



FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL
LICENCIATURA EM ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PROJECTO FINAL

Avaliação das propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de serradura de *Brachystegia spiciformis* Benth

Autor:

Ângela Paula Muthemba

Supervisor:

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

Maputo, Abril de 2025



FACULDADE DE AGRONOMIA E ENGENHARIA FLORESTAL

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Avaliação das propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir
de serradura de *Brachystegia spiciformis* Benth

Por

Ângela Paula Muthemba

Projecto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, como parte das exigências para obtenção do grau de licenciatura em Engenharia Florestal

Supervisor:

Prof. Doutor Andrade Fernando Egas

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Ângela Paula Muthemba**, declaro por minha honra que este trabalho é fruto da minha própria investigação e nunca foi apresentado para a obtenção de qualquer grau académico, seja nesta ou em qualquer outra universidade. Este constitui o fruto de trabalho de campo por mim realizado e de pesquisas bibliográficas, estando as fontes utilizadas mencionadas no texto e nas referências bibliográficas.

Maputo, Abril de 2025

(Ângela Paula Muthemba)

RESUMO

O presente trabalho tem como objectivo geral, avaliar o comportamento das propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes de serradura de *Brachystegia spiciformis*. Para o alcance desse objectivo, foram produzidos 48 briquetes de serradura de *Brachystegia spiciformis* usando serradura de três regiões do lenho cerne, borne e mistura (cerne + borne), com teor de humidade 10% numa briquetadeira de laboratório com um intervalo de temperatura de 120°C á 150°C, pressão de 12 Mpa, tempo de compactação de 2 e 3 minutos. Após a cura por um período de 7 dias, os briquetes foram colocados na câmara de aclimatização para que atingissem um teor de humidade de 12%. Em seguida foram submetidas à determinação da densidade aparente e ao ensaio de resistência à tracção por compressão diametral numa máquina universal de ensaios.

Os resultados indicaram que os briquetes produzidos tem uma granulometria composta por partículas menores que 2 mm e o teor de cinza do material varia entre 2,67% e 3,04%. A densidade aparente variou de 0,866 g/cm³ a 0,998 g/cm³, onde os briquetes de cerne apresentaram maior densidade aparente quando comparados aos de borne e mistura. A carga máxima de ruptura de 2 416,03 N a 4 113,00 N, sendo que os maiores valores da carga máxima de ruptura observaram-se para briquetes produzidos a partir de serradura da região do borne.

As conclusões indicaram que a região do lenho influenciou de forma significativa tanto a densidade aparente quanto a carga máxima de ruptura dos briquetes. A temperatura de compactação também teve um impacto positivo nas propriedades mecânicas, e na maioria dos casos a densidade aparente aumentou com o incremento da temperatura. Além disso, o tempo de compactação contribuiu para um aumento na carga máxima de ruptura.

Recomenda-se a realização de uma pesquisa aprofundada sobre a influencia da temperatura de compactação nas propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes, com mais amostra e repetições, além de testar serradura de outras espécies nativas.

Palavras-chaves: briquetes, madeira do cerne, densidade aparente, carga de ruptura, teor de cinza.

ABSTRACT

The present work has the general objective of evaluating the behavior of the physical-mechanical and energetic properties of *Brachystegia spiciformis* sawdust briquettes. To achieve this objective, 48 *Brachystegia spiciformis* sawdust briquettes were produced using sawdust from three regions of the wood: heartwood, sapwood and a mixture (heartwood + sapwood), with a moisture content of 10%, in a laboratory briquette machine with a temperature ranging from 120°C to 150°C, pressure of 12 MPa, and pressing time of 2 and 3 minutes. After curing for a period of 7 days, the briquettes were placed in the acclimatization chamber to reach a moisture content of 12%. They were then subjected to determination of apparent density and tensile strength on diametrical compression in a universal testing machine.

The results indicate that the produced briquettes were composed of particles smaller than 2 mm and the ash content of the material varied between 2.67% and 3.04%. The apparent density ranged from 0.866 g/cm³ to 0.998 g/cm³, where the heartwood briquettes presented a higher apparent density when compared to the sapwood and mixture briquettes. The ultimate compressive strength was from 2,416.03 N to 4,113.00 N, with the highest values of the ultimate compressive strength observed for briquettes produced from sawdust from the sapwood region.

