

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

DISSERTAÇÃO

**RESÍDUOS MADEIREIROS URBANOS COMO MATÉRIA PRIMA
PARA A PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS COMPACTADOS**

Jessica Grama Mesquita

2021



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

**RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA COMO MATÉRIA PRIMA
PARA A PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS COMPACTADOS**

JESSICA GRAMA MESQUITA

Sob a orientação do professor
Alexandre Miguel do Nascimento

e Coorientação do professor
Ananias Francisco Dias Júnior

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra** em Ciências Ambientais e Florestais, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ
Julho de 2021

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G578r Grama Mesquita, Jessica, 1992-
Resíduos madeireiros urbanos como matéria prima
para a produção de combustíveis sólidos compactados /
Jessica Grama Mesquita. - São João de Meriti, 2021.
66 f.: il.

Orientador: Alexandre Miguel do Nascimento.
Coorientador: Ananias Francisco Dias Júnior.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais e Florestais, 2021.

1. Energia da biomassa. 2. tecnologia da madeira.
3. resíduos madeireiros de origem urbana. 4.
biocombustíveis sólidos. 5. blendas. I. Miguel do
Nascimento, Alexandre, 1961-, orient. II. Francisco
Dias Júnior, Ananias, -, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
graduação em Ciências Ambientais e Florestais. IV.
Título.

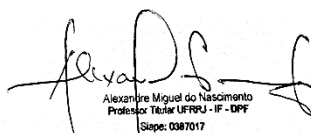
O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

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

JESSICA GRAMA MESQUITA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra** em Ciências Ambientais e Florestais no programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais)

DISSERTAÇÃO (TESE) APROVADA EM 30/07/2021



Alexandre Miguel do Nascimento
Professor Titular UFRRJ - IP - DPF
Cipep: 0387017

Dr. Alexandre Miguel do Nascimento – UFRRJ
Presidente



Dra. Natália Dias de Souza
UFRRJ



Dr. Thiago de Paula Protásio
UFRA

DEDICATÓRIA

*A Deus, sem Ele não teria capacidade para desenvolver este trabalho.
Gratidão Senhor!*

*A todos que me ajudaram de alguma forma e contribuíram ao longo desta caminhada de
enriquecimento intelectual e profissional.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder essa realização.

Aos meus pais e irmãos que mesmo distante fisicamente me amaram incondicionalmente e sempre puderam me compreender durante todos os anos da minha vida.

Agradecimento à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais e ao fomento da CAPES, sem o qual esse trabalho não seria realizado.

Agradecimento mais que especiais ao Laboratório de Energia da Biomassa (LEB-UFES) pelo acolhimento durante a trajetória da dissertação. Gratidão pela oportunidade.

Ao meu orientador Alexandre Miguel por toda paciência, cuidado, amizade e ensinamentos, dentro e fora da academia. Gratidão por se mostrar sempre solícito mesmo que distante fisicamente.

Agradecimento especial ao meu querido coorientador Ananias Júnior, por abrir as portas do seu laboratório. Por toda orientação ao longo dessa caminhada árdua, ensinamentos acadêmicos e pessoais. Gratidão pela amizade, agradeço a você e sua respectiva família (Tamires e Benício) pelo acolhimento durante minha estadia em Jerônimo Monteiro. Vou levá-los para a vida toda.

Aos amigos de profissão e laboratório (LEB) que me ajudaram arduamente, sempre muito pacientes e solícitos. Especialmente, Alfredo Júnior, Aécio Dantas, Allana Katiussya, Álison Moreira, Elias Costa, Fabíola Delatorre, Gabriela Cupertino, Gabriel Zuqui, Maria Paula Reggiane, Luís Felipe Cezário e Tayná Rebonato. Gratidão por todos os ensinamentos, amizade e compreensão. Sem vocês nada disso seria possível. Amo-os!

Agradecimento mais que especial aos amigos de trabalho Elias Costa, Allana Katiussya e Fabíola Delatorre que me auxiliaram incessantemente ao longo da dissertação. Sempre dispostos a ajudar-me sem medir esforços.

Aos amigos, Aécio Dantas, Jaily Keller, Rayane Menezes e Paulo Filho, que juntos formamos o quinteto “Fatos & Fotos”. Agradeço a Deus por tê-los conhecido, pela belíssima amizade que construímos, por sempre se mostrarem pacientes e compreensivos. Momentos únicos vividos que jamais serão esquecidos. Para sempre em meu coração!

Agradecimento a Rayane Menezes por dividir o 201 na República Amarelinha, pela amizade construída, pelos momentos de risadas e choros, por sempre se mostrar paciente comigo. Muito obrigada pela confiança ao longo dessa caminhada. Te amo!

Agradeço ao meu amigo Jaily que mesmo com toda sua correria diária, se mostrou tão prestativo na fase de testes iniciais para construção da dissertação. Ao mesmo tempo, se mostrando sempre companheiro nos dias em que era insuportável escrever. Verdadeiramente, espero que o universo seja generoso conosco.

À Alessandra Brito pela amizade de sempre, mesmo que distante se mostrou perto em alguns momentos dessa trajetória. Agradeço pela ajuda incansável na coleta do meu material, sempre procurando ajudar-me e a manter-me calma.

Ao José Carlos Batista (Zé da química) por toda ajuda ao longo da minha coleta, sempre se mostrando solícito e amigo. Minha eterna gratidão.

Agradecimento ao alojamento feminino da pós-graduação ao longo do primeiro ano de mestrado. Imenso prazer em poder ter feito parte desta família e por ter conhecido mulheres incríveis com histórias de superação. Gratidão pelos momentos de aprendizado cultural e pessoal.

Por último, e não menos especial, quero agradecer a mim mesma. Agradecer-me por todos os dias caminhar rumo aos meus sonhos e objetivos. Lutar diariamente como mulher e pesquisadora em meio as dificuldades encontradas no dia a dia, e, mesmo assim acreditar em dias melhores.

“Pés, para que te quero, se tenho asas para voar? ”

Frida Kahlo

RESUMO GERAL

MESQUITA, Jessica Grama. **Resíduos madeireiros urbanos como matéria prima para a produção de combustíveis sólidos compactados**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento, Coorientador: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior.

A utilização de resíduos de biomassa no Brasil tem se mostrado uma alternativa promissora para geração de energia e mitigação de impactos. Em relação ao reaproveitamento de resíduos de madeira para fins energéticos, destacam-se os de origem urbana, por se tratar de uma fonte de energia limpa e renovável. Contudo, o uso desses resíduos pode ser dificultado, devido à alta heterogeneidade destes materiais e a baixa densidade energética. Nesse contexto, uma alternativa de uso para essa biomassa seria a produção de briquetes. A briquetagem permite obter biocombustíveis sólidos com maior densidade energética, tornando a biomassa mais atrativa para fins energéticos. O objetivo deste estudo foi caracterizar os resíduos madeireiros de origem urbana (RMOU), bem como analisar o efeito da adição de maravalha de eucalipto aos RMOU e, também, avaliar a influência do tamanho da partícula dessas matérias primas para produção de briquetes com fins energéticos. Os RMOU foram coletados na estação de transferência do Caju pertencente à Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) no município do Rio de Janeiro (RJ) e a maravalha de eucalipto obtida em serraria de pequeno porte localizada na cidade de Jerônimo Monteiro (ES). Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando apresentadas diferenças significativas, foram realizados ajustes de modelo de regressão. Para a estatística não-paramétrica foi usado o teste de Kruskal-Wallis para realização de análise de variância, já que estas variáveis não apresentaram distribuição normal, mesmo após a transformação dos dados. Os resultados indicam que os RMOU apresentaram características que os qualificam para uso energético. Por outro lado, a adição de madeira de eucalipto aos RMOU possibilitou a diminuição do teor de cinzas. Desta forma, a composição com 50% de RMOU e 50% eucalipto é o mais recomendado para a utilização energética. Dentre os briquetes observou-se a distribuição do tamanho das partículas da matéria prima tiveram um efeito muito semelhante na resistência à compressão e densidade do produto. Do ponto de vista prático e energético, a trituração de tamanhos de partícula abaixo de 0,85 mm é provavelmente desnecessária, pois se partículas grandes forem peneiradas e usadas para fazer briquetes, o processo de moagem pode ser eliminado e os custos de produção reduzidos.

Palavras-Chave: Energia da biomassa; Valorização de resíduos; Compactação; Granulometria

GENERAL ABSTRACT

MESQUITA, Jessica Grama. **Urban wood waste as raw material for the production of compacted solid fuels**. 2021. Dissertation (Masters in Environmental and Forest Science) – Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. Advisor: Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento, Co-advisor: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior.

The use of biomass residues in Brazil has been shown to be a promising alternative for energy generation and impact mitigation. Regarding the reuse of wood residues for energy purposes, those of urban origin stand out, as they are a clean and renewable energy source. However, the use of these residues can be difficult due to the high heterogeneity of these materials and their low energy density. In this context, alternative use for this biomass would be the production of briquettes. Briquetting makes it possible to obtain solid biofuels with greater energy density, making biomass more attractive and usable for energy purposes. The aim of this study was to characterize urban wood waste (RMOU), as well as to analyze the effect of adding eucalyptus shavings to RMOU and also to evaluate the influence of particle size of these raw materials for the production of briquettes for energy purposes. The RMOU were collected at the cashew transfer station belonging to the Municipal Urban Cleaning Company (COMLURB) in the city of Rio de Janeiro, RJ, and eucalyptus wood shavings obtained from a small sawmill located in the city of Jerônimo Monteiro, ES. Data were subjected to analysis of variance and, when significant differences were presented, regression model adjustments were performed. For non-parametric statistics, the Kruskal-Wallis test was used to perform analysis of variance, as these variables did not show normal distribution, even after data transformation. Correlation analyzes were also performed. The results indicate that the RMOU had characteristics that qualify them for energy use. On the other hand, the addition of eucalyptus wood to the RMOU enabled a reduction in the ash content and thermal degradation. Thus, treatment with 50% RMOU and 50% eucalyptus (T3) is the most recommended for energy use. Among the briquettes, the particle size distribution of the raw material had a very similar effect on the compressive strength and density of the product. From a practical and energy point of view, crushing particle sizes below 0.85 mm is probably unnecessary, as if large particles are sieved and used to make briquettes, the milling process can be eliminated and production costs reduced.

Keywords: Biomass energy; Waste recovery; Compression; Granulometry

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Resíduos sólidos urbanos.....	15
2.2 Resíduos Madeireiros de Origem Urbana (RMOU)	17
2.3 Biomassa como fonte sustentável de energia.....	17
2.4 Processo de compactação da biomassa por meio da briquetagem	18
2.5 Parâmetros de qualidade de briquetes.....	19
CAPÍTULO I.....	21
RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA EM BLENDA COM EUCALYPTUS: FONTE FLEXÍVEL PARA ABASTECIMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS	21
1 INTRODUÇÃO	24
2 MATERIAL E MÉTODOS	25
2.1 Amostragem e coleta dos resíduos de madeira	25
2.2 Preparo e caracterização do material para as análises	26
2.2.1 Umidade	26
2.2.2 Análise Química.....	27
2.2.3 Análise Química Imediata.....	27
2.2.4 Análise do Poder Calorífico	27
2.2.5 Densidade a granel	27
2.2.6 Densidade energética.....	28
2.2.7 Análise termogravimétrica	28
2.2.8 Difração de Raios-X.....	28
2.3 Análise estatística.....	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29

3.1 Teores de umidade	29
3.2 Caracterização química.....	29
3.3 Materiais voláteis, carbono fixo e cinzas	31
3.4 Poder calorífico superior, densidade a granel e densidade energética.....	32
3.5 Análise termogravimétrica (TGA-DTG)	34
3.6 Difração de raios-X.....	35
4 CONCLUSÕES.....	37
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
CAPÍTULO II.....	47
EFEITO DO TAMANHO DA PARTÍCULA NO PROCESSO DE BRIQUETAGEM DOS RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA EM BLENDS COM EUCALIPTO	47
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1 Produção e caracterização dos briquetes.....	51
2.2 Densidade aparente e densidade energética dos briquetes.....	51
2.3 Avaliação da expansão volumétrica e absorção de água	52
2.4 Resistência a compressão diametral dos briquetes	52
2.5 Análise das propriedades colorimétricas	52
2.5 Análises estatísticas	53
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.1 Densidade aparente e energética dos briquetes.....	54
3.2 Expansão volumétrica e absorção de água.....	55
3.3 Resistência a compressão diametral dos briquetes	56
3.4 Colorimetria pelo sistema de cor CIE-L*a*b*	58

4 CONCLUSÕES.....	61
5 CONCLUSÕES GERAIS	62
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO GERAL

Com o rápido crescimento populacional e urbanização nas últimas décadas, a população mundial quase que triplicou, alcançando 7,3 bilhões de pessoas entre 1970 e 2015 (FAO, 2015). Dado a esse crescimento, houve um acréscimo na geração anual de resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos no meio urbano, tornando-se cada vez maior nos lixões e aterros a céu aberto, conseqüentemente acarretando diversos problemas socioeconômicos e ambientais (KUMAR et al., 2014; MALINAUSKAITE et al., 2017). De acordo com Tan et al., (2015), a geração desses resíduos supera a capacidade do ambiente natural de assimilá-los e das autoridades municipais de gerenciá-los. Em 2016, as cidades ao redor do mundo geraram aproximadamente dois bilhões de toneladas, podendo chegar a três bilhões de toneladas em 2050 (BANCO MUNDIAL, 2018). No Brasil essa tendência global também é observada, em que a quantidade gerada de RSU entre 2017 e 2018, foi de 79 milhões de toneladas (ABRELPE, 2019).

A recuperação energética de diferentes materiais advindos dos RSU é uma realidade em muitos países. Contudo, países em desenvolvimento ainda lutam para serem eficazes com suas políticas de gestão de resíduos. No que tange os inúmeros materiais que compõem os RSU, os componentes à base de madeira destacam-se quando o objetivo é o aproveitamento energético (SERRANO-RUIZ et al., 2011; ANDRADE, 2017). Resíduos de madeira de origem urbana (RMOU) referem-se aos paletes de madeira e contêineres de transporte, materiais de madeira disponíveis em detritos de construção, demolição e quaisquer outros materiais lenhosos misturados com outros resíduos. Inclui, também, os produtos lenhosos que, de outra forma, não são contabilizados pelas organizações responsáveis como, os resíduos de poda urbana (SILVA et al., 2016; JOSHI et al., 2015; ANDRADE, 2017).

Comumente, esses resíduos têm elevada umidade, baixa densidade e alta heterogeneidade, devido aos tipos de madeira que os compõem e aos diferentes formatos e tamanhos em que se exibem, afetando assim o seu desempenho energético dificultando o manuseio, transporte, armazenamento e utilização em sua forma original (ANDRADE, 2017). Essas atribuições contribuem para a desvalorização desta biomassa e estudos relacionados à padronização destas características devem ser incentivados, assim como, a adequação para uso energético. Uma forma de contornar esse problema é pela compactação desse resíduo na forma de briquetes ou pellets (ESCOBAR, 2016; ZENG et al., 2016; SOUZA et al., 2020).

A briquetagem é o processo de compactação no qual a biomassa sofre pressão a fim de aumentar sua densidade e diminuir o volume. O processo de briquetagem pode ser categorizado com base no uso de aglutinante ou não (WAKCHAURE et al., 2009; OBI et al., 2016). De acordo com Okot et al., (2019), as propriedades dos briquetes como: teor de cinzas, poder calorífico e propriedades físico-mecânicas estão diretamente relacionadas à combustão, características de transporte, manuseio e armazenamento. As propriedades mecânicas dependem das condições de briquetagem, ou seja, umidade da matéria prima, tamanho da partícula, temperatura e pressão de compactação. Em relação ao manuseio, transporte e armazenamento, briquetes de alta densidade e resistência mecânica são desejáveis (YAMAN et al., 2001; PANWAR et al., 2010). Muitas matérias primas vêm sendo estudadas e têm mostrado diferentes respostas frente aos diferentes parâmetros de briquetagem. Essa diferença nas características de compactação da biomassa é devida principalmente a variação em sua composição química (YAMAN et al., 2000; MITCHUAL et al., 2013; TUMULURU et al., 2015; OKOT et al., 2019).

Diferentes materiais de biomassa podem ser misturados para melhorar as propriedades físico-mecânicas e características energéticas dos briquetes. Martinez et al. (2019) investigou a geração de briquetes de pinus com resíduos de despolpa (casca) de café e pôde observar que a mistura destes, apresentaram melhores resultados energéticos ao comparar-se aos briquetes

produzidos apenas com café. Combustíveis sólidos compactados produzidos a partir de misturas de biomassas podem contribuir para a redução do gasto energético (RÍOS-BADRÁN et al., 2020). Além disso, a mistura apresenta uma oportunidade de expandir a diversidade de materiais de biomassa que podem ser utilizados para a produção de briquetes, contribuindo para otimização do uso dos recursos energéticos e aumento da eficiência energética desses combustíveis.

Algumas variáveis afetam os processos de compactação e essas dependem da matéria-prima, como por exemplo, o tipo de biomassa a ser compactada, sua umidade, tamanho da partícula, bem como a pressão aplicada e a temperatura atingida durante a compactação (RELOVA et al., 2009). Wang et al., (2018) estudaram o efeito da granulometria da matéria-prima no processo de briquetagem da palha de arroz e observaram que o consumo de energia da briquetagem aumentou com partículas maiores. Alguns autores avaliaram o efeito do tamanho das partículas na compactação (MANI et al., 2006; BERGSTRÖM et al., 2008; MANI et al., 2009; RELOVA et al., 2009), mas os efeitos do tamanho das partículas dos resíduos madeireiros de origem urbana com eucalipto no processo de briquetagem ainda não foram investigados.

