividido pela massa da biomassa residual seca (*M*), tudo multiplicado por cem, conforme equação (8) a seguir:

$$(CZ) = ((M_1 - M_0) / M) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde: (CZ) é dado em [%]; $(M0)$ é dado em [g]; $(M1)$ é dado em [g]; e (M) em [g].

2.8.4 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 (9) a seguir:

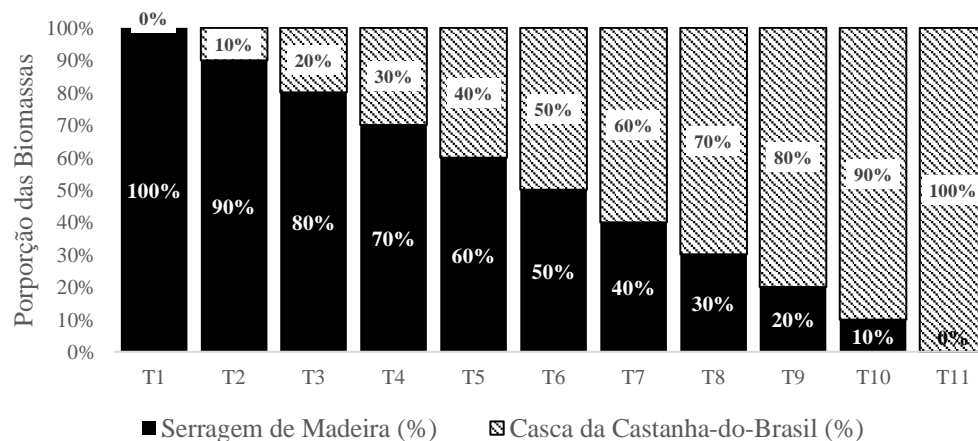
$$(CF) = 100 - (CZ + TV) \quad (9)$$

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

2.9 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 19.0*.

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 o modelo:

$$y_{ij} = m + t_i + \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

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.

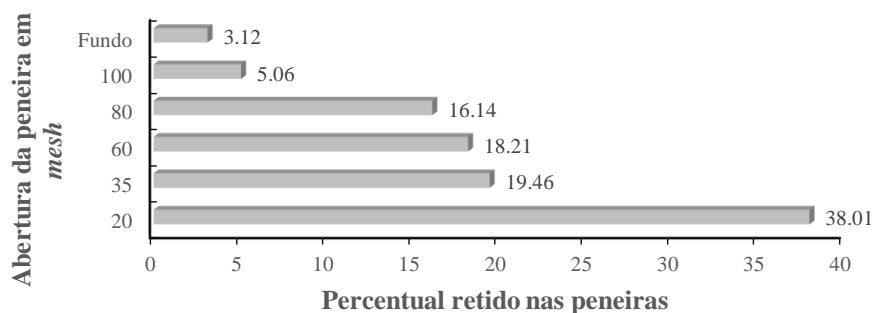
Para complementar os testes, optou-se também por um teste não paramétrico (teste sem distribuições) sempre que a pressuposição de normalidade dos resíduos fosse afetada. Para contornar estes problemas, realizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para determinar as medianas de dois ou mais grupos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

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 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, Alves, *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.

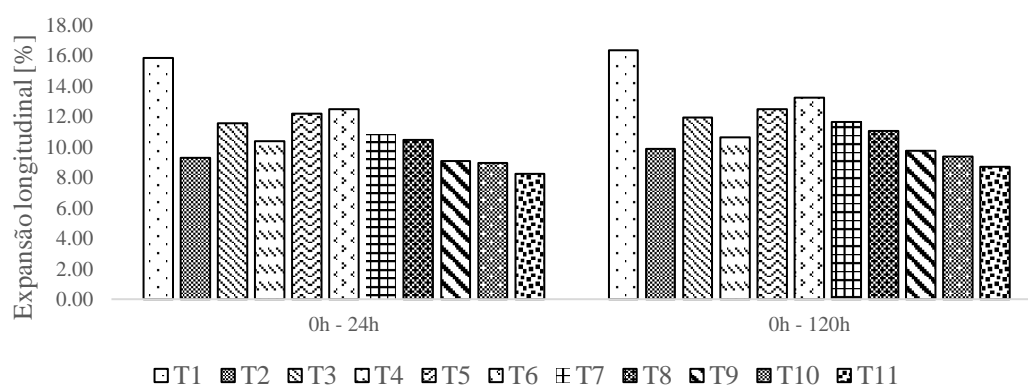
3.2 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS BRIQUETES

3.2.1 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.