The conclusions indicate that the wood region significantly influenced both the apparent density and the ultimate compressive strength of the briquettes. Pressing temperature also had a positive impact on mechanical properties, and in most cases apparent density increased with increasing temperature. Furthermore, the pressing time contributed to an increase in the ultimate compressive strength.

It was recommended that in-depth research be carried out on the influence of pressing temperature on the physical-mechanical and energetic properties of briquettes, with more samples and repetitions, in addition to testing sawdust from other native species.

Keywords: briquettes, heartwood, apparent density, ultimate compressive strength, ash content.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai:

Francisco Alfredo Paund Muthemba,

A minha mãe:

Ana Paula Carmona Bila,

Ao meu irmão:

Francisco Alfredo Paund Muthemba Jr., que este trabalho sirva de inspiração.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À Deus agradeço pelo dom da vida e constante presença em minha vida.

Agradeço ao Prof. Doutor Andrade Fernando Egas, meu supervisor, pela disponibilidade imediata, incansável e paciência na transmissão de valiosos conhecimentos e pelas críticas, sugestões, comentários que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores do curso de licenciatura em Engenharia Florestal, que contribuíram para a minha formação.

Agradeço ao Prof. Doutor. Adolfo Condo, pela criação de condições laboratoriais e apoio na produção de briquetes na Faculdade de Engenharia.

Agradeço ao Doutor. Eng^o. Narciso Bila, que sempre mostrou-se disponível para ajudar-me nos testes de resistência mecânica na máquina universal de ensaios.

Agradeço ao senhor Paulo Timóteo, pelo apoio durante o trabalho no laboratório e ao senhor Eduardo Mariquel pelo apoio prestado durante a produção da serradura.

Agradeço aos meus amigos Djanina Mendes, Eng. Evidelto Mudumela, Joana Govene, Feliciano Tsaninga

Agradeço aos meus colegas de turma Kelven Nércio, Hélio Félix, Yara Ubisse, Julieta de Bastos, Geusia Mazuze, Geórgia Siueia, Edson Valentim, Fermino João, Momad Chame, Belmiro Nunes, Michel Tivane, Edna Rita, pelo papel desempenhado na minha formação, e aos demais colegas da turma que de certa forma contribuíram significativamente na minha formação e para realização desse trabalho em particular.

Agradeço aos meus Colegas e Amigos Nascir Morreira, Amade Hassane, Paula de Almeida, Tonny Muarramuassa, Leonel Rafael, Albertino Manuel e Virgílio Bahule por toda ajuda nos estudos, conversas e pelas risadas.

A todos que contribuíram durante a minha formação e que não foram aqui mencionados, o meu caloroso obrigado!

ÍNDICE

DECLARAÇÃO DE HONRA	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	viii
I. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema de estudo	2
1.2. OBJECTIVOS	4
1.2.1. Objectivo geral	4
1.2.2. Objectivos específicos	4
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. A biomassa vegetal como fonte de energia	5
2.2. Resíduos	5
2.3. Briquetagem	7
2.4. Propriedades físicas e energéticas dos briquetes	8
2.4.1. Teor de humidade	8
2.4.2. Densidade aparente	8
2.4.3. Poder calorífico	9
2.4.4. Densidade energética	9
2.4.5. Teor de cinzas	10
2.4.6. Teor de material volátil	10
2.4.7. Teor de carbono fixo	11
2.5. Factores que influenciam a carga máxima de ruptura	11
2.6. Espécie usada	15
III. MATÉRIAS E MÉTODOS	16
3.1. Obtenção e caracterização do material para a produção de briquetes	16
3.2. Caracterização da serradura do estudo	16
3.2.1. Classificação granulométrica	16