O conhecimento gerado a partir do desenvolvimento de pesquisas sobre produtos compactados contribuirá para redesenhar a matriz energética do país, popularizar o uso desses combustíveis, sobretudo, incentivar a utilização de fontes renováveis. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo geral investigar a influência das composições de biomassa contendo RMOU e eucalipto na produção de combustíveis sólidos compactados e a implicação do tamanho da partícula nas propriedades físico-mecânicas e colorimétricas desses briquetes. Para tanto, esse estudo foi dividido em dois capítulos, a saber:

Capítulo I: Influência da adição de *Eucalyptus* sp. nas propriedades dos resíduos madeireiros de origem urbana.

O objetivo deste capítulo foi caracterizar os resíduos madeireiros de origem urbana, bem como verificar a influência das composições de biomassa contendo RMOU e eucalipto.

Capítulo II: Efeito do tamanho da partícula no processo de briquetagem de resíduos madeireiros de origem urbana e eucalipto.

Neste capítulo foi investigado o efeito da granulometria da matéria-prima no processo de briquetagem de resíduos madeireiros de origem urbana e eucalipto.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Resíduos sólidos urbanos

No final do século XVIII, o lixo associado à degradação ambiental já era um fenômeno decorrente da Revolução Industrial. Deste modo, como a população era consideravelmente muito menor que a atual, esse impacto passou despercebido (GOMES et al., 2014). Segundo Shaoli et al. (2016), foi a partir de então que o crescimento populacional avançou e o volume de resíduos sólidos produzidos nas cidades do descarte para a substituição da redução, reutilização e reciclagem. Os resíduos sólidos urbanos são considerados como as partes que sobram de processos de atividade humana e animal e de processos produtivos como matéria orgânica, o lixo doméstico, os efluentes industriais e os gases liberados em processos industriais ou por motores (BRASIL, 2010). A coleta, transporte e destinação final são processos básicos que estão diretamente relacionados à redução das emissões de gases de efeito estufa e melhorias na gestão de resíduos podem ser alcançadas por meio da aprovação e implementação de políticas de gestão de resíduos (GONÇALVES et al., 2020; MARIA et al., 2020).

Nesse contexto, a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), surgiu no Brasil e promoveu o início de uma forte articulação institucional envolvendo a União, Estados e Municípios. Em geral, a PNRS buscou soluções para os problemas graves da elevada geração de resíduos em grande parte do território e que compromete diretamente a qualidade de vida dos cidadãos brasileiros (SILVA, 2016). Entretanto, apesar da institucionalização da PNRS, o estabelecimento de instrumentos regulatórios para a gestão de resíduos no país é considerado tardio em relação a outros países e carece de aplicação prática em vários pontos (JURAS, 2012). De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2016), a geração de resíduos se mantém em patamares elevados, a reciclagem ainda é falha, falta recursos para a logística e o país tem mais de três mil municípios com destinação inadequada.

Os serviços de coleta de RSU só no ano de 2016 passou de 90,8% para 91,2% de volume gerado, isso só confirma que a gestão de resíduos sólidos ainda é deficiente e como consequência direta comprova que os índices de reciclagem, apesar da grande divulgação, ainda se mostram estagnados. Além deste motivo, a ausência de iniciativas consolidadas para o aproveitamento e recuperação dos materiais orgânicos acaba sobrecarregando os sistemas de destinação final (ABRELPE, 2016). Embora a maior parte dos resíduos sólidos brasileiros coletados tenha sua destinação nos aterros sanitários (destinação adequada), a garantia para uma gestão sustentável depende da caracterização e segregação do material, sistema de coleta adequado, sistema de transporte, destinação final e disposição final. O processo mais adequado para o tratamento destes resíduos depende essencialmente das suas características (BRASIL, 2010; IPT, 2010).

Sobretudo os resíduos sólidos urbanos são resíduos de difícil gerenciamento, ou seja, trata-se de resíduos heterogêneos na sua composição. Além do mais, variam de acordo com algumas variáveis, tais como: local de produção, condições climáticas, nível educacional, número de habitantes em determinado município e costumes da população. As soluções tornam-se complexas, todavia, o conhecimento das atuais tecnologias de tratamento de resíduos sólidos é necessário para que haja soluções ambientalmente e economicamente favoráveis à sociedade (GOMES et al., 2014; IPT, 2010).

O crescimento acelerado da população, embora tenha sido um processo mundial, tem-se concentrado principalmente em países emergentes, conseqüentemente, o aumento na geração de resíduos sólidos nos centros urbanos intensificou-se. No Brasil não é muito diferente, a população brasileira apresentou crescimento de 0,82% entre os anos de 2017 e 2018, enquanto

a geração per capita de RSU apresentou aumento de 0,39% (ABRELPE, 2018). Os dados da geração anual de RSU em 2018 ao comparado com 2017 são apresentados na Figura 1.



Figura 1. Geração de RSU total nos anos de 2017 e 2018. Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE.

Segundo a ABRELPE (2018), houve um aumento de 1% na geração total de resíduos sólidos urbanos, correspondendo um total de 216.629 toneladas diárias de RSU no país. Importante salientar que a geração de resíduos sólidos é um indicador de suma importância que serve como parâmetro para a tomada de decisões no que se diz ao planejamento de sistemas de coleta e disposição final (ESPINOZA et al., 2011).

A Figura 2 expõe dados referentes à disposição final de RSU. É possível observar que houve um aumento no ano de 2018 ao comparar com o ano de 2017, apresentando um índice de 59,5% do montante anual encaminhado aos aterros sanitários. Porém, unidades inadequadas como lixões e aterros controlados ainda têm participação significativa (23% e 17,5%, respectivamente). Estão presentes em todas as regiões e recebem mais de 80 mil toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental e impactos negativos à saúde (ABRELPE, 2018).

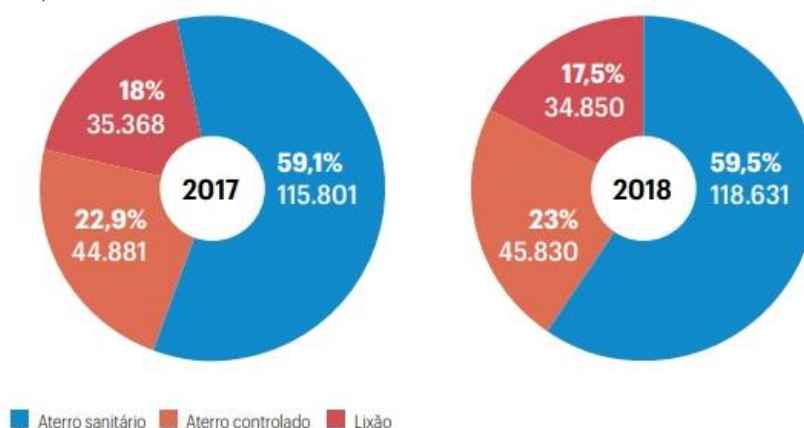


Figura 2. Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia). Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE.

O panorama apresentado pela ABRELPE (2018) da atual situação de RSU no âmbito nacional revela que o cenário da gestão de resíduos sólidos permaneceu praticamente estagnado e mostra claramente que a destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos coletados pelos municípios pouco avançou. Apesar da coleta ter aumentado em relação a 2017 para 2018 num ritmo um pouco maior que a geração, o panorama evidencia que 6,3 milhões de toneladas de resíduos

não foram recolhidas junto aos locais de geração, causando severos impactos na saúde da população.

Visto isso, é importante destacar a necessidade de ações imediatas para o aprimoramento do sistema de coleta, fica evidente que além da carência de aplicação prática da PNRS, fica evidente que ainda há muito que ser feito para eliminar os lixões a céu aberto e os aterros controlados. Ressalta-se a importância da coleta seletiva e reciclagem dos resíduos sólidos urbanos para o seu melhor gerenciamento.

2.2 Resíduos Madeireiros de Origem Urbana (RMOU)

A utilização de resíduos da biomassa no Brasil se mostra uma alternativa para diminuir os impactos ambientais causados pelo descarte indevido desses resíduos em aterros sanitários e terrenos abandonados. Dentre os inúmeros materiais descartados como, por exemplo, vidros, plásticos, metais e papelões, se destacam os resíduos de madeira gerados no ambiente urbano por empreendimentos, repartições públicas ou pela população em geral (ANDRADE, 2017). Também são incluídos, sobras de madeira de construção civil, móveis antigos, caixotes e paletes de madeira descartados (LYON & BOND, 2014). A utilização da madeira no espaço urbano, seja por conta da construção civil, descarte de embalagens ou podas oriundas da arborização urbana, acarretam grande volume de resíduos de madeira nas cidades (WIECHETECK, 2009). De acordo com Andrade (2017), este material lenhoso se diferencia dos demais, porque possui potencial energético e é renovável.

Nesse contexto, cabe destaque a realidade do município do Rio de Janeiro, com a remoção e poda das árvores, muito se tem gerado o conhecido “lixo verde” que consiste em todo material lenhoso que é descartado após tratamentos silviculturais da arborização urbana como, por exemplo, galhos e troncos. De acordo com Plano Diretor de Arborização Urbana – PDAU (Rio de Janeiro, 2015), estima-se que os resíduos de poda cheguem a 30 t/dia e, ainda, dados da Prefeitura do Rio de Janeiro informam que os resíduos provenientes da poda urbana recolhidos pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) atingiram, em apenas um mês, 431 toneladas. Atualmente, as Prefeituras do Rio de Janeiro, em parcerias com empresas de pequeno porte, buscam destinar os resíduos de poda para o serviço de compostagem. No entanto, são ações isoladas e nem sempre suficientes para proporcionar uma destinação adequada a todos os resíduos oriundos da madeira urbana.

Diante deste cenário, fica evidente que o volume de resíduo é expressivo, porém não é contabilizado, dificultando assim, a elaboração de programas para um tratamento adequado para esse resíduo. Contudo, estes podem deixar de ser um passivo ambiental e ser utilizados como matéria prima para diferentes finalidades, podendo beneficiar ambientalmente economicamente e socialmente, as entidades públicas, comunidades locais e sociedade em geral. Diante disso, o presente estudo sugere como alternativa a reutilização dos resíduos madeireiros de origem urbana para o seu aproveitamento energético.

2.3 Biomassa como fonte sustentável de energia

No atual cenário de mudanças climáticas, a busca por fontes alternativas de energia se torna importante para reduzir o uso de combustíveis fósseis. O único recurso natural e renovável baseado em carbono que é vasto o suficiente para ser usado como substituto para os combustíveis fósseis é a biomassa (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2013; ROBERTS et al., 2015). Globalmente, os recursos de biomassa mais abundantes são madeiras e resíduos de madeiras, resíduos florestais, agrícolas e resíduos sólidos municipais. Nessa perspectiva, a

biomassa residual destaca-se como opção viável, pois é considerada uma fonte renovável e abundante de carbono orgânico (SERRANO-RUIZ et al., 2011; AHMAD et al., 2016).

O Brasil tem potencial para produzir mais de 298 milhões de toneladas por ano de resíduos lignocelulósicos do processamento, por exemplo, de arroz, cana-de-açúcar, milho, soja e trigo e 6 milhões de m³ de resíduos gerados nas colheitas florestais de pinus e eucalipto, além de possuir extensas áreas com grande potencial para a produção de biomassa em abundância, cerca de 8 milhões de hectares de florestas plantadas, das quais 64% são florestas de eucalipto presentes em pouco mais de 500 municípios brasileiros (BONASSA et al., 2018; IBÁ, 2019). Nesse sentido, o país se destaca por apresentar grande produção agrícola e florestal e que gera resíduos em grandes quantidades necessitando de descarte adequado.

Considerando esses fatores, a utilização dos resíduos resultantes dessas atividades como fonte renovável e sustentável mostra-se importante. Diversos resíduos presentes no país podem ser citados, tais como: o bagaço e palha de cana de açúcar; palha de soja, de trigo e de feijão; casca e palha de arroz; folhas e resíduos de poda e do processamento na indústria de papel e celulose (EPE, 2018). A forma mais simples de aproveitar estes resíduos é a queima direta, porém este método acarreta algumas desvantagens, como por exemplo, menor densidade, maior umidade e menor poder calorífico líquido (ESCOBAR, 2016). Com o intuito de diminuir as desvantagens do uso da biomassa tradicional podem ser consideradas inúmeras rotas tecnológicas quem tem a finalidade de produzir energia elétrica ou térmica, dentre os processos mais empregados para a conversão da biomassa em energia podem ser classificados como: processos físicos, termoquímicos e biológicos (CORTEZ, 2011; JACINTO, 2017).

Sabe-se que os resíduos de madeira, incluindo os de origem urbana, possuem uma composição diversa e heterogênea. Dando ênfase a esse estudo, o processo de compactação (processo físico) mostra-se benéfico acerca dos demais, pois estes convertem a biomassa em forma energética mais homogênea, aumentam a densidade energética do material, contribuem para a diminuição dos custos relacionados ao transporte e logística, melhoram as propriedades da queima e propiciam o uso de equipamentos automáticos (CORTEZ, 2011).

A briquetagem e a peletização são processos que convertem partículas de biomassa em biocombustível sólido de alta densidade sendo fácil de transportar, possui alta eficiência de queima e baixa emissão de poluentes (GARCÍA et al., 2019). Sendo assim, os resíduos madeireiros de origem urbana podem ser uma alternativa de fonte renovável para a produção de briquetes de madeira.

2.4 Processo de compactação da biomassa por meio da briquetagem

A briquetagem é definida como um processo de compactação eficiente que produz um combustível uniforme com maior densidade energética e, conseqüentemente, propicia a redução de custos de transporte e facilita o estoque e armazenamento da biomassa (TEMMERMAN et al., 2006; KARLHAGER, 2008). Geralmente, os briquetes são produzidos em uma prensa de pistão (mecânica ou hidráulica) aplicando-se carga em uma matriz com partículas de biomassa, podendo ou não contar com um ligante adicional dependendo das propriedades da matéria-prima. Para avaliar o produto final, devem ser medidas a resistência à compressão, densidade energética, taxa de compactação e umidade de equilíbrio (FELFLI et al., 2011; GENDEK et al., 2018).

Os briquetes são blocos com superfície mais áspera e têm diferentes geometrias de seção transversal (hexagonal, cilindro ou cubóide), diâmetro de 50 a 100 mm, com comprimento variando de 60 mm a 200 mm. As variáveis que influenciam a densificação são tamanho de partícula, pressão, temperatura, teor de umidade e pré-aquecimento. De acordo com Niedziółka et al. (2015), a biomassa submetida a compactação deve possuir umidade dentro do

intervalo de 8-15%, alguns autores mencionam que os teores de umidade acima de 15% podem levar à quebra dos materiais compactados ou até mesmo a degradação biológica durante o transporte e o armazenamento (DIAS et al., 2012; NIEDZIOLKA et al., 2015; BADWA et al., 2018). Briquetes provenientes de múltiplos resíduos já foram estudados, como serragem, folhas, cascas de arroz, resíduos sólidos municipais e cascas de azeitona (LI et al., 2001; WU et al., 2011; LELA et al., 2016; WANG et al., 2017). Pesquisas acerca dos padrões de qualidade de briquetes servem como referência para fornecer informações sobre a o desempenho do produto final. Esses por sua vez, ajudam a avaliar sistematicamente as diferenças de qualidade entre o material de várias origens e processos (GILVARI et al., 2019).

2.5 Parâmetros de qualidade de briquetes

As condições de processamento, incluindo temperatura, umidade e tempo de compactação durante o processo de briquetagem, bem como a composição da matéria-prima, teor de cinzas e tamanho da partícula, podem alterar as propriedades físico-mecânicas do produto compactado. Além disso, essas propriedades estão diretamente relacionadas à combustão, transporte e manuseio (GILVARI et al., 2019; OKOT et al., 2019). Stelte et al. (2012), em trabalho de revisão, apontaram as variáveis de processo que afetam a compactação, destacaram: umidade, granulometria, pressão e dimensões da prensa. Apesar do tipo de material, em geral, os fatores que afetam as propriedades físico-mecânicas dos produtos compactados podem ser classificados em quatro grupos principais: matéria-prima, condições de preparo, processo de compactação e armazenamento (GILVARI et al., 2019).

A composição química da matéria-prima desempenha papel essencial na determinação das propriedades físicas do material compactado, ou seja, devido ao seu comportamento termoplástico, a presença da lignina ajuda a aumentar a ligação entre as partículas aumentando a dureza e a durabilidade, enquanto o grupo hidroxila nas hemiceluloses e na lignina auxilia na ligação dessas por meio de ligações de hidrogênio. Extrativos atuam como lubrificantes durante a compressão, criando uma camada entre as partículas (TUMULURU et al., 2011; HUANG et al., 2017).

Altos teores de cinzas, nitrogênio e materiais inorgânicos limitam a comercialização de produtos compactados. O teor de cinzas determina a quantidade de material inorgânico presente na madeira, quando em grandes quantidades resultam em emissões de partículas durante o processo de queima, podendo levar também à corrosão do queimador e a desgastes nos equipamentos. Valores superiores a 4% do teor de cinzas são considerados críticos (DIAS et al., 2012; SILVA, 2016).

A umidade é uma variável chave no processo de produção de materiais compactados, alguns autores concluem que o teor de umidade tem influência direta na resistência do material (GIL et al., 2011; ZAINUDDIN et al., 2014; PRADHAN et al., 2018; GILVARI et al., 2019). Ainda que a umidade seja um parâmetro de qualidade vital para o processo de briquetagem, a qualidade do produto final varia de acordo com o tipo de matéria-prima. Além disso, o efeito da umidade pode depender de outros fatores como, temperatura e pressão (HUANG et al., 2017).