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.

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).

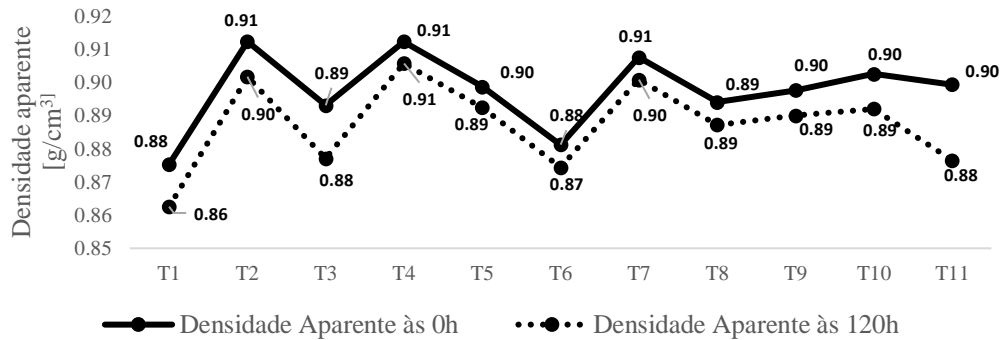
A compactação dos resíduos e a expansão longitudinal é influenciada pela granulometria utilizada para confecção dos briquetes (FERNANDEZ, GONÇALVES, *et al.*, 2017). Observando a classificação granulométrica do material, no que tange o tamanho de partícula utilizada para confecção dos briquetes (Gráfico 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).

3.2.2 Densidade aparente

O Gráfico 4 apresenta os valores médios da densidade aparente dos briquetes, em g/cm^3 , por tratamento, considerando o tempo após compactação.

Gráfico 4 - 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 F. Em outras palavras, os tratamentos analisados apresentaram estatisticamente a mesma média de densidade aparente.

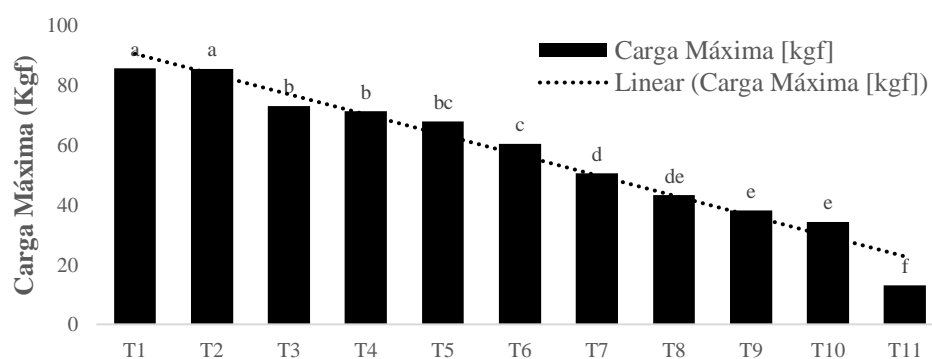
Dias, Souza, *et al.* (2012) ressaltam que a análise da densidade aparente é de suma importância para a compactação, uma vez que quanto maior a densidade, maior a razão energia/volume. Além do mais, destaca que produtos de alta densidade são desejáveis em termos de transporte, armazenamento e manuseio.

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 comento, 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.

3.2.3 Resistência à compressão diametral

O Gráfico 5 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 5 - Resistência à compressão diametral dos briquetes em função dos tratamentos



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 a 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, MORIS, *et al.*, 2015).

Sabe-se que tanto as fibras de 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, MORIS, *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 deprenderia 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, ALVES, *et al.*, 2011).

3.2.4 Poder calorífico

O poder calorífico é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis de biomassas (PROTÁSIO, ALVES, *et al.*, 2011). 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*) fazendo com que a ANOVA perdesse seu poder sensível de teste.