3.2.2.	Determinação da humidade.....	17
3.2.3.	Determinação do teor de cinza.....	18
3.3.	Acondicionamento da serradura e produção de briquetes.....	18
3.4.	Determinação das propriedades físico-mecânicas dos briquetes.....	20
3.4.1.	Densidade aparente.....	20
3.4.2.	Teor de humidade.....	21
3.4.3.	Carga máxima de ruptura.....	22
3.5.	Análise de dados.....	22
IV.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1.	Caracterização do Material de Estudo.....	24
4.2.	Propriedades físicas e mecânicas dos briquetes.....	26
4.3.	Efeito de diferentes variáveis sobre as propriedades energéticas e mecânicas dos briquetes.....	29
4.3.1.	Efeito da região do lenho na densidade aparente, teor de cinza e carga máxima de ruptura.....	29
4.3.2.	Efeito da temperatura de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima.....	30
4.3.3.	Efeito do tempo de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura.....	32
4.3.4.	Implicações práticas dos resultados obtidos.....	34
V.	CONCLUSÕES.....	36
VI.	RECOMENDAÇÕES.....	37
VII.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
VIII.	Anexos.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de briquetes de <i>Brachystegia spiciformes</i> produzidos para o ensaio	20
Tabela 2. Teor de cinza da serradura de <i>B. spiciformis</i> (%)	26
Tabela 3. Densidade aparente de briquetes de <i>Brachystegia spiciformis</i>	27
Tabela 4. Carga máxima de ruptura de briquetes de serradura de <i>Brachystegia spiciformis</i>	28
Tabela 5. Efeito da região do lenho sobre as propriedades energéticas e mecânicas dos briquetes	29
Tabela 6. Efeito da temperatura de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura	31
Tabela 7. Efeito do tempo de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura dos briquetes	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Analisador de humidade	19
Figura 2. Briquetadeira e seus acessórios. A – Briquetadeira; B - Molde e os acessórios.....	19
Figura 3. Briquetes produzidos	20
Figura 4. Ilustração do procedimento de medição de diâmetro e altura dos briquetes.....	21
Figura 5. Teste de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos ..	22
Figura 6. Granulometria de serradura de <i>Brachystegia spiciformis</i>	24

I. INTRODUÇÃO

Moçambique possui uma área de cerca de 80 milhões de hectares onde cerca de 34 milhões de hectares são cobertos por florestas e outras formações lenhosas (MAGALHÃES, 2018). As florestas no geral fornecem abrigo, materiais de construção, madeira comercial, plantas medicinais, biomassa para energia, entre outros à maioria da população moçambicana.

A biomassa vegetal é um dos principais recursos para a geração de energia nos países em vias de desenvolvimento. É também considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (BENÍCIO, 2011). Segundo BRAND *et al.* (2014), a biomassa vegetal é livre de enxofre, pelo que não há necessidade de processos rigorosos de controle de emissões, tem baixo teor de cinzas, e tem ciclo de renovação mais rápido o que lhe confere vantagem em relação aos combustíveis fósseis.

O uso de energia gerada a partir da biomassa florestal tem sido reportado desde os tempos mais longínquos e faz parte integrante da cultura e tradição locais (MAGALHÃES, 2018). Segundo ATANASSOV *et al.* (2012), em Moçambique mais de 80 % da população depende dos combustíveis tradicionais de biomassa como sua fonte de energia primária e grande parte dessa biomassa é obtida de florestas naturais, havendo várias situações em que estas são exploradas de forma indiscriminada. Segundo MAGALHÃES (2018), durante o período compreendido entre 2003 a 2013, o país perdeu uma média de 267 029 hectares de florestas anualmente, o equivalente a uma taxa de desmatamento de 0.79 % e no período de 2014 a 2016, cerca de 259 226 hectares, os correspondentes 0.71 % da área florestal total.

O elevado consumo de combustíveis lenhosos nas grandes cidades representa um desafio que exige uma solução imediata, já que a sua obtenção resulta da destruição de florestais, especialmente em corredores de acesso às grandes cidades (EGAS *et al.*, 2016).

Para reverter a situação acima mencionada, para além da promoção de energia como o gás natural, estão em curso no país algumas iniciativas alternativas para a obtenção de biomassa ou energia de biomassa, especificamente promoção de plantações energéticas, disseminação de fornos e fogões melhorados e o uso de resíduos de biomassa florestal. Os resíduos de biomassa vegetal são produzidos em grandes quantidades em várias actividades desenvolvidas no sector

florestal, com destaque para a exploração florestal e o processamento de madeira. Um dos resíduos gerados nessas actividades é a serradura que pode ser aproveitada para fins energéticos através do processo de briquetagem.

A briquetagem é uma forma bastante eficiente por concentrar a energia de biomassa, pois 1 m³ de briquetes contém de 2 a 5 vezes mais energia que 1 m³ de resíduos. A briquetagem permite a obtenção de um combustível de melhor qualidade que os combustíveis tradicionais de biomassa, tornando o seu transporte e armazenamento facilitados (QUIRINO, 1991).