Ainda dentro dos parâmetros de qualidade que afetam as propriedades físico-mecânicas envolvendo a matéria-prima do produto compactado está a distribuição do tamanho da partícula. De acordo com Wang et al. (2018), o tamanho da partícula afeta o processo de briquetagem. Segundo os autores, partículas menores requerem maior consumo de energia durante o processo de quebra. Alguns autores ao estudarem o efeito da granulometria do processo de briquetagem puderam concluir que partículas mais finas levam uma superfície mais lisa e maior resistência a compressão ao comparar-se com partículas mais grosseiras

(LINDLEY 1989; MANI et al., 2006; BAZARGAN et al., 2014). Gilvari et al. (2019), concluíram que o efeito do tamanho das partículas depende da ligação das partículas, ou seja, partículas maiores causam maiores bloqueios entre as propriedades mecânicas das partículas, criando ligações mais fortes. Temperaturas mais altas e áreas de superfície fornecida por partículas mais finas aumentam as oportunidades de ligação, bem como ativam diferentes fenômenos de ligação, como por exemplo, a transição vítrea da lignina.

Dessa forma, o conhecimento das propriedades fundamentais que influenciam o processo de briquetagem simultaneamente é essencial para um melhor entendimento da sua influência nas características físico-mecânicas e energéticas do produto final, assim como, a otimização dos processos de compactação.

CAPÍTULO I

RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA EM BLENDS COM *EUCALYPTUS*: FONTE FLEXÍVEL PARA ABASTECIMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS

WOOD WASTE OF URBAN ORIGIN IN BLENDS WITH *EUCALYPTUS*: FLEXIBLE
SOURCE FOR THE SUPPLY OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

RESUMO

A crescente demanda por energia impulsiona novos avanços de pesquisas por fontes que sejam economicamente viáveis e sustentáveis do ponto de vista socioambiental. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi caracterizar os Resíduos Madeiros de Origem Urbana (RMOU) para produção de briquetes destinados ao abastecimento energético residencial e industrial. Além disso, o efeito da adição de madeira de *Eucalyptus* sp. em distintas proporções com os RMOU foi investigado como opção de melhoria do desempenho energético dessas biomassas residuais. Os RMOU foram coletados na estação de transferência do Caju pertencente à Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) no município do Rio de Janeiro (RJ) e a maravalha de eucalipto obtida em serraria de pequeno porte localizada na cidade de Jerônimo Monteiro (ES). Foram analisados cinco tratamentos de RMOU e eucalipto, sendo as composições: T1 = 100RMOU/0EUC, T2 = 75RMOU/25EUC, T3 = 50RMOU/50EUC, T4 = 25RMOU/75EUC e T5 = 0RMOU/100EUC. Desses tratamentos, foram analisadas as características físicas, químicas, térmicas e energéticas. Após a verificação de pressupostos adicionados, a análise de variância foi realizada seguindo delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos, sendo cinco repetições por tratamento. De modo geral, não foram observadas grandes diferenças entre os resultados dos RMOU considerando a proporção da madeira de eucalipto nas misturas. Por outro lado, observou-se baixos teores de cinzas e melhores desempenhos de combustão com adição de eucalipto à 50% aos RMOU. Desse modo, recomenda-se a o uso de até 50% de RMOU para a utilização energética.

Palavras-Chave: Energia da biomassa, Blendas, Valorização de resíduos

ABSTRACT

The growing demand for energy drives new research advances for sources that are economically viable and sustainable from a socio-environmental point of view. Therefore, the objective of this work was to characterize the Urban Wood Waste (RMOU) for the production of briquettes for residential and industrial energy supply. Furthermore, the effect of adding *Eucalyptus* sp. in different proportions with the RMOU was investigated as an option to improve the energy performance of these residual biomasses. The RMOU were collected at the cashew transfer station belonging to the Municipal Urban Cleaning Company (COMLURB) in the city of Rio de Janeiro (RJ) and eucalyptus wood shavings obtained from a small sawmill located in the city of Jerônimo Monteiro (ES). Five treatments of RMOU and eucalyptus were analyzed, the compositions being: T1 = 100RMOU/0EUC, T2 = 75RMOU/25EUC, T3 = 50RMOU/50EUC, T4 = 25RMOU/75EUC and T5 = 0RMOU/100EUC. Of these treatments, the physical, chemical, thermal and energy characteristics were analyzed. After checking the added assumptions, the analysis of variance was performed following a completely randomized design with five treatments, with five replications per treatment. In general, no great differences were observed between the results of the RMOU considering the proportion of eucalyptus wood in the mixtures. On the other hand, low ash contents and better combustion performance were observed with the addition of 50% eucalyptus to the RMOU. Thus, it is recommended to use up to 50% of RMOU for energy use.

Keywords: Biomass energy, Blends; Waste recovery

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional no mundo causado pela rápida urbanização culminou um grande aumento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Especificamente no que se refere aos RSU a geração mundial está estimada em cerca de 2,1 bilhões de t.ano⁻¹, e espera-se que esse número alcance cerca de 3 bilhões de t.ano⁻¹ até 2050 (BANCO MUNDIAL, 2018). A recuperação de energia de diferentes materiais presentes nos RSU é uma realidade em muitos países, visto que a matriz energética a base de combustíveis fósseis é considerada insegura por ser um recurso não renovável (DIAS JÚNIOR et al., 2017). No entanto, problemas relacionados à gestão desses resíduos em países subdesenvolvidos ainda é um desafio crescente para as autoridades municipais. Os componentes a base de madeira que compõem os RSU, denominados de Resíduos Madeireiros de Origem Urbana (RMOU) destacam-se quando o objetivo é o aproveitamento para fins energéticos, uma vez que eles apresentam caráter renovável e sua conhecida qualidade para produção de energia (ANDRADE, 2017; REBEHY et al., 2017).

O uso desses resíduos para fins de produção de energia é uma alternativa para agregar valor e diminuir os impactos causados, além de fornecer benefícios ambientais, econômicos e sociais aos municípios (CUPERTINO et al., 2020). A destinação adequada e controlada dos RMOU pode reduzir seu volume e evitar o descarte indevido em áreas a céu aberto, resultando em problemas de saúde pública e espaçamento urbano. Ademais, os benefícios associados ao aproveitamento desses resíduos, incluem baixo custo e fácil produção, gerando assim, novos empreendimentos, empregos e renda para a sociedade (WIECHETECK, 2009; NOLASCO et al., 2014; ANDRADE, 2017; DIAS JÚNIOR et al., 2017).

Contudo, esses resíduos muitas vezes apresentam características tais como, tamanho heterogêneo das partículas, alta umidade, teor de cinzas elevado e baixa densidade energética dificultando a sua utilização para fins energéticos (CASTELLANO et al., 2015; ZENG et al., 2016; DEBONI et al., 2020). De acordo com Dias Júnior et al. (2017), materiais com composição e características muito variáveis são difíceis de controlar e podem influenciar na geração e transferência de calor. Além disso, poucas são as informações disponíveis na literatura acerca do potencial energético dos RMOU. Por isso, pesquisas relacionadas à padronização dessas características devem ser incentivadas para que as tornem matérias-primas mais atrativas e adequadas ao consumo energético (ANDRADE, 2017).

Considerando a necessidade de melhorar as características e a composição dos RMOU, este capítulo teve como objetivo avaliar o potencial energético dos RMOU, assim como analisar os efeitos da adição de *Eucalyptus* sp. nos RMOU, verificando a possibilidade de promover melhorias na qualidade energética.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Amostragem e coleta dos resíduos de madeira

Para este estudo foram utilizados dois tipos de biomassa como fontes de matéria-prima: resíduos madeireiros de origem urbana (RMOU) e maravalhas de *Eucalyptus* sp. Os RMOU foram coletados na estação de transferência (ETR-Caju) da Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) localizada no bairro do Caju, resultante dos resíduos da arborização urbana, madeiras vindas dos Resíduos de Construção Civil (RCC) e restos de embalagens fabricados a partir de paletes (como caixotes de feira) gerados pelo município do Rio de Janeiro. A maravalha oriunda do processamento mecânico da madeira de *Eucalyptus* sp. foi coletada em serraria de pequeno porte, localizada na cidade de Jerônimo Monteiro (ES) e processada nas dependências da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Os RMOU transferidos para a ETR-Caju são processados por um maquinário de origem alemã modelo EDGE TRM516 que auxiliam na trituração e peneiramento do material lignocelulósico. Após serem triturados, estes são peneirados e dispostos separadamente em pilhas. O material coletado era composto por galhos com casca, folhas em estado de decomposição, sementes, pallets de madeira e madeiras de construção (Figura 3). Além destes, havia a presença de materiais indesejáveis, tais como: plástico, papelão, materiais minerais, magnéticos e cortantes, que por sua vez, precisou passar por processo de separação. A amostragem do material lenhoso (mix) foi realizada de acordo com as diretrizes da NBR 10.007 (ABNT, 2004), que trata da amostragem de resíduos sólidos. Em seguida, o material foi armazenado em sacos para entulho de rafia, pesados por uma balança de gancho retrátil com capacidade máxima de 25 kg e encaminhados para Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) no Campus de Seropédica, RJ.



Figura 3. Resíduos madeireiros de origem urbana. (A) = Picador modelo EDGE TRM516 na ETR-Caju; (B) = Local de coleta e amostragem do material. (C) = Pilha de RMOU. – D: Separação do material.

2.2 Preparo e caracterização do material para as análises

Os RMOU foram secos em temperatura ambiente (variando entre 35 a 38°C) por três dias. Após a secagem, o material foi triturado em moinho de martelo com uma peneira de corte de 4,5 mm (Figura 4) e, em seguida, as partículas foram reduzidas a 1,0 mm. A maravalha da madeira de *Eucalyptus* sp. foi processada em moinho de martelo e classificada em peneira com abertura de 1 mm de diâmetro.



Figura 4. Pré-processamento do material. (A) = Secagem ao ar livre; (B) = Trituração do material em moinho de martelo; (C) = Peneiras de corte do moinho de martelo (4,5 mm).

Após triturados, os RMOU e a maravalha de eucalipto foram secos ao ar livre, acondicionados em embalagens plásticas e realizadas as composições (Tabela 1). Foram determinadas a umidade, densidade a granel; os teores de extrativos totais, lignina total, cinzas e poder calorífico superior na caracterização das biomassas in natura.

Tabela 1. Composição das biomassas

Composição	Abreviatura
Resíduo Madeireiro de Origem Urbana (100%)	RMOU
Resíduo Madeireiro de Origem Urbana (75%) + eucalipto (25%)	RMOU75+E25
Resíduo Madeireiro de Origem Urbana (50%) + eucalipto (50%)	RMOU50+E50
Resíduo Madeireiro de Origem Urbana (25%) + eucalipto (75%)	RMOU25+E75
Eucalipto (100%)	E100

Fonte: A autora (2021).

2.2.1 Umidade

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico (base massa anidra), segundo da ASTM D1762-84 com cinco repetições para cada tratamento.

2.2.2 Análise Química

Para a caracterização química o material foi moído em moinho do tipo Willey e classificado em peneiras sobrepostas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh (abertura de 0,42 mm) e ficou retida na de 60 mesh (0,25 mm). Após este procedimento, os resíduos foram acondicionados em sala climatizada para homogeneização da umidade.

Para caracterização química, foram determinados os teores de extrativos em álcool:tolueno, segundo especificações da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP M/68 (ABTCP, 1968) e da norma T204 da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1998); os teores de lignina insolúvel, pelo método Klason (GOMIDE; DEMUNER, 1986) e de lignina solúvel por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), com base na diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel.

2.2.3 Análise Química Imediata

A análise imediata foi realizada seguindo a metodologia da ASTM D-1764-84 (ASTM, 2007) para a determinação de teores de materiais voláteis (TMV) e cinzas (TCZ) e, por diferença, o teor de carbono fixo (TCF).

2.2.4 Análise do Poder Calorífico

O poder calorífico superior (kcal kg⁻¹) foi obtido em um calorímetro digital adiabático, de acordo com a norma DIN EN 14918 (Deutsches Institut Für Normung, 2010b) e, o poder calorífico inferior (base seca) foi estimado mediante a Equação 1, uma vez que não foi possível a obtenção do valor de hidrogênio do material.

$$PCI = PCS - 324 \quad (1)$$

Em que: PCI = poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); PCS = PCS: poder calorífico superior (kcal kg⁻¹)

O poder calorífico líquido foi estimado com base na Equação 2

$$PCL = \frac{[PCI - (6 \cdot U_{bs})]}{(100 + U_{bs})} \cdot 100 \quad (2)$$

Em que: PCL: poder calorífico líquido (kcal kg⁻¹); PCI: poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); U_{bs}: umidade média na base seca (%).

2.2.5 Densidade a granel

Para determinação da densidade a granel, utilizou-se a Norma ABNT NBR 6922: 1981 de forma adaptada para biomassa, a qual direciona para uma coleta representativa do material na forma bruta. A densidade a granel foi realizada uma caixa com paredes rígidas com dimensões de 10 x 11,4 x 11,9 milímetros e com massa conhecida, no qual foi analisada cada composição com granulometria de 20 mesh (0,84 mm). Para o cálculo da densidade a granel foi utilizada a seguinte equação:

$$D = \frac{M2-M1}{V} \quad (3)$$

Em que: M1 = Massa da caixa vazia (g); M2 = Massa da caixa cheia (g); V = Volume da caixa (cm³); D = densidade a granel (g/cm³).

2.2.6 Densidade energética

Para a determinação da densidade energética, realizou-se a multiplicação do poder calorífico útil (PCU) e pela densidade a granel.

2.2.7 Análise termogravimétrica

Foram obtidas a curva termogravimétrica (TG) e a derivada primeira da perda de massa (DTG) a fim de avaliar a degradação térmica das madeiras residuais e as blendas testadas em função da temperatura e tempo de aquecimento. O ensaio foi realizado com analisador térmico automático da marca Setaram Modelo LabSys Evo com amostras de de ± 15 mg de serragem com granulometria de 60 mesh por resíduo. As análises foram realizadas sob atmosfera de N² com 1,8 bar de pressão, variando da temperatura ambiente (20–35°C) a 650 ° C e aquecimento a 5 ° C min⁻¹. A primeira derivada da curva TGA permitiu identificar a taxa de perda de massa por minuto e outras características da pirólise [(dm/dt) max e Tmax] O pico observado na curva DTG indicou a temperatura de degradação máxima (Tmax) e a taxa máxima de degradação térmica [(dm /dt) max].

2.2.8 Difração de Raios-X

A difração de Raio-X (DRX) foi realizada com um difratômetro Rigaku, modelo Miniflex, com radiação CuK β. Os difratogramas foram adquiridos com variação de ângulo de Bragg (2θ) entre 10° e 80°, com passos de 0,05 e tempo de contagem por passo de 2 s. A técnica de DRX permite identificar e quantificar diferentes fases presentes em uma amostra pulverizada.

2.3 Análise estatística

O experimento foi analisado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos em diferentes composições das biomassas e cinco repetições por tratamento em cada análise (química, energética, física e colorimétrica). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Statsoft 7, ao nível de 95% de confiança em todos os testes. Nos testes paramétricos foram realizados Brown-Forsythe de homogeneidade de variância, Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade dos dados. Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste F e realizaram-se gráficos de regressão linear simples e quadrática, dependendo do comportamento dos dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teores de umidade

Na Figura 5 observa-se o teor de umidade dos resíduos utilizados na produção dos briquetes, para as cinco composições analisadas

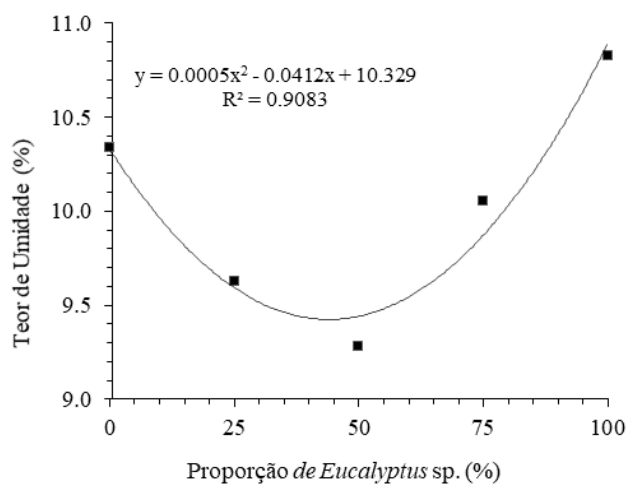


Figura 5. Valores observados e estimados de umidade (%) em função da proporção de *Eucalyptus* sp. nos resíduos madeireiros de origem urbana (p -valor < 0,05). Fonte: a autora (2021).

Analisando a Figura 6, observa-se que existe uma tendência significativa do aumento da umidade à medida que a proporção de eucalipto aumenta. Os valores médios de umidade para as cinco composições de RMOU e *Eucalyptus* sp. variou entre 9,28% e 10,83%.

A umidade é um parâmetro importante quando se avaliam diferentes tipos de biocombustíveis como fonte de energia, pois ela afeta o balanço energético da briquetagem. De acordo com Souza (2016), quanto menor for a umidade do material, maior será a produção de calor por unidade de massa. Menezes (2013) determinou a umidade média de resíduos de maravalha em torno de 11,34% para *A. angustifolia* e 11,30% para maravalha oriunda de *Pinus* sp. Valores médios de teor de umidade de 14,63% foram encontrados por Jacinto et al. (2017) analisando a maravalha de *Pinus* sp.