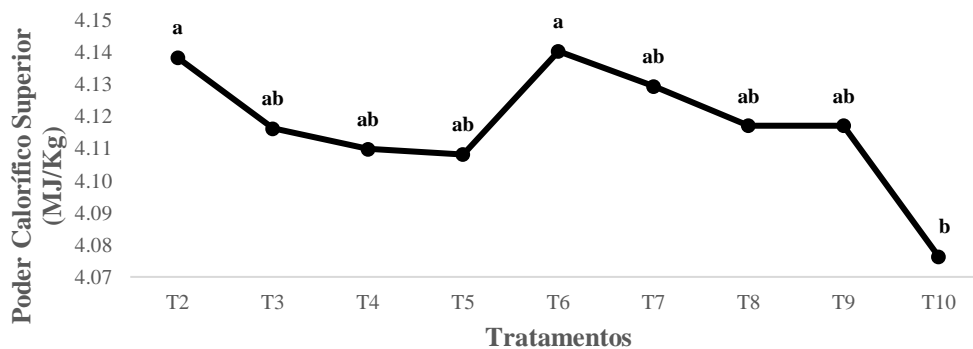
Outlier é uma observação que apresenta um grande afastamento das demais da série e normalmente implica em prejuízos de interpretação dos resultados de testes estatísticos aplicados a amostra. Para contornar tal situação, excluíram-se as testemunhas e realizou-se a ANOVA e o teste Tukey para identificar tratamentos que diferem entre si.

O Gráfico 6 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.

É possível inferir que o PCS tem uma relação inversa com a quantidade de casca da castanha-do-brasil utilizada nos tratamentos, ou seja, na medida que há um incremento do percentual da biomassa proveniente da casca da castanha-do-brasil, há um decaimento do PCS. Em geral, o PCS varia em torno de 4,14, em média, com coeficiente de variação de 2,46% e desvio padrão de 0,10.

Gráfico 6 - Poder calorífico sem incluir as testemunhas (T1 e T11)



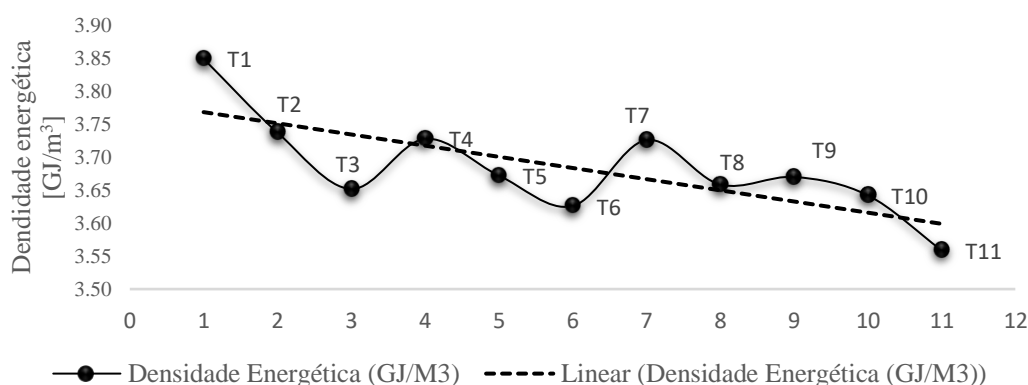
Fonte: Dados da Pesquisa

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

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.

3.2.5 Densidade energética

O Gráfico 7 apresenta os valores médios encontrados na determinação 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, todavia, encontrou-se diferença significativa 5% pelo teste Kruskal-Wallis (teste não paramétrico).

Gráfico 7 - Densidade energética em função dos tratamentos

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, já se percebe 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.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS BRIQUETES

A Tabela 2 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 2 - 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, SOUZA, *et al.*, 2012; VIRMOND, SENA, *et al.*, 2012).

Uma correlação negativa de (-0,55) foi identificada 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 8 que apresenta esta relação.

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, SOUZA, *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 negativa⁴ de (-0,71), ratificando a literatura (QUIRINO e BRITO, 1991), conforme demonstrado no Gráfico 9.