De acordo com DE ABREU (2005) e PAULA (2010), a briquetagem é uma das formas eficientes de preservar melhor as florestas e utilizá-las de forma sustentável, uma vez que dá um destino benéfico aos resíduos de biomassa evitando o uso de uma quantidade maior de lenha e de carvão vegetal.

1.1. Problema de estudo

Moçambique é um dos poucos países da África Austral que ainda detém uma considerável área de florestas nativas (WERTZ-KANOUNNIKOFF *et al.*, 2011) e outras formações lenhosas nativas, compostas principalmente por Miombo, Mecrusse e Mopane. Segundo RIBEIRO *et al.* (2002) o Miombo é o principal tipo florestal de Moçambique abrangendo 2/3 da área florestal, estendendo-se desde o extremo norte do país no rio Rovuma ao rio Limpopo. É uma formação, predominante no norte do país cobrindo extensas áreas das províncias de Niassa, Nampula e Cabo Delgado.

De acordo com MAGALHÃES (2018), na formação florestal Miombo as três das cinco espécies com maior participação no volume são dos géneros *Brachystegia* e *Julbernardia* especificamente: *Brachystegia spiciformis* vulgarmente conhecida como messassa comum, *Brachystegia boehmii* e *Julbernardia globiflora* (messassa encarnada).

Segundo a Política Florestal e Estratégias da sua Implementação 2020-2035, aprovada pelo CONSELHO DE MINISTROS (2020), o Governo deve promover o crescimento económico através do uso de espécies menos conhecidas e pouco exploradas. *Brachystegia spiciformis* e *Julbernardia globiflora* são duas espécies secundarizadas com maior potencial de exploração, tendo em conta que ocupam 40% e 21,8% do volume total do Miombo respectivamente

(MAGALHÃES, 2018). A implementação da estratégia do Governo acima indicada implicará maior processamento industrial dessas espécies, acompanhado do aumento do volume de resíduos produzidos, particularmente na forma de serradura.

A serradura é um resíduo pouco aproveitado para gerar energia para fins domésticos e industriais pois mais de 70% da população urbana usa carvão e lenha para satisfazer as suas necessidades de cozinha (EGAS, 2010). As serrações e/ou carpintarias produzem a serradura e limitam-se na maioria dos casos a amontoá-los e depois transportá-los para locais distantes para a incineração ou simplesmente queimá-los no mesmo local. O potencial de geração de serradura na indústria madeireira moçambicana é elevado, onde um estudo realizado por EGAS & NHANTUMBO (2021), estima que o potencial de produção de serradura da indústria madeireira no distrito de Mocuba na província de Zambézia é de 2 275 toneladas/ano. A serradura poderia ser submetida ao processo de briquetagem, convertendo-os em combustíveis limpos.

Existem várias experiências e estudos feitos no mundo sobre a utilização de resíduos de biomassa vegetal, como serradura para a produção de briquetes. Porém, para indicar um determinado material como apropriado para fins energéticos ou como uma fonte de energia adequada, é necessário caracterizá-lo por meio de suas propriedades físico-mecânicas e energéticas.

São escassos os estudos sobre a caracterização energética de briquetes de serradura de espécies de florestas nativas de Moçambique, e especialmente para *Brachystegia spiciformis*. Um dos estudos pioneiros para a caracterização energética da espécie *Brachystegia spiciformis* foi realizado por VALENTIM (2021) que consistiu na caracterização energética da serradura de *Brachystegia spiciformis*, a partir de serradura recolhida nas serrações sem controlo de contaminação por areia e outros materiais, surgindo assim a necessidade de produzir briquetes de serradura em um ambiente controlado de contaminação e com distinção da região do lenho de onde se obteve. Por outro lado há necessidade de determinar-se o tempo e temperatura de prensagem adequados com vista aperfeiçoar a tecnologia de produção de briquetes de serradura desta espécie.

Deste modo, o presente estudo torna-se relevante para o fornecimento de informação técnica que poderá influenciar na tomada de decisão sobre a adoção da *Brachystegia spiciformis* para a

produção de briquetes, aproveitando-se a serradura gerada na indústria, podendo contribuir deste modo para a diminuição da pressão sobre as florestas nativas.