Silva (2016) avaliou o teor de umidade para resíduos de poda de árvores com folha e sem folha e pode encontrar valores em torno de 10,3% e 12,0%, respectivamente. De acordo com Carvalho e Brink (2004), para que haja a compactação das partículas a umidade deve estar entre 8 e 15%. Kaliyan et al. (2009) mencionaram que a umidade desejada para a briquetagem deve estar entre 9 a 12%. Sendo assim, o teor de umidade encontrado no presente estudo está de acordo o proposto pela literatura.

3.2 Caracterização química

Na Figura 8 estão apresentados os teores de extrativos totais e de lignina dos tratamentos analisados.

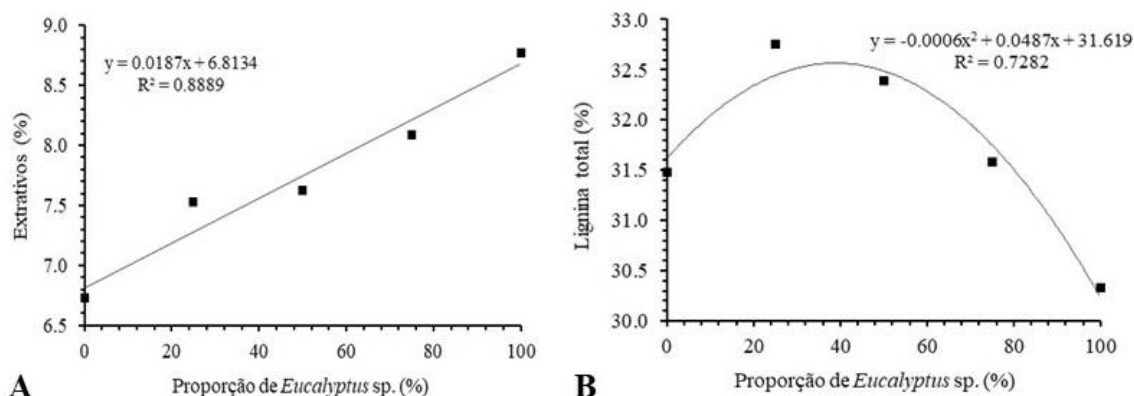


Figura 6. Valores observados e estimados para os teores de extrativos totais (%) e lignina (%) em função da proporção de *Eucalyptus* sp. presente nos resíduos madeireiros de origem urbana (p -valor < 0,05). Em que: (A) = teor de extrativos; (B) = lignina total. Fonte: a autora (2021).

Observa-se que existe uma tendência de aumento do teor de extrativos à medida que se aumenta a quantidade de eucalipto na composição dos tratamentos analisados (Figura 6A). Para o teor de extrativos totais, os tratamentos apresentaram valores que variaram de 6,7 a 8,7%.

Os resultados encontrados nesse trabalho são maiores com os relatados na literatura, conforme trabalho de Silvério et al. (2006), o teor de extrativos em clones de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* foi de 2,36%. Ao avaliar a madeira de *Eucalyptus grandis*, Poletto (2016), encontrou uma média de extrativos de 4,2%. Silva et al. (2020) encontraram uma média de 2,84% em pellets de eucalipto.

Uma possível explicação pode estar associada à possibilidade desses resíduos serem formados por um número desconhecido de madeiras de diversas espécies. Outra explicação provável é a de que esses resíduos são provenientes de madeiras adultas e estão relacionados ao processo de cernificação. À medida que as células do parênquima radial vão envelhecendo e morrendo, estas são acrescentadas ao cerne, refletindo assim, no consumo de amido, aumento no conteúdo de extrativos e tiloses, consumo de oxigênio e liberação de CO₂ (HIGUCHI, 1997; SILVA et al., 2003). Além disso, a presença da casca pode contribuir com o aumento de extrativos. Já que estes são responsáveis por atribuir maiores teores de extrativos no indivíduo arbóreo (FOELKEL, 2006).

Não foi observado efeito significativo na medida em que foi adicionado eucalipto nos RMOU para teores de lignina (Figura 6B). Os teores de lignina achados para esse estudo variaram entre 30,33 a 32,75%. De modo geral, os valores encontrados estão de acordo com os relatados por Andrade (2017), que estudou resíduos madeireiros urbanos e pôde encontrar teores de lignina variando entre 24,06 a 34,65 %. Por outro lado, Ferreira (2017) estudou duas espécies de madeiras tropicais e *Eucalyptus* sp. e encontrou teores de lignina variando entre 27,33 a 34,60%.

Segundo Ferreira (2017), maiores teores de lignina e extrativos totais são desejáveis para a produção de energia de biomassa. A título de exemplo, a lignina é um dos principais ligantes naturais encontrados nas espécies de biomassa. Aumentar a temperatura do material ajuda a lignina atingir a temperatura de transição vítrea (em torno de 100-140°C), portanto, melhora o mecanismo de aglutinação entre as partículas (PENG et al., 2013). Além disso, maiores teores de lignina estão associados a altos valores de poder calorífico devido a sua grande concentração de carbono (PROTÁSIO et al., 2013). Conforme exposto, os valores encontrados para este estudo são sugeridos para o processo de briquetagem visando seu uso energético.

3.3 Materiais voláteis, carbono fixo e cinzas

Na Figura 9 são apresentados os valores dos materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas dos RMOU em função da adição de eucalipto.

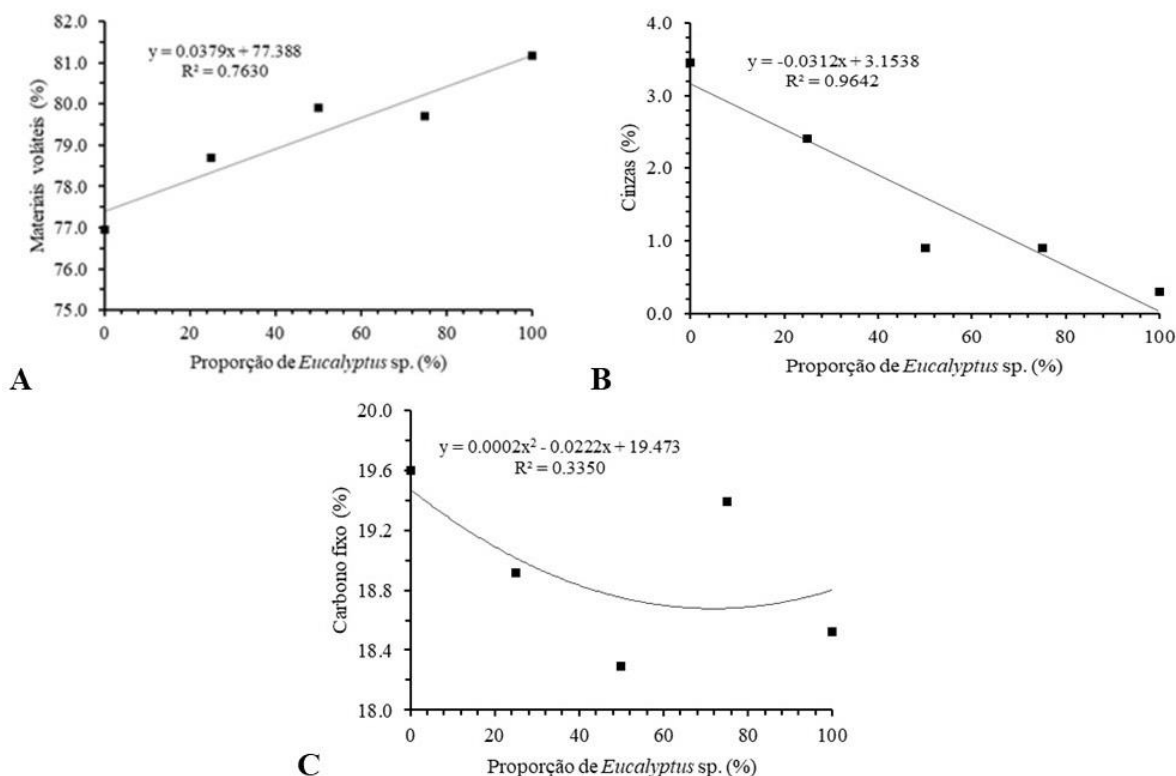


Figura 7. Valores observados e estimados para composição imediata dos RMOU em função da proporção de *Eucalyptus* sp. (p -valor < 0,05). Em que: (A) = materiais voláteis; (B) = teor de cinzas; (C) = carbono fixo. Fonte: a autora (2021).

O comportamento do teor de materiais voláteis foi inversamente proporcional ao teor de cinzas (Figura 7). Ou seja, o teor de materiais voláteis aumenta conforme o eucalipto é adicionado aos RMOU. Maiores porcentagens de teores de voláteis foram observados nos tratamentos com maior quantidade de eucalipto em sua composição. Tratando-se de resíduos de diferentes origens, maiores valores de materiais voláteis afetam a ignição, interferindo diretamente na queima da biomassa (VIEIRA, 2012). Dias Júnior et al. (2014), afirmam também que esse material é essencial para quando se necessita de presença de chamas no processo de combustão.

Segundo Brito et al. (1982), o teor de materiais voláteis para a madeira utilizada para fins energéticos encontra-se entre 75% e 85%. Os valores mínimo e máximo do teor de materiais voláteis encontrados neste trabalho foram de 76,95% (T1) e 81,17% (T5), respectivamente. Em estudo realizado por Brand (2010), foi encontrado valores de materiais voláteis variando entre 75 e 85% para a biomassa de eucalipto. Andrade (2017) encontrou para resíduos de MDF 79,89% e para madeira maciça 82,64%. Já Cupertino et al., (2020), analisando RMOU, encontraram para materiais voláteis teores médios de 76,8%, semelhantes aos valores encontrados neste trabalho.

Verificou-se que o teor de cinzas reduziu com o aumento da proporção de eucalipto nos RMOU (Figura 7A). Fato esse esperado, devido o eucalipto apresentar menores teores de

cinzas ao comparar-se aos RMOU. Além disso, os RMOU podem ter alguma contaminação com o solo resultando em acréscimo do teor de cinzas). Souza et al. (2020), observaram que a mistura de resíduos do processamento de café com madeira de eucalipto para a produção de pellets, contribuiu para a diminuição do teor de cinzas e aumento de material volátil. Comumente, espécies de eucalipto apresentam baixos teores de cinzas da madeira, em geral variando de 0,07% a 1% (PROTÁSIO et al., 2011; CHAVES et al., 2013).

Os maiores níveis médios encontrados para teor de cinzas foram para os tratamentos T1 e T2, sendo 3,45% e 2,41%, respectivamente (Figura 7B). Uma possível explicação pode ser devido à presença de componentes minerais e polietileno aderido aos RMOU, contato com o solo do pátio de estocagem e ao tempo de exposição dos resíduos as intempéries. Além disso, os RMOU eram compostos também por galhos e folhas, estes por sua vez, participam do processo fotossintético da planta, reservando maior quantidade de componentes inorgânicos e, consequentemente, aumentando o conteúdo de cinzas.

Altos teores de cinzas nas biomassas são indesejáveis para o uso em energia, pois emitirão mais partículas durante a combustão prejudicando assim, o funcionamento de equipamentos e demandando mais manutenção (BRAND et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013). Além disso, elevados teores de cinzas reduzem o poder calorífico (VITAL et al., 2013). De modo geral, a adição de eucalipto nos RMOU reduziu o teor de cinzas, permitindo aumentar seu fornecimento de energia para a produção de combustíveis sólidos.

Apesar do baixo coeficiente de determinação, na análise de regressão observou-se um leve decréscimo nos valores de carbono fixo à medida que o eucalipto foi adicionado nos RMOU (Figura 9C). Dias Júnior et al. (2017), encontraram maiores valores de carbono fixo para as maiores proporções de RMOU, sendo a mesma relação observada no presente trabalho.

Embora os RMOU apresentem maiores níveis de carbono fixo, a redução no teor de cinzas e o aumento do teor de materiais voláteis devem ser também levados em consideração. Com base nas características analisadas, é possível indicar os RMOU para o uso de energia e ainda, recomendar o uso destes para produção de combustíveis sólidos. No entanto, é importante estabelecer a proporção conforme a finalidade do combustível (uso industrial ou doméstico). Além disso, a otimização e a redução dos custos atrelados à utilização de RMOU com eucalipto para a produção de combustíveis sólidos devem ser levados em conta. Atrelados a isso está o melhor fornecimento de energia, baixa produção de cinzas, bom desempenho e aumento de vida útil dos equipamentos.

3.4 Poder calorífico superior, densidade a granel e densidade energética

Na Figura 8 são apresentadas as regressões para análise dos parâmetros definidos em função da proporção de eucalipto presentes nos RMOU.

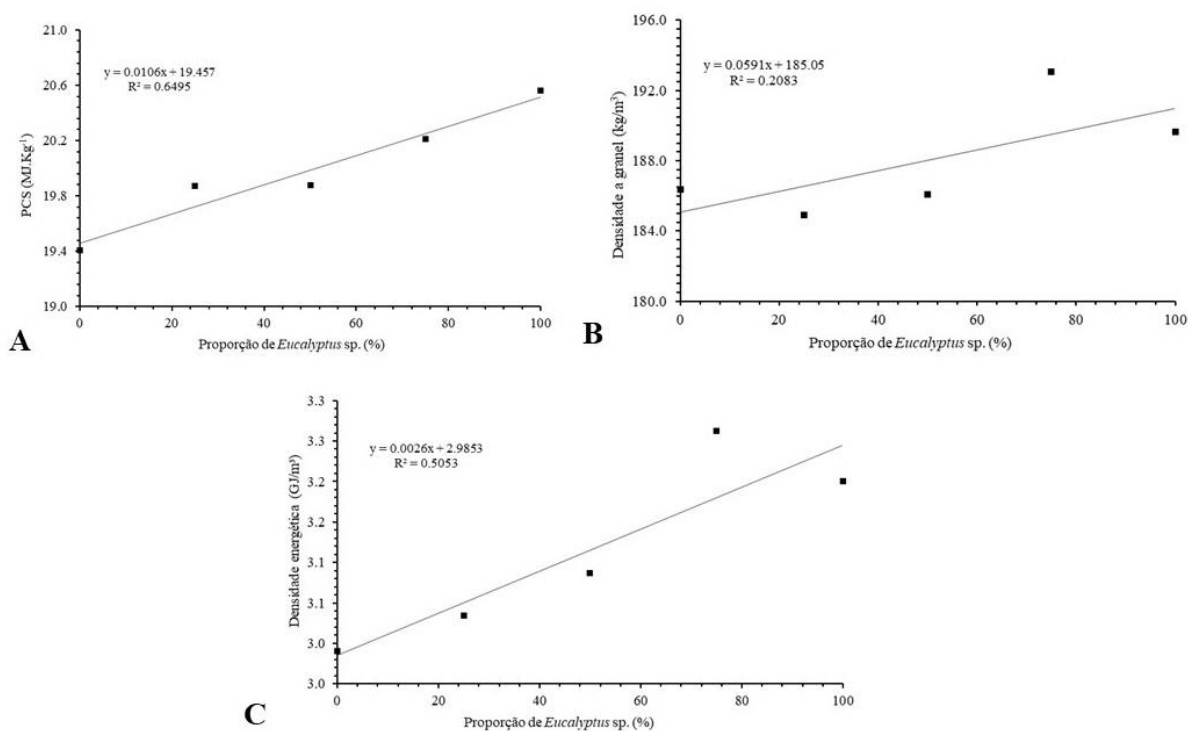


Figura 8. Poder Calorífico Superior (A), densidade a granel (B) e Densidade energética (C) dos RMOU em função da proporção de *Eucalyptus* sp. (p -valor < 0,05). Fonte: a autora (2021).

Analisando as informações da Figura 8A, foi possível observar que apesar do baixo coeficiente de determinação, houve uma leve tendência de aumento do poder calorífico superior (PCS) a partir do aumento de 50% de eucalipto nos RMOU. Os valores médios ficaram compreendidos entre 19,41 a 20,56 MJ.kg⁻¹ para as composições 100% RMOU (T1) e 100% eucalipto (T5), respectivamente. Os resultados sugerem que a adição de eucalipto não influenciou no PCS.

De modo geral, os maiores níveis de PCS ficaram compreendidos nos tratamentos que apresentaram menores teores de cinzas, ou seja, os que possuíam maiores quantidades de eucalipto (T3 e T4). Segundo Brand (2010), a maior proporção de materiais inorgânicos presentes na biomassa reduz a energia da combustão. Esse comportamento inversamente proporcional pode ser justificado também pela influência dos teores de lignina e extrativos influenciando diretamente no PCS. Sob o ponto de vista prático a adição de eucalipto para a melhoria das características energéticas dos RMOU teve pouca influência para este parâmetro.

Com base nos resultados, os valores mínimo e máximo de densidade a granel das biomassas ficaram compreendidos em 170,22 kg/m³ (T1) e 193,06 kg/m³ (T4), respectivamente (Figura 8B). Segundo Tumuluru et al. (2011), normalmente a densidade a granel de resíduos agrícolas varia entre 80 e 150 kg/m³ e a densidade a granel de madeira (cavacos ou serragem) varia entre 150 e 250 kg/m³. Para esse parâmetro todas as biomassas avaliadas em diferentes composições e granulometrias ficaram inferiores a 250 kg/m³. De acordo com Garcia (2010), avaliar a densidade a granel do material é de grande importância para quantificar volumes de produtos com forma variáveis, pois fornece informações que serão úteis para a logística e transporte por considerar os espaços vazios entre as partículas. Além disso, através desta é possível obter o cálculo para densidade energética (ANDRADE, 2017).