Gráfico 8 - Dispersão do PCS em função do TU

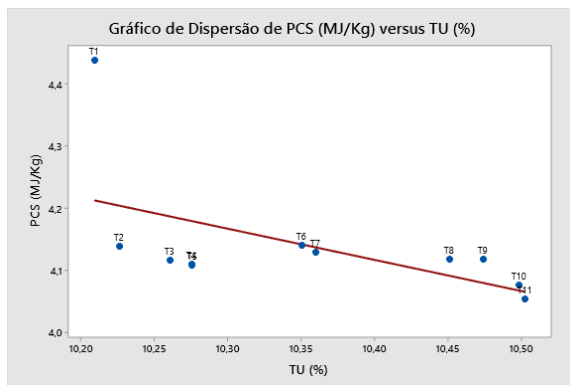
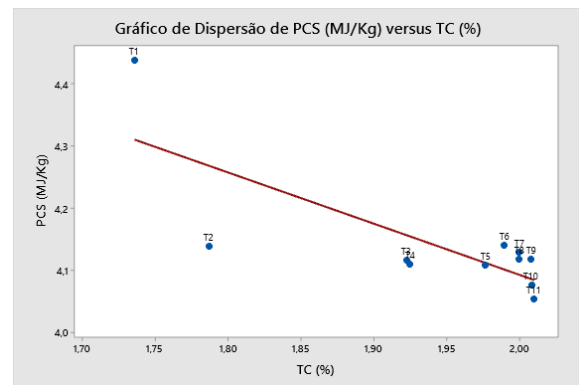


Gráfico 9 - Dispersão do PCS em função do TC



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, SOUZA, *et al.*, 2012; VIRMOND, SENA, *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 10.

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.

Gráfico 10 - Dispersão do PCS em função do TMV

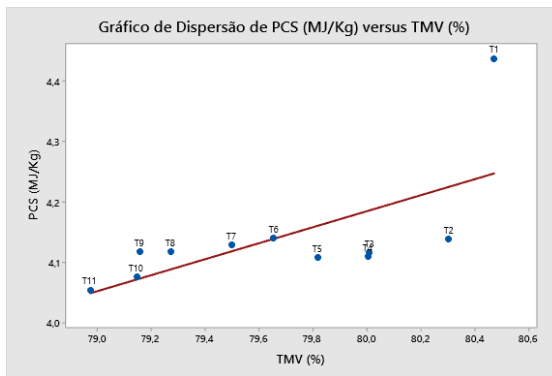
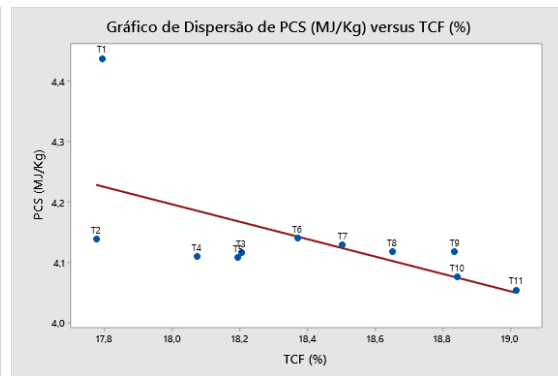


Gráfico 11 - Dispersão do PCS em função do TCF



Fonte: Dados da Pesquisa.

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 se extraiu que a correlação entre o PCS e o TCF foi negativa em (-0,60), indicando uma relação inversa entre eles, conforme verifica-se no Gráfico 11 que apresenta essa relação. Visualmente observa-se, 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).

4 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 realizadas 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 em 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 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, ressalta-se a necessidade do aprofundamento de pesquisas relacionadas às propriedades como a densidade aparente e densidade energética, a fim de obter melhores *insights*, principalmente para ser implementado nas indústrias como valor comercial.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7217. **NBR 7217: Determinação da composição granulométrica.** [S.l.]. 1987.

ABNT NBR 8112. **NBR 8112: Carvão vegetal - Análise Imediata - Método de ensaio.** [S.l.]. 1986.

ABNT NBR 8633. **NBR 8633: Determinação do poder calorífico.** [S.l.]. 1984.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica.** Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2005.

ARAUJO, H. J. B. D. **Aproveitamento de resíduos das indústrias de serraria do Acre para fins energéticos.** Embrapa - Acre. Rio Branco, p. 38p. 2003.

BEN. **Balanco Energético Nacional.** Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2019.

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.

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.

COPANT 464. **COPANT 464: Maderas: método de determinacion de la compresión axial o paralela al grano.** [S.l.]. 1972.

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.; 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.

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

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.

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.

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

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. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida. In: _____ **Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 193.

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.

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.

VALE, A. T. et al. Caracterização energética e rendimento da carbonização de resíduos de grãos de café (*Coffea arabica*, L) e de madeira (*Cedrelinga catenaeformis*). **Duke CERNE**, 13, n. 4, 2007. 416-420.

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 Tchnology**, 2011. 1344-1351.