1.2. OBJECTIVOS

1.2.1. Objectivo geral

- ✚ Avaliar as propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes de serradura de *Brachystegia spiciformis* Benth.

1.2.2. Objectivos específicos

- ✚ Determinar as propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes de serradura de *Brachystegia spiciformis*;
- ✚ Avaliar o efeito da região do lenho nas propriedades físico-mecânicas e energéticas de briquetes de serradura;
- ✚ Avaliar o efeito da temperatura e do tempo de compactação nas propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes produzidos;

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A biomassa vegetal como fonte de energia

Biomassa vegetal é um termo que engloba a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, assim como a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais e outros (SOUZA, 2014).

A biomassa vegetal é uma alternativa excelente para complementar as necessidades actuais de energia a preços competitivos e com baixo impacto ambiental. Uma vantagem da biomassa vegetal é que, ela é o resíduo gerado em grandes volumes nas actividades agroindustriais, incluindo a exploração florestal e processamento de madeira, diminuindo assim a pressão sobre os recursos naturais que são diretamente explorados como fonte de energia (QUIRINO *et al.*, 2012).

2.2. Resíduos

O termo resíduo, geralmente, é associado à ideia de “lixo”. Porém, segundo DEMAJORIVIC (1995), resíduos diferenciam-se do termo lixo, pois este último não possui nenhum tipo de valor, referindo-se ao que deve ser descartado. De acordo com o mesmo autor resíduos são aqueles que possuem valor econômico agregado, por possibilitarem seu reaproveitamento.

QUIRINO (2003) define resíduo como tudo aquilo que sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou de utilização. É toda substância, material ou produto destinado, por seu proprietário, ao abandono.

O mesmo autor apresenta a classificação de resíduos definida pela Comunidade Europeia:

- Resíduos urbanos ou também chamados de domésticos;
- Resíduos industriais:
 - Resíduo industrial banal: não possui aditivos tóxicos, como a madeira sem tratamento e materiais de origem vegetal em geral;
 - Resíduo industrial especial:
 - Inerte: não libera nem reage com outro tipo de substância;

- Último: sem possibilidades de transformação como as cinzas;
- Tóxico ou perigoso: libera substâncias tóxicas durante o tratamento ou armazenamento, como o resíduo nuclear.

Os resíduos vegetais, caracterizam-se por dimensões variadas. Geralmente apresentam alta humidade, baixa densidade e grande volume, requerem grandes áreas de armazenamento, além de serem dispersos o que dificulta a colheita e transporte (PAULA, 2010).

Dos resíduos de biomassa que podem ser usados para a geração de energia em Moçambique, destacam-se os resíduos florestais que são produzidos durante a exploração florestal e processamento da madeira, especificamente: costaneiras, resíduos do alinhamento, destapos e serradura nas serrações e carpintarias (EGAS & NHANTUMBO, 2021).

A serradura é o resíduo mais universal da madeira uma vez que se produz ao longo dos diferentes processos de exploração e de transformação desta matéria-prima, como: no desbaste, abate, desrame e a traçagem usando motosserra e serragem longitudinal e transversal, que quando aplicado convenientemente torna-se uma matéria-prima barata para diferentes fins, evidenciando seu uso como combustível (HOUANA, 2015). Todavia, para que a serradura se torne combustível viável para a produção de energia, é necessário aplicar-se tratamento adequado a mesma. A compactação ou o conhecido processo de briquetagem, propiciam a adequação necessária em termos de homogeneização e de densificação energética da biomassa em geral e da serradura em particular.

Produção de serradura em Moçambique

O potencial de geração de serradura na indústria madeireira em moçambicana é elevado, onde um estudo realizado por EGAS & NHANTUMBO (2021), estima que o potencial de produção de serradura da indústria madeireira no distrito de Mocuba na província de Zambézia é de 2 275 toneladas/ano, assumindo um funcionamento pleno de todas as serrações do distrito.

A produção de serradura em Maputo, conforme abordado por BILA (2004), destaca a importância desse subproduto da madeira na indústria local, a serradura resultante do processo de corte e desdobramento da madeira, é utilizada em diversas aplicações, como na fabricação de móveis, na produção de papel e em processos de compostagem. BILA (2004) aponta que a

produção de serradura em Maputo enfrenta desafios como a gestão adequada dos resíduos e a necessidade de técnicas de aproveitamento mais eficientes, também menciona a potencialidade econômica da serradura, que pode ser valorizada através de processos de inovação e diversificação de usos, enfatiza a importância de práticas sustentáveis na exploração de recursos florestais, visando não apenas a produção de serradura, mas também a conservação ambiental e a promoção do desenvolvimento econômico local.