Observou-se baixa variância para densidade a granel, indicando uma relação negativa fraca nos tratamentos estudados. Também foi possível notar que os resultados apresentaram densidades muito próximas. Maiores valores de densidade a granel ocorreram para os

tratamentos T3 e T4. Em geral, biomassas muito heterogêneas apresentam tamanhos variáveis de partículas, resultando na segregação de várias frações devido as diferenças de densidade (TUMULURU et al., 2021). Foi possível observar também um acréscimo da curva à medida em que o eucalipto é adicionado nos RMOU. Uma possível explicação pode estar na possibilidade de a madeira de eucalipto ser mais densa quando comparados com os RMOU.

3.5 Análise termogravimétrica (TGA-DTG)

A perda de massa em função da temperatura (curva TGA) e as curvas DTG das diferentes proporções dos resíduos analisados são apresentadas na Figura 11.

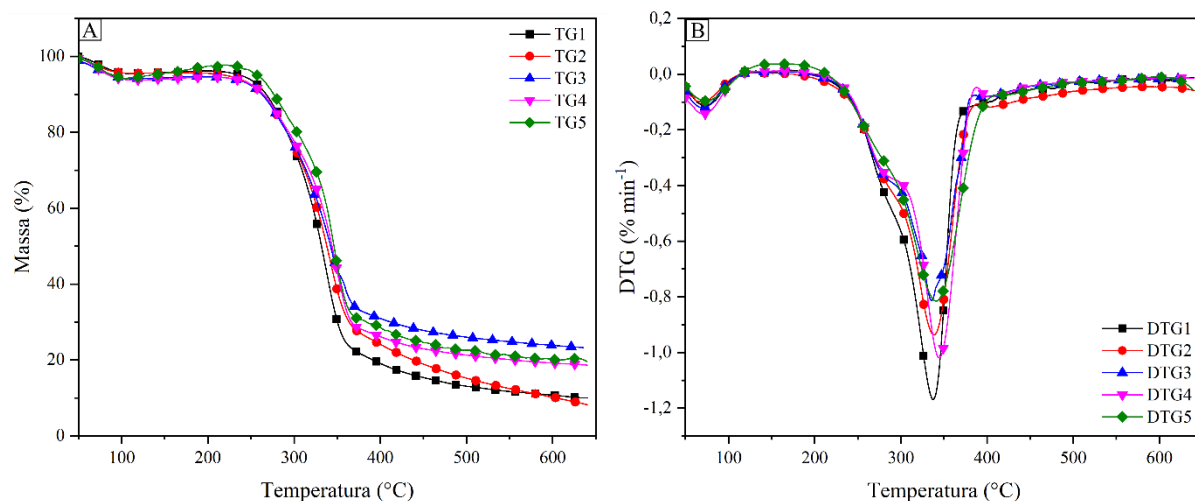


Figura 9. (A) Perda de massa em função da temperatura para as diferentes proporções dos resíduos; (B) Curvas de DTG para as diferentes proporções dos resíduos analisados.

Analisando as curvas de TGA é possível notar três regiões distintas: a 1ª região iniciando com temperaturas de aproximadamente 30 até 230 °C, esse estágio pode estar relacionado com a fase de volatilização de água e extrativos. A 2ª região com temperaturas de 230 a 370 °C, acarretando a perda de massa bastante pronunciada devido a liberação de materiais voláteis e a 3ª região acontecendo com temperaturas acima de 370 °C, onde as reações de pirólise ocorrem de fato (Figura 9A). Observou-se que a perda de massa e o máximo de temperatura no primeiro estágio para os diferentes tratamentos apresentaram pouca variação, este fato, pode estar relacionado com teores de umidade muito semelhantes entre as biomassas estudadas no início da análise termogravimétrica (COSTA et al., 2020).

Em relação a estabilidade térmica é possível observar que a composição constituída por 50% RMOU e 50% eucalipto (T3) foi a mais estável quando comparado com as demais. Provavelmente este comportamento pode estar atrelado ao maior valor de teores de lignina presente para nesse tratamento (32,39%). De acordo com Protásio et al. (2013) a lignina propicia maior estabilidade térmica quando comparado aos demais grupos moleculares, em virtude das ligações éter e carbono-carbono. Por fim, a maior perda de massa se deu nos tratamentos com 100% RMOU (T1) e 75% RMOU e 25% eucalipto (T2). Esse comportamento pode ser explicado por maiores proporções de cascas e folhas presentes nos RMOU.

Em relação às curvas de DTG (Figura 9B), nota-se que as curvas de TG3 e TG5 comportaram-se de forma bem similares. É possível observar nitidamente a formação de um pico invertido para o T1 na faixa de aproximadamente 340 °C, nos mostrando que esse foi o momento de máxima degradação da celulose. O tamanho do pico também é importante e está relacionado diretamente ao teor de carboidratos presentes na biomassa. Os resultados para este

trabalho estão de acordo com observados por Andrade (2017) com pico de 340 °C para resíduos de painéis.

3.6 Difração de raios-X

Os espectros de DRX dos tratamentos analisados são apresentados na Figura 12.

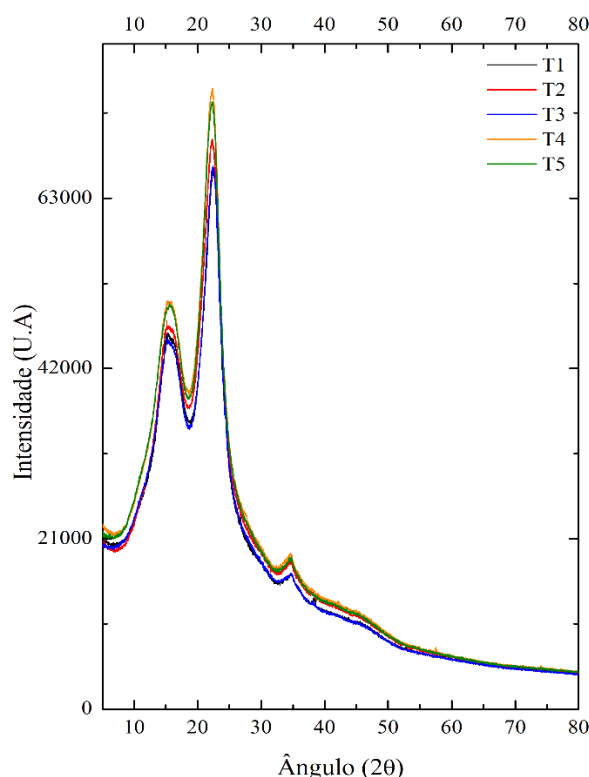


Figura 10. Difração de raios-X para os diferentes tratamentos.

A difração de raios-X (DRX) é comumente utilizada na avaliação da microestrutura de materiais, uma vez que esta técnica fornece informações de cristalinidade e tamanho do cristalito (ALMEIDA et al., 2019). Apesar da interferência das regiões amorfas da celulose, a presença de picos correspondentes aos planos cristalográficos no ângulo de Bragg (2θ) foram observados. A presença de celulose tipo II é observada por picos característicos em $2\theta = 15,5^\circ$ (plano 110) e celulose tipo I devido à presença de picos em $2\theta = 22,2^\circ$ (plano 200) e 35° (plano 004). O difrator de raios-X nos mostra que os principais picos ocorreram em 22° evidenciando que este pico é o mais intenso para todos os tratamentos, detectando material carbonáceo das blendas de RMOU. Os resultados corroboram com os encontrados por Ahmad et al. (2021), em cascas de coco. De acordo com os mesmos autores, a divisão dos picos é devido à transformação de carbono de uma fase alta para uma fase inferior.

Na tabela 2 são mostrados os índices de cristalinidade, obtidos a partir dos espectros de DRX para cristalinidade da biomassa são mostrados na Tabela 2, em que T4 exibiu cristalinidade máxima, seguidos por T5, T2, T3 e T1. Segundo Akhtar et al. (2019), maiores valores de cristalinidade presentes na biomassa podem demonstrar difíceis degradações frente ao tratamento térmico e ainda, a cristalinidade da biomassa está diretamente relacionada ao conteúdo de celulose e ligações complexas entre celulose, hemiceluloses e lignina. Diz-se que

uma amostra tem estruturas predominantemente amorfas se picos agudos estiverem ausentes (ANUAR et al., 2019).

Tabela 2. Índice de Cristalinidade e região amorfa das biomassas

Tratamentos	Índice de cristalinidade (%)	Região amorfa (%)
T1	24,74	75,26
T2	25,27	74,73
T3	24,75	75,25
T4	25,87	74,13
T5	25,81	74,19

4 CONCLUSÕES

Os RMOU utilizados neste trabalho apresentaram características semelhantes às tradicionais biomassas lenhosas usadas para fins energéticos, e, portanto, possuem potencial favorável para esta finalidade.

De maneira geral, a adição de eucalipto nos RMOU (blendas) apresentou valores de propriedades físicas, químicas e energéticas semelhantes entre si. No entanto, observou-se uma redução do teor de cinzas e menores degradações térmicas nas proporções iguais de RMOU e maravalha de eucalipto em comparação apenas com os demais. Assim, é possível considerar a o uso de até 50% de RMOU para minimizar o conteúdo de cinzas na produção de biocombustíveis sólidos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

ABRELPE – associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 03 mar. 2020.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2018/2019**. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018/2019/>>. Acesso em: 03 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP – M68. **Normas técnicas**. São Paulo. 1968.

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1333-1347, 2016. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.030>>.

AHMAD, R. K.; SULAIMAN, S. A.; YUSUP, S.; DOL, S. S.; INAYAT, M.; UMAR, H. A. Explorando o potencial da biomassa da casca do coco para a produção de carvão vegetal. **Ain Shams Engineering Journal**, 2021.

AKHTAR, A.; IVANOVA, T.; JIŘÍČEK, I.; KREPL, V. Detailed characterization of waste from date palm (*Phoenix dactylifera*) branches for energy production: Comparative evaluation of heavy metals concentration. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 1, p. 013102, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia, 2007.

ANDRADE, C. R. **Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético**. 2017. 85f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

ANDRADE, C. R.; DIAS JUNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; et al. Waste Wood of Urban Origin for Energy Use. **Revista Árvore**, v. 41, n. 2, p. 1–8, 2017.

ALMEIDA, T. H.; SARDELA, M.; LAHR, F. A. R. X-ray diffraction on aged Brazilian wood species. **Materials Science And Engineering**, v. 246, p. 96-103, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1981. 2p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 25p.

BAJWA, D. S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S. G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296-305, 2018. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>>.

BAZARGAN, A.; ROUGH, S. L.; MCKAY, G. Compactação de biochars de casca de palmiste para aplicação como combustível sólido. **Biomass and Bioenergy**, v. 70, p. 489-497, 2014.

BERGSTRÖM, D.; ISRAELSSON, S.; ÖHMAN, M.; DAHLQVIST, S. A.; GREF, R.; BOMAN, C.; WÄSTERLUND, I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 12, p. 1324-1329, 2008.

BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V.B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J.G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2365-2378, 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>>.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Interciência, 2010.

BRAND, M. A. et al. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (jacatirão-açu) na agricultura familiar em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRASIL, 2017. Ministério do Meio Ambiente. **Resíduos Sólidos**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%ADuos-org%C3%A2nicos.htm>. Acesso em: 04 de set. 2020.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Diário Oficial da União, Brasília, nº 147. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/civil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 22 de jul. 2019.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. **Seminário de abastecimento energético industrial com recursos florestais**, v. 2, p. 101-137, 1982.

CARVALHO, E. A.; BRINCK, V. **CETEM: BRIQUETAGEM–Cap. 15. CT2004-190- 00 Comunicação Técnica elaborada para a 4a Edição do Livro de Tratamento de Minérios**. p. 613-636, Rio de Janeiro, 2004.

CASTELLANO, J. M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L. S.; CARRASCO, J. E. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses. **Fuel**, v. 139, p. 629-636, 2015.

CORTEZ, C. L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia-estudo de caso: AES Eletropaulo**. 2011. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

COSTA, J. S.; SILVA, M. G.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ASSIS, M. R.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Relating features

and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-21, 2020.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de eucalyptus spp. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17; 2013.

CUPERTINO, G. F. M.; SOUZA, N. D.; DELATORRE, F. M.; SANTOS JUNIOR, A. J.; DIAS JÚNIOR, A. F. Resíduos madeireiros urbanos: abordagem técnica para a sua utilização como fonte de energia renovável e sustentável. In: Paulo Roberto Megna Francisco. (Org.). **Estudos e Inovações na Engenharia e Agronomia**. 2ed. Campina Grande: EPTEC, 2020, v. 2, p. 52-60.

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; ROSÁRIO, J. D. A.; COSTA, V. J. Quality of biomass from old wood waste deposits in Southern Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105841, 2020.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; COSTA JÚNIOR, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014.

DIAS JÚNIOR, A. F.; ANUTO, R. B.; ANDRADE, C. R.; SOUZA, N. D. D.; TAKESHITA, S.; BRITO, J. O.; NOLASCO, A. Influence of Eucalyptus wood addition to urban wood waste during combustion. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 455-464, 2017.

DIAS, J. M. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia-Documentos (INFOTECA-E)**, 2012.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14918: Determination of calorific value**. Belim: CEN, 2010b. 63 p.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2018: Ano base 2017, 2018**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em: 03 abr. 2020.

ESCOBAR, J. F. **A produção sustentável de biomassa florestal para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira**. 2016. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

ESPINOZA, P. T. et al. **Relatório da Avaliação regional da gestão de resíduos sólidos urbanos na América Latina e Caribe 2010**. AIDIS - Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y ambiental. São Paulo, 2011.

FAO. **Global population dynamics**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

FARIA, W. S. et al. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137- 147, 2016.

FELFLI, F. F.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 236-242, 2011.

FERREIRA, G. **Viabilidade técnica da produção de pellets de resíduos de madeira das espécies *Dinizia excelsa ducke* e *Manilkara elata* (Allemão ex miq.) Monach. para fins energéticos**. 2017. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro ES, 2017.

FOELKEL, C. Casca da árvore do eucalipto: aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando à produção de celulose e papel. **Eucalyptus Online Book and Newsletter**, 2006. 109p.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. 101 f. Dissertações (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GENDEK, A.; ANISZEWSKA, M.; MALAŤÁK, J.; VELEBIL, J. Evaluation of selected physical and mechanical properties of briquettes produced from cones of three coniferous tree species. **Biomass Bioenergy**, v. 117, p. 173–179, 2018.

GIL, M. V.; OULEGO, P.; CASAL, M. D.; PEVIDA, C.; PIS, J. J.; RUBIERA, F. Durabilidade mecânica e características de combustão de pellets de misturas de biomassa. **Bioresource technology**, v. 101, n. 22, p. 8859-8867, 2010.

GILVARI, H. de J. W.; SCHOTT, D. L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors-A review. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 117-134, 2019.

GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARNEN, K. V.; LUDWIG, C. H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: Wiley, 1971. p. 241- 298.

GOMES. M. H. S. C.; OLIVEIRA. E. C.; BRESCIANI. L. P.; PEREIRA. R. S. da. Política Nacional de Resíduos Sólidos: perspectivas de cumprimento da lei 12.305/2010 nos municípios brasileiros, municípios paulistas e municípios da região do ABC. **Revista de Administração da Universidade de Santa Maria**, Santa Maria, v. 7, p. 93-110, 2014.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. **[Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado]**. O Papel, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GONÇALVES, A. da. C. et al. Análise das condições de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no estado do Pará/Analysis of conditions for the management of urban solid waste in the state of Pará. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 67941-67954, 2020. <<http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n9-288>>.

HIGUCHI, T. **Biochemistry and molecular biology of wood**. Berlim: Springer-Verlag, 1997. 362 p.

HUANG, Y.; FINELL, M.; LARSSON, S.; WANG, X.; ZHANG, J.; WEI, R.; LIU, L. Biofuel pellets made at low moisture content–influence of water in the binding mechanism of densified biomass, **Biomass Bioenergy**, v. 98, p. 8–14, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório 2019**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acessado em 08 set. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-2: 2014 - Solid biofuels - Part 2 - Graded pellets**. Brussels, 2014a.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas/CEMPRE–Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Lixo Municipal: Manual de gerenciamento integrado**. 3ª ed. São Paulo, 2010.

LELA, B.; BARIŠIĆ, M.; NIŽETIĆ, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical–mechanical and thermal characteristics. **Waste Management**, v. 47, p. 236-245, 2016.

LIM, J.; Z.; BDUL MANAN, A.; WAN ALWI, S. R.; HASHIM, H. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 16, n. 5, p. 3084-3094, 2012.

JACINTO, R. C. et al. Utilização de resíduos da cadeia produtiva do pinhão para a produção de pellets para geração de energia. **Floresta**, v. 47, n. 3, 2017.

JOSHI, O.; GREBNER, D. L.; KHANAL, P.; N. Status dos resíduos urbanos de madeira e seu uso potencial para bioenergia sustentável no Mississippi. **Recursos, Conservação e Reciclagem**, v. 102, p. 20-26, 2015.

JURAS, I. A. G. M. Legislação sobre resíduos sólidos: comparação de 12.305/2010 com a legislação dos países desenvolvidos. **Câmara dos Deputados**, p. 1-56, 2012. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/publicacoes-da-consultoria-legislativa/areas-da-conle/tema14/2012_1658.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, p. 337–359, 2009.

KARLHAGER, J. **The swedish market for wood briquettes: Production and market development**. 2008. Tese de Doutorado. Sveriges lantbruksuniversitet.

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. Status overview of torrefaction technologies, a review of the commercialisation status of biomass torrefaction, **IEA Energy Technol. Network**, IEA Bioenergy Task 32 (2015).