De acordo com BILA (2004) as serrações da cidade de Maputo produzem anualmente pelo menos 6227,484 m³ de serradura, a serradura é classificada em fina e grossa, mensalmente vende-se 141,08 m³ de serradura fina e 74,08 m³ de serradura grossa, onde a serradura fina é usada como substrato e a grossa em aviários para aquecimento dos pintos.

2.3. Briquetagem

A briquetagem permite a conversão de um resíduo vegetal de baixa densidade em um combustível de maior densidade energética, com baixa humidade, granulometria regular e uniforme, facilitando o transporte, armazenamento e processos de alimentação automática de caldeiras industriais (QUIRINO *et al.*, 2012).

O processo de briquetagem segundo QUIRINO *et al.* (1991), consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. Segundo o QUIRINO *et al.* (1991) e OLIVEIRA (2013), o processo possui etapas distintas que são:

- Escolha do material: a etapa inicial desse processo vai depender do tipo de matéria-prima de biomassa, do tipo de briquete que se pretende gerar e de características próprias da biomassa, como o tamanho das partículas, humidade e densidade;
- Moagem do material para adequação da granulometria de, determinada previamente segundo as características desejadas ao produto e em função do aglutinante usado;
- Secagem do material que pode ser realizada com passagem de ar quente e seco, para remover a humidade do resíduo;
- Peneiramento dos resíduos, determinando granulometria das partículas, com a finalidade de eliminar as partículas indesejadas;

- Mistura do pó com o aglutinante e demais aditivos empregados;
- Prensagem da massa obtida da mistura com finalidade de proporcionar resistência adequada aos briquetes; e,
- Tratamentos de secagem para eliminação da humidade, e tratamentos térmicos, dependendo do tipo de aglutinante, para eliminação de voláteis indesejáveis ou para favorecer reações que necessitam de calor.

2.4. Propriedades físicas e energéticas dos briquetes

A análise da qualidade de briquetes para o uso energético é baseado em algumas características: como teor de humidade, densidade aparente, poder calorífico, densidade energética, teor de cinzas, teor de voláteis, e teor de carbono fixo.

2.4.1. Teor de humidade

De acordo com SOUZA (2014), o teor de humidade é importante por duas razões: 1) o teor de humidade varia dentro de uma ampla faixa de valores em função da espécie, clima, armazenamento, entre outros, o que torna o controlo do processo de combustão mais difícil; 2) a água tem um poder calorífico negativo, isto é, ela necessita de calor para evaporar.

O teor de humidade influencia na eficiência energética, pois quanto maior for o teor de humidade maior será a energia perdida no processo de combustão para secar o material assim reduzindo a eficiência energética (SOUZA, 2014).

KARUNANITHY *et al.* (2012), explicam que o teor de humidade está entre 7 a 14% para briquetes de diferentes matérias-primas. Briquetes que apresentam um teor de humidade acima de 15% tem a eficiência de queima comprometida. Por outro lado, se os briquetes tiverem uma humidade acima do ideal ou muito abaixo do ideal ficam sem estabilidade (OSHIRO, 2016).

2.4.2. Densidade aparente

A densidade aparente é definida como a relação entre a massa e o volume ou massa por unidade de volume. Segundo MADALENA (2019), “a densidade é um parâmetro importante na compactação, pois, quanto maior for a densidade, maior será a razão energia/volume”, o que também facilita a logística, armazenamento e manipulação deste produto. Existem várias formas

de expressar a densidade dos briquetes com destaque para duas: densidade aparente e densidade energética.

De acordo com BARBOSA *et al.* (2021) a densidade aparente pode ser determinada pesando os briquetes e em seguida imergi-los em mercúrio e obter-se o volume deslocado usando o método da balança hidrostática.

2.4.3. Poder calorífico

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia que é libertada durante a combustão completa de uma unidade de massa de um material combustível e, está diretamente ligado ao teor de humidade (MADALENA, 2019). Segundo QUIRINO (1991), um bom briquete deverá possuir alto poder calorífico.