KUMAR, S.; DHAR, H.; NAIR, V.; V.; BHATTACHARYYA, J.; K.; VAIDYA, A.; N.; AKOLKAR, A.; B. Caracterização de resíduos sólidos urbanos em regiões subtropicais de altitude. **Tecnologia ambiental**, v. 37, n. 20, p. 2627-2637, 2016.

LI, Y.; LIU, H.; ZHANG, O. High-pressure compaction of municipal solid waste to form densified fuel. **Fuel processing technology**, v. 74, n. 2, p. 81-91, 2011.

LINDLEY, J.; VOSSOUGH, M. Propriedades físicas dos briquetes de biomassa. **Transações da ASAE**, v. 32, n. 2, p. 361-0366, 1989.

LYON, S.; BOND, B. What is urban wood waste? **Forest products journal**, v. 64, n. 5-6, p. 166-170, 2014.

MALINAUSKAITE, J.; JOUHARA, H.; CZAJCZYŃSKA, D.; STANCHEV, P.; KATSOU, E.; ROSTKOWSKI, P.; THORNE, R. J.; COLON, J.; PONSÁ, S.; AL-MANSOUR, F.; ANGUILANO, L.; KRZYŻYŃSKA, R.; LOPEZ, I. C.; VLASOPOULOS, A.; SPENCER, N. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. **Energy**, v. 141, p. 2013-2044, 2017.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass Bioenergy**, v. 30, p. 648-654, 2006.

- MANZANO-AGUGLIARO, F.; ALCAYDE, A.; MONTOYA, F. G.; ZAPATA-SIERRA, A.; GIL, C. Scientific production of renewable energies worldwide: an overview. **Renew Sustain Energy Reviews**, v. 18, p. 134–143, 2013.
- MARIA, C.; GÓIS, J.; LEITÃO, A. Desafios e perspectivas das emissões de gases com efeito de estufa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Angola. **Relatórios de energia**, v. 6, p. 364-369, 2020.
- MARTINEZ, C.; L.; M. SERMYAGINA, E.; CARNEIRO, A.; D.; C.; O. VAKKILAINEN, E.; CARDOSO, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, 123, 70-77, 2019.
- MENEZES, M. J. S. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (Pinus sp) e Araucária (Araucaria angustifolia) de reflorestamento como resíduos de madeira.** 65p. Cascavel. UNIOESTE, 2013.
- MITCHUAL, J. S.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A. Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes. **Int. J. Energy Environ. Eng**, v. 4, n. 1, p. 1–6, 2013.
- NIEDZIÓŁKA, I.; SZPRYNGIEL, M.; KACHEL-JAKUBOWSKA, M. KRASZKIEWICZ, A.; ZAWISLAK, K.; SOBCZAK, P.; NADULSKI, R. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. **Renewable Energy**, v. 76, p. 312-317, 2015.
- NOLASCO, A. M.; ULIANA, L. R. Gerenciamento de resíduos na indústria de pisos de madeira. **Piracicaba: ANPM**, p. 40, 2014.
- OBI, O. F.; OKONGWU, K.; C. Characterization of fuel briquettes made from a blend of rice husk and palm oil mill sludge. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 6, n. 4, p. 449–456, 2016.
- OKOT, D. K.; BILSBORROW, P. E.; PHAN, A. N. Briquetting characteristics of bean straw-maize cob blend. **Biomass and Bioenergy**, v. 126, p. 150-158, 2019.
- OZKAN, B.; ARCAOZ, H.; FERT, C. Energy input-output analysis in Turkish agriculture. **Renewable Energy**, Oxford, v. 29, p. 39-51, 2004.
- PANWAR, V.; PRASAD, B.; WASEWAR, K. L. Biomass residue briquetting and characterization. **J. Energy Eng**. v. 137, p. 108–114, 2010.
- PENG, J. H.; BI, H. T.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ, S. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. **Energy Fuels**, v. 27, n. 2, 967–974, 2013.
- POLETTI, M. Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil Maderas. **Ciencia y Tecnología, Concepción**, v. 18, n. 3, p. 435-442, 2016.
- PRADHAN, P.; ARORA, A.; MAHAJANI, S. M. Avaliação em escala piloto da produção de pellets de combustível a partir de biomassa residual de jardim. **Energia para o desenvolvimento sustentável**, v. 43, p. 1-14, 2018.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Plano Diretor de Arborização Urbana da cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, p. 416, 2015.
- PROTÁSIO, T. P. et al. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, v. 8, p. 1166-1185, 2013.

PROTÁSIO, T. D. P.; MELO, I. C. N. A. D.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; MENDES, R. F.; TRUGILHO, P. F. Thermal decomposition of torrefied and carbonized briquettes of residues from coffee grain processing. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 37, n. 3, 221-228, 2013.

PROTÁSIO, T. P. et al. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p.273-283, 2011.

REBEHY, P. C. P. W.; COSTA, A. L.; CAMPELLO, C. A.; ESPINOZA, D. F.; NETO, M. J. Innovative social business of selective waste collection in Brazil: Cleaner production and poverty reduction. **J. Clean Prod**, v. 154, p. 462-473, 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.173>>.

RELOVA, I.; VIGNOTE, S.; LEÓN, M. A.; AMBROSIO, Y. Optimisation of the manufacturing variables of sawdust pellets from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 10, p. 1351-1357, 2009.

RÍOS-BADRÁN, I. M.; LUZARDO-OCAMPO, I.; GARCÍA-TREJO, J. F.; SANTOS-CRUZ, J.; GUTIÉRREZ-ANTONIO, C. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. **Renewable Energy**, v. 145, p. 500-507, 2020. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.048>>.

ROBERTS, J. J.; CASSULA, A. M.; OSVALDO PRADO, P.; DIAS, R. A.; BALESTIERI, J. A. P. Assessment of dry residual biomass potential for use as alternative energy source in the party of General Pueyrredón, Argentina. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 568–583, 2015. <<https://doi:10.1016/j.rser.2014.08.066>>.

SERRANO-RUIZ, J. C.; LUQUE, R.; SEPÚLVEDA-ESCRIBANO, A. Transformations of biomass-derived platform molecules: from high added-value chemicals to fuels via aqueous-phase processing. **Chemical Society Reviews**, v. 40, n. 11, p. 5266, 2011.

SHAOLI, D.; BISWAJIT, D. Prevalence of health hazards associated with solid waste disposal—A case study of kolkata, India. **Pro. Environ. Sci**, v. 35, p. 201–208, 2016.

SILVA, D. A.; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alborno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Cerne**, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, P. D. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando o aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SILVA, S. B.; ARANTES, M. D. C.; ANDRADE, J. K. B.; ANDRADE, C. R.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PROTÁSIO, T. P. Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. **Renewable Energy**, v. 147, p. 1870-1879, 2020.

SILVÉRIO, F. O. et al. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 6, n. 62, p. 1009-1016, 2006.

SOUZA, H. J. P. L. **Caracterização de pellets de eucalipto e resíduos de despolpa de café**. 2016. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro ES, 2016.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **204 om-88**: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 1996.

TAN, S.; T.; HO, W.; S.; HASHIM, H.; LEE, C.; T.; TAIB, M. R.; HO, C.; S. Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia. **Energy Convers. Manag.**, v. 102, 111-120, 2015. <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>>.

TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P. D.; HARTMANN, H.; BÖHM, T. Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. **Biomass Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 964–972, 2006.

THE WORLD BANK, 2018. **Solid Waste Management**. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>. Acesso em: 05 abr. 2021.

TUMULURU, J. S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v.119, p. 44-57, 2014.

TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; HESS, J. R.; WRIGHT, C. T. BOARDMAN, R. D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, **Ind. Biotechnol.**, v. 5, 2011. <<https://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>>.

TUMULURU, J. S.; TABIL, L. G.; SONG, Y.; IROBA, K. L.; MEDA, V. Impact of process conditions on the density and durability of wheat, oat, canola, and barley straw briquettes. **Bioenergy research**, v. 8, n. 1, p. 388–401, 2015.

TUMULURU, J. S.; YANCEY, N. A.; KANE, J. J. Pilot-scale grinding and briquetting studies on variable moisture content municipal solid waste bales–Impact on physical properties, chemical composition, and calorific value. **Waste Management**, v. 125, p. 316-327, 2021.

VALE, A. T., BRASIL, M. A. M., CARVALHO, C. M., VEIGA, R. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v.6, n.1, p.83-88, 2000.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da Madeira para Fins Energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG, p. 322-354, 2013.

WAKCHAURE, G. C.; INDRA, M. Effect of binders on the physical quality of some biomass briquettes. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 46, n. 4, p. 24–30, 2009.

WANG, C.; CHANG, Y.; ZHANG, L.; PANG, M.; HAO, Y. A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China. **Energy**, v. 120, p. 374-384, 2017.

WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 1, p. 153-162, 2018.

WU, M. R.; SCHOTT, D. L.; LODEWIJKS, G. Physical properties of solid biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 2093–2105, 2011.

WIECHETECK, M. Aproveitamento de resíduos e subprodutos florestais, alternativas tecnológicas e propostas de políticas ao uso de resíduos florestais para fins energéticos. **Projeto PNUD BRA 00/20–Apoio às políticas públicas na área de gestão e controle ambiental. Curitiba, 2009.**

YAMAN, S.; SAHAN, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; SESEN, K.; KUCUKBAYRAK, S. Fuel briquettes from biomass–lignite blends, **Fuel Process. Technol**, v. 72, p. 1–8, 2001.

YAMAN, S.; SAHAN, M.; HAYKIRI-ACMA, H.; SESEN, K.; KUCUKBAYRAK, S. Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. **Fuel Process. Technol**, v. 68, p. 23–31, 2000.

ZAINUDDIN, M. F.; ROSNAH, S.; NORIZNAN, M. M.; DAHLAN, I. Efeito do teor de umidade nas propriedades físicas de pellets de ração animal a partir de resíduos de abacaxizeiro. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 224-230, 2014.

ZENG, T.; WELLER, N.; POLLEX, A.; LENZ, V. Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices, **Fuel**, v. 184, p. 689–700, 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.047>

CAPÍTULO II

EFEITO DO TAMANHO DA PARTÍCULA NO PROCESSO DE BRIQUETAGEM DOS RESÍDUOS MADEIREIROS DE ORIGEM URBANA EM BLENDA COM EUCALIPTO

**EFFECT OF THE PARTICLE SIZE ON THE BRIQUETTING PROCESS OF WOOD
RESIDUES OF URBAN AND EUCALYPT ORIGIN**

RESUMO

Este capítulo investigou o uso de Resíduos Madeireiros de Origem Urbana (RMOU) e maravalha de eucalipto como matéria-prima para a produção de briquetes como fonte alternativa de energia. Especificamente, o estudo teve como objetivo caracterizar a produção de briquetes misturados com diferentes proporções e tamanhos de partícula variados a fim de investigar o efeito do tamanho da partícula no processo de briquetagem. Os briquetes foram produzidos em escala laboratorial, utilizando temperatura 90 °C e pressão de compactação constante de 1000 psi com posterior resfriamento durante cinco minutos. Foram analisados cinco tratamentos com composições de RMOU e eucalipto, sendo T1 = 100/0, T2 = 75/25, T3 = 50/50, T4 = 25/75 e T5 = 0/100, respectivamente e três tamanhos de partícula (0,84 mm, 0,42 mm e 0,25 mm) sem uso de aglutinante. Para avaliação dos briquetes foram determinadas as seguintes propriedades: densidade aparente, densidade energética, resistência à compressão, expansão volumétrica, absorção de água, dureza e colorimetria. De acordo com os resultados, observou-se que a diminuição do tamanho da partícula na composição dos briquetes proporcionou incrementos na resistência e densidade. Os briquetes produzidos em diferentes composições e granulometrias apresentaram densidade energética entre 18,12 e 21,23 GJ/m³. Conclui-se que os resíduos utilizados neste estudo apresentaram potencial para a produção de briquetes, bem como é sugerida a composição de 50% de RMOU, sem a necessidade de processo de trituração para partículas abaixo de 0,85 mm.

Palavras-chave: Granulometria; Compactação; Densidade energética; Biocombustível sólido.

ABSTRACT

This chapter investigated the use of Urban Wood Waste (RMOU) and eucalyptus wood shavings as raw material for the production of briquettes as an alternative source of energy. Specifically, the study aimed to characterize the production of blended briquettes with different proportions and varying particle sizes in order to investigate the effect of particle size in the briquetting process. The briquettes were produced on a laboratory scale, using a temperature of 90 °C and a constant compaction pressure of 1000 psi with subsequent cooling for five minutes. Five treatments with compositions of RMOU and eucalyptus were analyzed, being T1 = 100/0, T2 = 75/25, T3 = 50/50, T4 = 25/75 and T5 = 0/100, respectively, and three particle sizes (0,84 mm, 0,42 mm and 0,25 mm) without the use of binder. To evaluate the briquettes, the following properties were determined: bulk density, energy density, compressive strength, volumetric expansion, water absorption, hardness and colorimetry. According to the results, it was observed that the decrease in particle size in the composition of the briquettes provided increases in strength and density. The briquettes produced in different compositions and particle sizes presented energy density between 18,12 and 21,23 GJ/m³. It is concluded that the residues used in this study presented potential for the production of briquettes, as well as an optimization of 50% of RMOU, without the need for a crushing process for particles below 0, 84 mm.

Keywords: Granulometry, Compaction; Energy density; Solid biofuel

1 INTRODUÇÃO

Resíduos madeireiros de origem urbana (RMOU) têm o potencial de se tornar um importante recurso reutilizável. No entanto, podem ser considerados como uma biomassa lignocelulósica altamente heterogênea, pois são compostos por uma mistura de materiais lenhosos de diversos formatos e tamanhos irregulares, além de possuírem alta umidade e baixa densidade (LI et al., 2000). Cabe mencionar o descarte indevido desses resíduos em aterros sanitários e locais a “céu aberto”, acarretando assim, problemas para as metrópoles. Alguns autores mencionam o uso de tecnologias de transformação desses resíduos em energia (BHANGE et al., 2014; YOUNGS, 2011). A fim de solucionar essas dificuldades, a compactação dos resíduos torna-se uma alternativa viável para a produção de um material com melhores características energéticas e logísticas.

Sabe-se que o uso de combustíveis sólidos na forma de briquetes em caldeiras e fornos, seja para fins domésticos ou industriais permite uma queima mais uniforme e melhores condições de transporte, manuseio, armazenamento e alimentação de equipamentos (LIM et al., 2012; TUMULURU et al., 2011; DIAS, 2002). Outra vantagem do uso de briquetes é a concentração da energia disponível, ou seja, há maior geração de energia por unidade de massa do material, fato que também contribui para a economia no transporte, pois um mesmo volume de briquetes pode ter cinco vezes mais energia que a madeira in natura (QUIRINO & BRITO, 1991).

No entanto, há de se mencionar que as matérias primas da biomassa precisam ser trituradas em pequenas partículas antes da briquetagem e isso requer maior consumo de energia. De acordo com Wang et al. (2018), o tamanho da partícula afeta o processo de briquetagem e a mistura de materiais de diferentes tamanhos pode melhorar a produção de biocombustíveis sólidos. Dessa forma pode-se salientar a importância de estudar os efeitos do tamanho das partículas da matéria-prima no processo de briquetagem visando à otimização de parâmetros de produção.

Portanto, a compactação na forma de briquetes é uma possibilidade de contornar as desvantagens do aproveitamento dos Resíduos Madeireiros de Origem Urbana (RMOU) para geração de energia, e simultaneamente, contribuir para atenuação do problema ambiental consequente da disposição desses resíduos em locais inadequados, tornando-os produtos de maior valor agregado. Sendo assim, o objetivo desse capítulo foi avaliar a produção de briquetes a partir de diferentes proporções de RMOU e eucalipto e verificar a influência do tamanho da partícula desses resíduos no processo de briquetagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Produção e caracterização dos briquetes

Para a produção dos briquetes utilizaram-se os Resíduos Madeiros de Origem Urbana (RMOU) e a maravalha da madeira de eucalipto. O teor de umidade da biomassa variou de 9 a 11%. Posteriormente, foram triturados em moinho de martelo e classificados em peneiras sobrepostas com abertura de malha 20 mesh (0,84 mm), 40 mesh (0,42 mm) e 60 mesh (0,25 mm).

A compactação do material foi realizada em uma briquetadeira laboratorial, modelo LB 32 (Figura 11). As condições de briquetagem foram definidas experimentalmente a partir de testes preliminares realizados em laboratório. Os materiais foram comprimidos durante quatro minutos à de 90 °C e pressão de 1000 psi com posterior resfriamento durante cinco minutos. Os RMOU foram utilizados em proporções de 0% (T1), 25% (T2), 50% (T3), 75% (T4) e 100% (T5) de eucalipto. Para cada briquete foram utilizados 18 gramas de cada material e fabricados 15 briquetes para cada composição e granulometria, totalizando 225 briquetes.

Após a produção, os briquetes foram mantidos em temperatura ambiente por três dias e após, levados câmara climatizada com umidade e temperatura controlada ($65 \pm 1\%$ e 25 ± 3 °C, respectivamente) por mais três dias até atingir a umidade de equilíbrio. Os briquetes foram pesados em balança laboratorial e medidos com auxílio de paquímetro durante os seis de avaliação.



Figura 11: Briquetadeira de laboratório de marca Lippel.

2.2 Densidade aparente e densidade energética dos briquetes

A densidade aparente (DA) dos briquetes foi determinada pelo método estequiométrico, que consistiu em obter o volume a partir de medições com paquímetro e a massa do briquete com balança de precisão de 0,001g. A DA foi obtida por meio da relação massa/volume, representada na equação a seguir.

$$DA = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Em que: DA = Densidade aparente (g/cm³); M = Massa do briquete (g); V = Volume do briquete (cm³).