O poder calorífico pode ser determinado como Poder Calorífico Superior (PCS) ou Poder Calorífico Inferior (PCI). PCS contabiliza o calor latente que age na evaporação da água presente, ou seja, o valor total da energia liberada quando ocorre a combustão, e PCI não considera esse calor latente (MADALENA, 2019). A determinação do PCS acontece experimentalmente com utilização de uma bomba calorimétrica.

Segundo KARUNANITHY *et al.* (2012), no caso de madeira podem encontrar-se valores desde 3000 kcal/kg até 5400 kcal/kg. A resina presente nas espécies florestais tem poder calorífico médio de 9460 kcal/kg e dessa forma as espécies com altos teores de resinas, como as coníferas, apresentam poder calorífico maior que as folhosas que contem baixos teores de resina.

2.4.4. Densidade energética

A densidade energética é a energia libertada por um determinado volume de combustível após a combustão completa. É importante porque quanto maior for a quantidade de energia por unidade de volume maior será a densidade energética (MADALENA, 2019). De acordo com BARBOSA *et al.* (2021), a densidade energética pode ser calculada com base no poder calorífico útil a partir da fórmula (1):

$$DE_{PCU} = \frac{(DRA \times PCU)}{1 \times 10^6} \quad (1)$$

Onde:

DE_{PCU} - densidade energética com base no poder calorífico útil (Gcal/m³)

DRA - densidade relativa aparente (kg/m³)

PCU - poder calorífico útil (kcal/kg)

2.4.5. Teor de cinzas

A cinza é um material de origem mineral, não orgânico, inerte e não combustível. Os componentes inorgânicos que integram a cinza são absorvidos do ambiente externo por meio das contaminações ocorridas durante a colheita, transporte e manuseamento do material para briquetagem.

Segundo SOUZA (2014), o teor de cinza também indica o conteúdo de minerais presentes na composição da biomassa, sendo que os principais iões encontrados são os de potássio, cálcio, magnésio, sódio, manganês, ferro, alumínio, além de radicais como carbonatos, silicatos, cloretos e sulfatos.

O teor de cinzas da madeira em relação aos outros elementos (materiais voláteis e extractivos) que constituem o material madeira é bastante baixo, sendo geralmente menor que 1 % do peso total da madeira. A resistência de um briquete aumenta com a diminuição do teor de cinzas (QUIRINO,1991).

O conhecimento do teor de cinza é importante, porque após a queima ela é a porção residual de madeira e exige um sistema próprio para a sua retirada dos fornos. Por ser abrasiva nos equipamentos metálicos reduz o tempo de vida útil, e contribui para a diminuição do poder calorífico (MADALENA, 2019; BRITO *et al.*, 1979).

2.4.6. Teor de material volátil

Os materiais voláteis são definidos como substâncias que são libertadas da madeira em forma gás durante a carbonização e, são compostos quimicamente por hidrogénio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono (SANTOS, 2010).

Os voláteis contribuem negativamente para o poder calorífico do produto. A sua volatilização acontece com muita rapidez, diminuindo assim o tempo de permanência dos combustíveis dentro do processo de combustão e influenciando na redução da eficiência energética da biomassa (MADALENA, 2019). Segundo o mesmo autor, o teor de materiais voláteis tem relação com a ignição de queima no processo de combustão da matéria empregada, onde aproximadamente 70% dos materiais voláteis participam no desenvolvimento da combustão.

De acordo com BRITO *et al.* (1979), é muito importante conhecer o teor de materiais voláteis, pois eles são considerados poluentes perigosos quando libertados no ambiente, sendo que, alguns deles são tóxicos e cancerígenos. A inalação desses compostos pode produzir efeitos adversos e directos à saúde humana, principalmente a exposição em concentrações elevadas e por um longo período de tempo.

2.4.7. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo refere-se a quantidade de biomassa que vai queimar no estado sólido e depende da quantidade de material orgânico presente no combustível (RODRIGUES, 2010).

Existe uma relação entre a quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, que interfere directamente no poder calorífico. Quanto maior for o teor de carbono fixo, maior será o tempo de queima e sua eficiência (CHAVES *et al.*, 2013).

O teor de carbono fixo em madeira geralmente é estimado em torno de 40% a 60% do peso seco da biomassa, varia em função da espécie, idade e condições ambientais (RODRIGUES, 2010 & CHAVES *et al.*, 2013).