A densidade energética (GJ/m³) foi obtida por meio da multiplicação do poder calorífico líquido pela densidade aparente do briquete, conforme proposto por Andrade (2017).

2.3 Avaliação da expansão volumétrica e absorção de água

A expansão volumétrica foi obtida pela variação de volume dos briquetes, medidos logo após sua compactação e, posteriormente, após sua exposição em ambiente não climatizado durante três dias, e depois levados, pelo mesmo período, para sala de climatização com umidade relativa do ar e temperatura de 65 ± 1% e 25 ± 3 °C.

A expansão volumétrica foi obtida a partir da Equação 5.

$$EXP = (Vol_2 - Vol_1) / Vol_1 \times 100 \quad (5)$$

Em que: Exp = expansão volumétrica dos briquetes; Vol₁ = volume do briquete imediatamente após a compactação (cm³); Vol₂ = volume do briquete (cm³).

A absorção de umidade atmosférica foi determinada por meio da variação de massa ao longo do tempo usando-se uma balança com precisão de 0,001 gramas.

2.4 Resistência a compressão diametral dos briquetes

A resistência à compressão diametral dos briquetes (Equação 6) ocorreu de forma semelhante à realizada por Cubero-Abarca et al. (2014), em uma máquina universal de ensaios, com capacidade máxima de 10⁵ N. A força foi aplicada perpendicularmente na lateral dos briquetes, com velocidade de ensaio de 3 mm.min⁻¹. A carga máxima foi dividida pelo comprimento do briquete (mm), para a determinação da resistência à compressão.

$$\text{Compressão diametral} = \frac{2 \cdot \text{Força máxima (N)}}{\pi \cdot \text{Diâmetro (mm)} \cdot \text{Comprimento (mm)}} \quad (6)$$

Na ausência de normas específicas para os testes mecânicos em briquetes, o procedimento foi realizado com adaptação da Norma para concreto NBR 7222, cujo título é concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos).

2.5 Análise das propriedades colorimétricas

A análise da cor dos briquetes foi avaliada através da metodologia do sistema CIE-L*a*b* (CIE, 1976). De acordo com as regras da Commission Internationale de L'Eclairage, o sistema é composto por três coordenadas: luminosidade ou claridade (L *) no eixo preto e

branco (varia de 0 a 100), eixo verde / vermelho (a^*) e eixo azul / amarelo (b^*), ambos variando de 60 a -60 em espaço tridimensional tal como é ilustrado na Figura 15 (JOHANSSON, 2005).

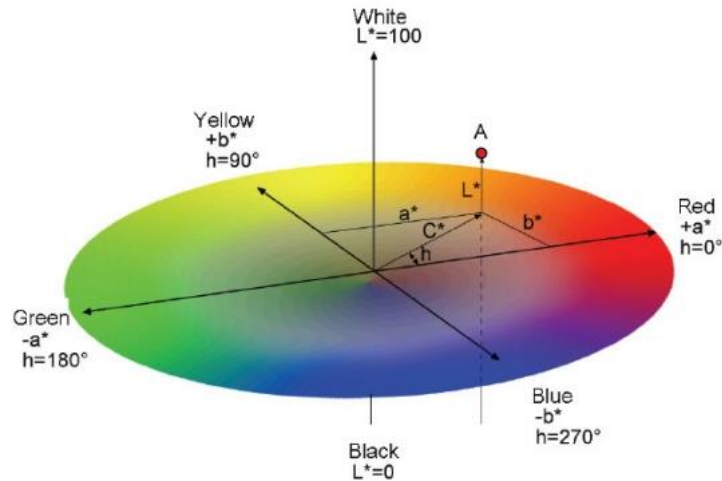


Figura 12. Espaço de cor tridimensional do sistema CIE- $L^*a^*b^*$. L^* . Em que: a^* e b^* = variáveis cromáticas; L^* = luminosidade; C^* = croma; h = ângulo de matiz (adaptado de Johansson, 2005).

A coordenada L^* representa a luminosidade ou brilho, a qual varia de zero (preto absoluto) a 100 (branco absoluto), enquanto que a^* e b^* representam as coordenadas cromáticas. A coordenada a^* posiciona a cor do objeto no eixo verde-vermelho enquanto que a coordenada b^* descreve a cor do objeto no eixo amarelo-azul. No diagrama CIE- $L^*a^*b^*$, os sinais positivos e negativos significam: $+a^*$ aumento na cor vermelha, $-a^*$ aumento na cor verde, $+b^*$ aumento na amarela e $-b^*$ aumento na cor azul (SILVA et al., 2007). As medições dos parâmetros cromáticos foram realizadas com auxílio de um espectrofotômetro portátil CM-2600d da Konica Minolta.

O diâmetro de abertura utilizado para a área de iluminação do aparelho foi de 3 mm (SAV – Small Area View). Utilizou-se o “iluminante” padrão D65, ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. Para as leituras, o aparelho foi calibrado com o padrão branco, utilizou-se uma placa de calibração do próprio aparelho. Foram utilizados cinco briquetes de cada tratamento, escolhidos aleatoriamente, mas com características boas, ou seja, briquetes bem plastificados e sem fissuras.

2.5 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Statsoft 7, ao nível de 95% de confiança em todos os testes. Nos testes paramétricos foram realizados Brown-Forsythe de homogeneidade de variância, Kolmogorov-Smirnov para verificação da normalidade dos dados, análise de variância para experimento fatorial e sendo o teste F significativo foi aplicada análise de regressão linear simples ou polinomial, dependendo do comportamento dos dados. Das variáveis obtidas e testadas a que apresentou distribuição normal e variâncias homogêneas foi apenas a resistência à compressão diametral.

Quando os pressupostos paramétricos não foram atendidos, usou-se o teste de Kruskal-Wallis sendo o teste de Dunn utilizado para comparação entre as médias dos postos, a saber: densidade aparente e energética, expansão volumétrica, absorção de água e dureza dos briquetes.

Também foram realizadas análises de correlação de Pearson entre coordenadas de cor (L*, a*, b*, C e h*), teor de extrativos, proporção de eucalipto, granulometria e densidade energética.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade aparente e energética dos briquetes

Os valores médios da densidade aparente para proporção e granulometria são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios obtidos para densidade aparente dos briquetes nas diferentes composições e granulometrias

Proporção de eucalipto (%)	Densidade aparente (g.cm ⁻³)
0	1,19 [128,96] ^a
25	1,18 [111,02] ^{ab}
50	1,20 [130,78] ^a
75	1,18 [111,84] ^{ab}
100	1,17 [82,40] ^b
Granulometria (mesh)	Densidade aparente (g.cm ⁻³)
20	1,17 [69,83] ^c
40	1,18 [109,76] ^b
60	1,20 [159,41] ^a

Os valores entre colchetes correspondem à média dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra são estatisticamente iguais entre si pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade (teste de Kruskal-Wallis).

Para a densidade aparente verificou-se um pequeno aumento destas propriedades com a adição de 50% de eucalipto nos RMOU. Os valores mínimo e máximo de densidade aparente dos briquetes variaram entre 1,13 e 1,26 g.cm⁻³. A razão entre a densidade aparente do briquete e a densidade a granel dos resíduos pode ser dita como razão de compactação, e quanto maior essa razão, maior a redução do volume do briquete e maior o ganho em densidade (RODRIGUES, 2010). Os resultados atuais estão de acordo com os achados para os briquetes produzidos com resíduos de poda e papelão que variaram entre 1,10 e 1,28 g.cm⁻³ (SOUZA, 2014).

Quanto à granulometria foi possível observar que todos os briquetes apresentaram valores médios diferentes estatisticamente. Em geral, a densidade aparente aumenta à medida que o tamanho da partícula diminui. Os resultados indicam que os briquetes produzidos a temperaturas de 90°C e com moderada pressão de compactação exibem resultados para densidade bem similares quando comparados com a literatura (PROTÁSIO et al., 2011; RODRIGUES et al., 2010; GENTIL et al., 2008; QUIRINO, 2002). Tal aspecto é importante, para a obtenção de briquetes com menor gasto energético e financeiro. Além disso, observou-se que os briquetes produzidos com 40 e 60 mesh apresentaram-se mais duráveis logo após a sua compactação. Menores tamanhos de partículas resultam em melhores ligações entre fibras e partículas, aumentando a densidade do material (KIRSTEN et al., 2016).

Os resultados dispostos na Tabela 4 mostram ausência de efeito significativo da proporção de eucalipto para a densidade energética. Neste estudo foram observadas diferenças significativas para essa propriedade para os briquetes produzidos com diferentes granulometrias de partículas.

Tabela 4. Valores médios obtidos para densidade energética dos briquetes nas diferentes composições e granulometrias

Proporção de eucalipto	Densidade energética (GJ/m ³)
0	19,65 [37,00]*
25	19,36 [29,48]*
50	19,96 [51,27]*
75	19,53 [36,27]*
100	19,56 [36,00]*
Granulometria (mesh)	Densidade energética (GJ/m ³)
20	19,35 [31,04] ^c
40	19,50 [34,56] ^{bc}
60	20,00 [48,40] ^{ab}

Os valores entre colchetes correspondem à média dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra são estatisticamente iguais entre si pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade (teste de Kruskal-Wallis); *: não significativo à 95% pelo teste de Kruskal-Wallis.

De modo geral, observou-se um pequeno aumento da densidade energética para os briquetes produzidos com 0,42 e 0,25 mm. Isso pode ser atribuído ao aumento da compactação de partículas menores devido a uma melhor ligação, ou seja, quanto menor o tamanho da partícula, maior a área de superfície o que poderia ter levado a uma melhor ligação e consequentemente, maior aumento da densidade energética (MITCHUAL et al., 2013). Destaca-se o aumento médio de massa por unidade de volume de 4,53 até 5,24 vezes em relação às partículas não compactadas para os briquetes, evidenciando a vantagem do material compactado, com grande quantidade energética e em um volume reduzido, otimizando o espaço para transporte e estocagem na mesma proporção da taxa de compactação.

3.2 Expansão volumétrica e absorção de água

A Tabela 5 mostra os efeitos da expansão volumétrica nos briquetes produzidos em função da proporção e granulometria.

Tabela 5. Valores médios obtidos para expansão volumétrica dos briquetes nas diferentes composições e granulometrias.

Proporção de eucalipto (%)	Expansão volumétrica (%)
0	8,39 [124,20] ^a
25	6,40 [76,75] ^b
50	7,57 [116,39] ^a
75	8,12 [128,64] ^a
100	7,44 [112,02] ^{ab}
Granulometria (mesh)	Expansão volumétrica (%)
20	6,70 [86,88] ^b
40	7,41 [108,00] ^b
60	8,63 [139,62] ^a

Os valores entre colchetes correspondem à média dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra são estatisticamente iguais entre si pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade (teste de Kruskal-Wallis).

Verificou-se que a expansão volumétrica dos briquetes variou entre 5,52% a 11,16%. A maior taxa de expansão volumétrica ao longo de todo período avaliado foi a dos briquetes produzidos somente de resíduos madeireiros de origem urbana (0% de eucalipto) e para os briquetes produzidos com partículas de diâmetros as quais ficaram retidas na peneira de 60 mesh. Esses valores podem ser considerados pequenos se comparados aos achados por Yamaji et al. (2013), onde a expansão foi de 18% para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar e 35% para briquetes de capim elefante.

Protásio et al. (2011) encontraram para resíduos de milho e serragem de eucalipto valores de expansão volumétrica variando de 10,05 a 35,35% e 5,07 a 19,68%, respectivamente. Os mesmos autores avaliaram o efeito de cada briquete dentro de cada nível de tempo e puderam concluir que variações volumétricas elevadas em briquetes podem contribuir para uma diminuição da densidade aparente e energética desses biocombustíveis sólidos.

Observando a Tabela 6, nota-se que os valores médios para adsorção de água foram maiores nos briquetes produzidos com 0 e 75% de eucalipto (T1 e T4), sendo eles estatisticamente iguais através do teste de Kruskal-Wallis. De modo geral, é possível dizer que o ganho de massa por adsorção de água nos briquetes tiveram valores acima de 1%. Desse modo, os resíduos utilizados neste estudo, quando compactados apresentam baixa influência na expansão volumétrica em função de variações na taxa de adsorção de água.

Tabela 6. Valores médios obtidos para adsorção de água dos briquetes nas diferentes composições e granulometrias.

Proporção de eucalipto (%)	Absorção de água (%)
0	1,15 [120,11] ^{ab}
25	1,02 [87,67] ^{bc}
50	1,01 [81,26] ^{cd}
75	1,22 [156,02] ^a
100	1,07 [106,41] ^{bd}
Granulometria (mesh)	Absorção de água (%)
20	1,04 [92,46] ^b
40	1,10 [114,12] ^{ba}
60	1,15 [125,16] ^a

Os valores entre colchetes correspondem à média dos postos feitos pelo teste de Kruskal-Wallis. Médias com a mesma letra são estatisticamente iguais entre si pelo teste de Dunn ao nível de 95% de probabilidade (teste de Kruskal-Wallis).

Boas (2011) avaliou o efeito do tratamento térmico e o efeito da compactação para produção de briquetes e encontrou resultados variando entre 1,67 a 3,43% para adsorção de água. Yamaji et al. (2013) encontraram uma média de 3,96% para briquetes produzidos com serragem eucalipto, valor superior ao encontrado nesse trabalho quando comparado a 100% de eucalipto. Ainda que tenham apresentado variações entre os cinco tratamentos e nas três granulometrias para esses parâmetros, essas por sua vez, não ocorreram de forma acentuada. Ou seja, os valores médios para a característica de expansão volumétrica e adsorção de água foram baixos quando comparados aos encontrados na literatura.

3.3 Resistência a compressão diametral dos briquetes

A análise de variância para experimento fatorial feita para resistência a compressão dos briquetes é apresentada na Tabela 7. O efeito da proporção e interação entre esta variável e

granulometria não expressaram influência significativa em relação a resistência a compressão, apenas a granulometria como indica o valor p, com 95% de confiança.

Tabela 7. Valores de F e p realizados para resistência a compressão em função da proporção, granulometria e interação proporção x granulometria dos briquetes.

Fonte de variação	F	Valor p
Proporção	1,606	0,184478
Granulometria	36,860	0,000000*
Proporção*Granulometria	1,335	0,244014

* Significativo à 95% de probabilidade.

Na Figura 13 é apresentada a regressão linear para resistência a compressão em função da granulometria.

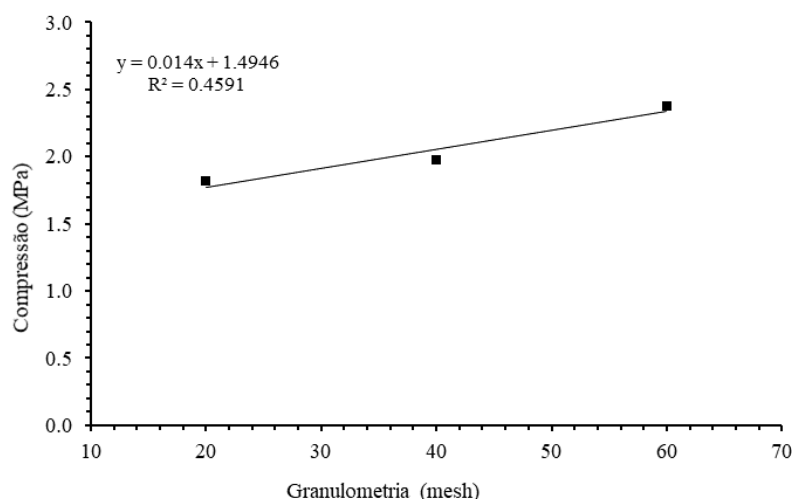


Figura 13. Valores de resistência a compressão (MPa) em função da granulometria. Equações de regressão: $MPa = 0,014x + 1,4946$, $R^2 = 0,4591$ (p -valor $< 0,05$). Fonte: a autora (2021).

Os resultados dispostos na Figura 13 evidenciam que a resistência à compressão aumenta na medida em que a granulometria diminui. Os briquetes produzidos a 60 mesh (partículas mais finas) obtiveram valores médios de 2,38 MPa. Isso pode ser explicado ao fato de briquetes produzidos com tamanho de partículas mais finas são menos porosos devido à ligação intermolecular mais forte entre as partículas, que por sua vez aumenta a resistência a compressão dos briquetes (AJIMOTOKAN et al., 2019).

Hansted et al. (2016) obtiveram valores de 0,34, 0,41 e 0,52 MPa para resistência à compressão para briquetes produzidos com madeira de leucena e 0,38, 0,52 e 0,41 MPa para briquetes produzidos com madeira de pau-jacaré. Brand et al. (2017) analisaram briquetes de palha de arroz e casca de arroz usando 120°C de temperatura, e encontraram valores de resistência à compressão entre 3,73 MPa. Granado et al. (2021) avaliaram briquetes de resíduos de mandioca e puderam encontrar valores entre 0,41 e 1,29 MPa.

Para tanto, há de se destacar os valores médios encontrados para os briquetes produzidos em peneiras retidas em 20 e 40 mesh. Estes por sua vez, apresentaram valores médios compreendidos em 1,82 e 1,97 MPa, respectivamente. Os resultados demonstram que, apesar dos briquetes produzidos com partículas menores (retidas em peneira de 60 mesh) terem sido mais resistentes a compressão, os briquetes produzidos com granulometrias de 20 e 40

mesh não devem ser descartados, pois estes são viáveis para formação de briquetes fisicamente estáveis. Além disso, maiores resistências à compressão apresentam vantagens como, por exemplo, a redução de danos nos briquetes durante o transporte e armazenagem, e até mesmo durante o uso energético, reduzindo sua fragmentação (FREITAS et al., 2016).

3.4 Colorimetria pelo sistema de cor CIE-L*a*b*

Na Tabela 8 encontram-se os resultados das análises colorimétricas realizadas nos briquetes. Os parâmetros colorimétricos tinham os seguintes valores médios: 58-65 (L*); 6-13 (a*); 16-21 (b*); 17-24 (C); 56-71 (h*).

Tabela 8. Valores médios das coordenadas colorimétricas dos briquetes por composição e granulometria

Briquetes	Granulometria (mesh)	L*	a*	b*	C	h*
RMOU	20	60,88	6,35	18,25	19,33	70,80
RMOU	40	59,45	6,24	18,00	19,06	70,89
RMOU	60	58,08	5,49	16,61	17,49	71,69
RMOU75+E25	20	61,97	8,22	18,71	20,46	66,24
RMOU75+E25	40	60,69	8,11	18,30	20,02	66,09
RMOU75+E25	60	58,73	6,87	16,90	18,24	67,87
RMOU50+E50	20	63,76	8,92	19,21	21,19	65,09
RMOU50+E50	40	62,24	8,92	18,60	20,63	64,41
RMOU50+E50	60	61,62	8,23	18,05	19,84	65,49
RMOU25+E75	20	63,57	10,77	19,20	22,02	60,71
RMOU25+E75	40	63,50	10,61	19,20	21,94	61,08
RMOU25+E75	60	63,29	9,69	19,08	21,40	63,07
E100	20	63,24	13,04	19,64	23,58	56,42
E100	40	63,99	12,65	19,78	23,48	57,40
E100	60	65,16	10,76	21,98	24,48	63,93

RMOU = resíduo madeireiro de origem urbana – 100%; RMOU75+E25 = resíduo madeireiro de origem urbana – 75% + eucalipto – 25%; RMOU50+E50 = resíduo madeireiro de origem urbana – 50% + eucalipto – 50%; RMOU25+E75 = resíduo madeireiro de origem urbana – 25% + eucalipto – 75%; E100 = eucalipto – 100%; L* = luminosidade; a* = pigmentação avermelhada; b* = pigmentação amarelada; C = croma; h* = ângulo de matiz.

As variáveis colorimétricas variaram significativamente entre os briquetes estudados (Tabela 8). A luminosidade (L*) foi maior nos briquetes com maiores proporções de eucalipto (RMOU25+E75 e E100), mostrando que esses apresentam cor mais clara quando comparadas aos demais briquetes. O mesmo comportamento também foi observado para a tonalidade vermelha (a*). Em madeiras com valores de a* > 10, a tonalidade vermelha manifesta-se de forma mais pronunciada que a amarela (b*), predominando a nuance vermelha na formação da cor (ATAYDE et al., 2011; COSTA et al., 2011; GONÇALEZ et al., 2001). O nível da pigmentação vermelha pode estar associado com o teor de extrativos presente na madeira. Segundo Yazaki et al. (1994) verificaram um aumento da pigmentação vermelha para madeira de *Eucalyptus pilularis* à medida que os teores de substâncias químicas foram extraídos pela água quente. Deste modo, madeiras de maior pigmentação vermelha apresentam mais extrativos, principalmente do tipo fenólico (MOYA et al., 2012).

O croma (C) apresentou comportamento semelhante ao parâmetro b^* . Os briquetes produzidos RMOU25+E75 e E100 formaram os briquetes com as maiores médias (22 e 24, respectivamente), representando assim o grupo de cores mais uniformes. Por outro lado, RMOU e RMOU75+E25 foram pertencentes as menores médias. Croma é um parâmetro colorimétrico muito influenciado pelas coordenadas cromáticas a^* e b^* , em que altos valores dessas coordenadas aumentarão os valores de C (ATAYDE et al., 2011)

A Tabela 9 mostra as correlações de Pearson obtidas para colorimetria. Devido ao foco da adição de eucalipto e granulometria para os briquetes, foram observadas relações significativas envolvendo a proporção e tamanho da partícula. A adição de eucalipto proporcionou uma relação positiva significativa com os valores de luminosidade (L^*), pigmentação avermelhada (a^*), pigmentação amarelada (b^*) e com croma (C). Dentro contraste, houve correlações negativas para o teor de cinzas, ângulo de matiz (h^*) e teor de lignina. A granulometria ocasionou correlações negativas baixas para todos os parâmetros, mostrando que o tamanho da partícula não influenciou significativamente na cor dos briquetes. O significado dessas relações torna possível estimar as propriedades de algumas variáveis em função da adição de madeira de eucalipto, mas ainda observar as características dos RMOU nos briquetes produzidos.

Tabela 9. Matriz de correlação das propriedades colorimétricas e químicas dos briquetes considerando as diferentes proporções e granulometrias.

Variáveis	PE	G	L^*	a^*	b^*	C	h^*	CT	ET	LT
PE										
G	0.00									
L^*	0.72	-0.22								
a^*	0.94	-0.23	0.67							
b^*	0.74	-0.15	0.78	0.71						
C	0.90	-0.21	0.79	0.91	0.94					
h^*	-0.90	0.23	-0.58	-0.97	-0.55	-0.80				
CT	-0.98	0.00	-0.71	-0.93	-0.72	-0.87	0.89			
ET	0.94	0.00	0.67	0.90	0.72	0.87	-0.86	-0.92		
LT	-0.51	0.00	-0.36	-0.48	-0.44	-0.51	0.39	0.47	-0.41	

Onde: PE = proporção de eucalipto (%); G = granulometria (mesh); L^* = luminosidade; a^* = eixo verde/vermelho; b^* = eixo azul/amarelo; C = croma; h^* = ângulo de matiz; CT = cinzas totais; ET = extrativos totais; LT = lignina total. Correlações significativas pelo teste de correlação de Pearson à 95% de significância estão em negrito.

A relação negativa entre CT e L^* indica que a redução na luminosidade dos briquetes está relacionada à maiores teores de cinzas presentes nos RMOU. Consequentemente a relação positiva entre a ET e a^* , indicam que os briquetes com maiores proporções de eucalipto são mais claros, tal fato é devido ao fato de madeiras mais densas apresentarem pigmentação mais avermelhada (GARCIA et al., 2016). Souza (2016), ao avaliar pellets oriundos de eucalipto e resíduos de café, observou cores mais claras para pellets produzidos misturados com eucalipto. De acordo com o mesmo autor, existe uma tendência em consumir produtos compactados mais claros, por apresentarem menores quantidades de cinzas.

Observou-se uma correlação forte entre a porcentagem de extrativos em relação à luminosidade. Dependendo do percentual dos extrativos as propriedades físicas e energéticas, assim como a coloração do material compactado podem sofrer influência (VARGAS-MORENO et al., 2012). Por isso, altos teores de extrativos podem aumentar a cor dos briquetes, prejudicando a sua aparência visual em relação ao consumidor. Pegoretti et al. (2019), ao analisarem a cor de pellets, destacam que consumidores estão acostumados a consumirem pellets mais claros (madeira de Pinus) deixando de consumir pellets mais escuros apenas pela

aparência, mas que isso não está atrelado a qualidade do material compactado. Por outro lado, alguns autores mencionam que teores elevados de extrativos devem ser levados em consideração, pois estes facilitam a inflamabilidade da biomassa em temperaturas mais baixas, causando maior volatilidade e, conseqüentemente, acelerando o início do processo de combustão (GUO et al., 2010; POLETTO, 2016).

4 CONCLUSÕES

Os resíduos madeireiros de origem urbana e eucalipto em diferentes proporções foram tecnicamente viáveis para a produção de briquetes.

Os biocombustíveis sólidos produzidos nas diferentes proporções e granulometrias apresentaram baixa influência da absorção de água e expansão de volume.

Os briquetes produzidos com partículas menores (retidas em peneira de 60 mesh) foram mais resistentes a compressão diametral, porém os briquetes produzidos com granulometrias de 20 e 40 mesh não devem ser descartados pois se mostraram fisicamente e mecanicamente resistentes.

O processo de briquetagem aumentou a densidade a granel e a densidade energética das composições, em média 4,53 e 5,24 vezes em relação as partículas não compactadas. Foi encontrado um alto grau de correlação entre as características colorimétricas (CIE L*a*b*) dos briquetes com fins energéticos e os valores de teor de cinzas, que tem sido considerado para um bom indicador, uma vez que há preocupação dentre os consumidores finais por seu uso em estufas domésticas. A correlação foi constante e os briquetes mais escuros são propensos a terem maiores teores de cinzas, o que seria um problema, confirmando as diferentes cores que podem ser visualmente apreciáveis, cuja qualidade seria menor.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Neste estudo, a distribuição do tamanho das partículas da matéria-prima teve um efeito bastante semelhante nas propriedades físico-mecânicas dos briquetes produzidos. A pesquisa mostrou que é possível produzir briquetes com características físicas e mecânicas similares quando comparadas somente com a os briquetes produzidos com biomassa lenhosa (eucalipto) e com ampla faixa de distribuição de tamanho de partícula. Os resultados são de importância prática, sugerindo que a trituração de tamanhos de partícula abaixo de 0,84 mm pode ser eliminada e os custos de produção reduzidos.

Diferentes proporções de RMOU e eucalipto produzem briquetes com semelhantes densidades, exceto para briquetes produzidos somente com eucalipto. Observou-se também que briquetes produzidos com 0 e 25% de RMOU tiveram maiores expansões de volume e adsorção de água. Em relação à densidade energética foi possível concluir que a adição de eucalipto aos RMOU na composição dos briquetes não apresentou diferença significativa, podendo afirmar que o eucalipto não influenciou na densidade energética do briquetes.

Foram encontradas elevadas correlações entre as características colorimétricas (CIE-L * a* b*) dos briquetes e os teores de cinzas e extrativos. As correlações apresentadas evidenciam que briquetes mais escuros com menor luminosidade possuem uma tendência em apresentar maiores teores de cinzas, afetando diretamente no desempenho energético.

Os resultados encontrados nesta pesquisa evidenciam a possibilidade de geração de energia sustentável na forma de briquetes produzidos com RMOU. Por outro lado, a mistura de biomassas lignocelulósicas é importante para a produção de briquetes, uma vez que o uso desses resíduos pode ser amplamente diversificado. Assim, a redução da porcentagem de até 50% de RMOU é recomendada para minimizar os teores de cinzas nos combustíveis sólidos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJIMOTOKAN, H. A.; IBITOYE, S. E.; ODUSOTE, J. K.; ADESOYE, O. A.; OMONIYI, P. O. Physico-mechanical properties of composite briquettes from corncob and rice husk. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, vol. 4, n. 3, p. 159-165, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 2240-91**: Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness. Philadelphia, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira - Resistência à compressão paralela às fibras. Rio de Janeiro, 1997.
- ATAYDE, C. M.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de Muirapiranga (*Brosimum sp.*). **Cerne**, v. 17, n. 2, p.231-235, 2011.
- BOAS, M. A. V. **Efeito do tratamento térmico da madeira para produção de briquetes**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Ufv, Viçosa, 2011.
- BHANGE, V. P.; PRINCE, S. P. M.; VAIDYA, A. N.; CHOKHANDRE, A. R. Green Waste As a Resource for Value Added Product Generation : A Review. **Int. J. Recent Trends Sci. Technol**, vol. 4, p. 22–33, 2014.
- BRAND, M. A.; JACINTO, R. C.; ANTUNES, R.; CUNHA, A. B. Production of briquettes as a tool to optimize the use of waste from rice cultivation and industrial processing, **Renew. Energy**, vol. 111, p. 116-123, 2017.
- COSTA, J. A.; GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 133-139, 2011.
- CUBERO-ABARCA, R.; et al. Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 461-470, 2014.
- DIAS, J. J. M. **Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de pellets em caldeiras domésticas**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- FREITAS, A. J.; COSTA, A. C. S.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; ROCHA, M. F. V.; CARNEIRO, A. D. C. O. Efeito da pressão e do tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireiros de paricá. **Nativa**, v. 4, n.6, p. 380-385, 2016.
- GARCIA, R. A.; MARINONIO, G. B. Color variation of the teak wood as a function of density and extractive content. **Floresta e Ambiente**, vol. 23, p. 124-134, 2016.
- GENTIL, L. V. B.; VIEIRA, A. Brazilian market structure of wood Briquettes, **In: Proceedings of the World Bioenergy 2008 e Conference and Exhibition on Biomass for Energy**. 2008, p. 295-299.
- GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F.; VALLE, A. T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, v. 20, n. 72, p. 47-58, 2001.

GRANADO, M. P. P.; SUHOGUSOFF, Y. V. M.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M.; CONTI, A. C. Effects of pressure densification on strength and properties of cassava waste briquettes. **Renewable Energy**, v. 167, p. 306-312, 2021.

GUO, X.; WANG, S.; WANG, K.; LIU, Q.; LUO, Z. Influence of extractives on mechanism of biomass pyrolysis. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, Taiyuan, v. 38, n. 1, p. 42–46, 2010.

HANSTED, A. L. S.; NAKASHIMA, G. T.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; TAMAJI, F. M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. **Fuel**, vol. 184, p. 180-184, 2016.

JOHANSSON, D. **Strenght and colour response of solid wood to heat treatment**. Luleå University of Technology, Department of Skellefteå Campus, Division of Wood Technology. 2005:93. ISSN: I402-I757. ISRN: LTU-LIC – 05/93 – SE.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass Bioenergy**, vol. 33, n. 3, p. 337-259, 2009.

KIRSTEN, C.; LENZ, V.; SCHRODER, H. W.; REPKE, J.U. Hay pellets - the influence of particle size reduction on their physicalemental quality and energy demand during production, **Fuel Process. Technol**, v. 148, p. 163-174, 2016.

KONICA MINOLTA SENSING Inc. **Comunicação precisa da cor**. 1998. 57 p.

LI, Y.; LIU, H. High-pressure densification of wood residues to form anupgraded fuel. **Biomass Bioenergy**, v. 19, n. 3, p. 177-186, 2000.

LIM, J. S.; MANAN, A. Z.; WAN A. S. R.; HASHIM, H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 3084-3094, 2012.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses, **Biomass Bioenergy**, vol. 30, n. 7, p. 648–654, 2006.

MANUAL PCE-HT 210. Technical Services Ltd. Unit N12B, p. 1-12. Disponível em: www.industrial-needs.com/manual/manual-pce-ht210.pdf.

MOYA, R.; FALLAS, R. S.; BONILLA, P. J.; TENORIO, C. Relationship between wood color parameters measured by the CIELab System and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations. **Molecules**, v. 17, p. 3639-3652, 2012. <https://doi.org/10.3390/molecules17043639>

MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A.; AKOWUAH, J. O. Briquetes de espigas de milho e Ceiba pentandra em temperatura ambiente e baixa pressão de compactação sem ligante. **Jornal Internacional de Energia e Engenharia Ambiental**, vol. 4, n. 1, p. 1-7, 2013.

PEGORETTI, H. J.; CHAVES, M. D.; VIDAURRE, G. B.; BROCCO, V. F.; DE SOUZA, D. P.; PROTÁSIO, T. D. P. Colorimetria de pellets produzidos com resíduos da cultura do eucalipto e café e sua relação com padrões de qualidade. **Scientia Forestalis**, vol. 121, p. 114-124, 2019.

POLETTI, M. Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil. **Maderas. Ciencia y tecnología, Concepción**, v. 18, n. 3, p. 435 – 442, 2016.

- PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273-273, 2011.
- QUIRINO, W. F. **Utilização energética de resíduos vegetais**. IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais – LPF, Brasília, 2002, 35 p.
- QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília, DF: IBAMA, Laboratório de Produtos Florestais, 1991. 16 p. (IBAMA-LPF. Série técnica, n. 13).
- RODRIGUES, V. A. J.; SILVA, C. M.; CARNEIRO, A. C. O.; REZENDE, A. A. P.; SANTOS, L. S.; IKAWA, G. A. The use of pulp mill solid wastes for energy production, In: **Proceedings of the 3th International Symposium on Energy from Biomass and Waste**. 2010. p. 8-11.
- RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2010.
- SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n.1, p. 17-23, 2007.
- SONDEREGGER, W.; KRÁNITZ, K.; BUES, C. T.; NIEMZ, P. Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood. **J. Cult. Herit**, vol. 16, p. 883–889, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.02.002>
- SOUZA, H. J. P. L. **Caracterização de pellets de eucalipto e resíduos da despolpa do café**. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro ES, 2016.
- SOUZA, M. M. **Propriedades de briquetes e pellets produzidos com resíduos sólidos urbanos**. 82f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2014.
- TUMULURU, J. S.; SOKHANSANJ, S.; HESS, J. R.; WRIGHT, C. T. BOARDMAN, R. D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, **Ind. Biotechnol**, v. 5, 2011.
- VARGAS-MORENO, J. M.; CALLEJÓN-FERRE, A. J.; PÉREZALONSO, J.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 16, n. 5, p. 3065-3083, 2012.
- WANG, Y.; WU, K.; SUN, Y. Effects of raw material particle size on the briquetting process of rice straw. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 1, p. 153-162, 2018.
- YAMAJI, F. M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; FLORES, W. P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na agricultura**, v. 28, n. 1, p. 11 - 15, 2013.
- YAZAKI, Y.; COLLINS, P. J.; MCCOMBE, B. Variations in hot water extractives content and density of commercial wood veneers from blackbutt (*Eucalyptus pilularis*). **Holzforschung**, v. 48, p. 107-111, 1994. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1994.48.s1.107>

YOUNGS, H. 2011. Waste-to-energy in California: Technology, issues, and context. A report submitted to California Council on Science and Technology. Available online: <http://www.ccst.us/publications/2011/2011wte.pdf>.