2.5. Factores que influenciam a carga máxima de ruptura

A resistência mecânica dos briquetes é expressa principalmente pela carga máxima de ruptura do briquetes, que não é mais que a capacidade que o briquete tem de absorver energia até a sua ruptura, ou seja, a energia mecânica necessária para levar o briquete a ruptura. A carga máxima de ruptura dos briquetes é afectada por vários factores inerentes à matéria prima (tamanho das partículas ou granulometria, densidade da madeira) e ao processo de produção (teor de humidade, pressão, temperatura e tempo de compactação).

Granulometria

A granulometria estuda a distribuição do tamanho das partículas em um determinado material. Os resíduos na forma de partículas pequenas podem ser usados directamente no processo de briquetagem, entretanto, resíduos com tamanhos maiores devem ser reduzidos a partículas menores para serem compactados adequadamente (DA SILVA, 2007).

Segundo o mesmo autor, quanto menor o tamanho da partícula mais exequível é o processo de compactação pois há uma maior ligação entre elas devido a uma maior área de superfície de contacto.

A granulometria das partículas é importante no processo de briquetagem porque partículas menores auxiliam a preencher espaços vazios influenciando assim na resistência do produto final. O tamanho das partículas influencia na força máxima suportada pelo briquete, onde briquetes de granulometria variada terão valores de força máxima de suporte diferentes (SILVA *et al.*, 2015)

Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma medida que expressa a relação entre a massa da madeira e o seu volume. Existem vários tipos de densidade da madeira, com destaque para a densidade aparente, a densidade máxima e a densidade básica. Dentre essas, a densidade básica é uma das mais utilizadas em aplicações energéticas, pois fornece uma referência consistente para calcular o potencial energético da madeira como fonte de combustível. A densidade básica da madeira não é mais que a relação quociente entre a massa anidra da madeira e o seu volume no estado saturado (fórmula 2), conforme a norma ISO 13061-2 (2014):

$$\rho_{básica} = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad (2)$$

Onde:

$\rho_{básica}$ - é a densidade básica, expressa em g/cm³ ou kg/m³

M_s - é a massa seca, expressa em g ou kg;

V_{sat} - é o volume saturado, expresso em cm³ ou m³

Quanto menor for a densidade do material de origem maior será a densidade dos briquetes, no entanto o processo requer maior energia no processo de compactação. Os materiais com

densidades altas seriam de pouco interesse para briquetagem pelo reduzido ganho na densificação destes materiais (RODRIGUES, 2010; e FURTADO *et al.*, 2010).

Teor de humidade

Existe uma faixa de teor de humidade na qual o material pode ser compactado adequadamente que depende do tipo de matéria-prima e do processo de compactação. Para que a compactação dos resíduos seja bem-sucedida, é necessário que a humidade esteja compreendida entre 8 e 15 % (GONÇALVES, 2010). O resíduo muito seco ou acima da humidade indicada produz um briquete com baixa estabilidade dimensional, desfazendo-se quando armazenado ou transportado (QUIRINO, 1991). O excesso de humidade pode provocar explosões pela formação de vapor de água e ocasionar o aparecimento de rachaduras ou fissuras no produto final (GONÇALVES, 2010).

Pressão de Compactação

A pressão de compactação é exercida através de diferentes tipos de briquetadeiras tais como: a prensa de pistão mecânico, a prensa de parafuso cónico, a prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida e a prensa peletizadora.

Na prensa de pistão mecânico, a matéria-prima é alimentada por um funil e compactada em uma matriz por meio de um pistão que se movimenta alternadamente (GONÇALVES, 2010). Segundo DA SILVA (2007), a prensa possui uma capacidade que pode variar de 40 kg/h a 2,500 kg/h, os briquetes têm forma cilíndrica, com diâmetro entre 5 e 10 cm.

Na prensa de parafuso cónico, o parafuso alimenta a matéria-prima e a pré-compacta em uma antecâmara, posteriormente um cabeçote de compressão compacta e extrusa a biomassa em uma matriz, a capacidade produtiva varia entre 600 e 1 000 kg/h, dependendo do tipo de material (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

Na prensa com parafuso cilíndrico e matriz aquecida, o material é forçado a passar directo por uma parte estreita, cónico e aquecida, com um molde de saída, o formato do molde dos briquetes pode ser circular ou quadrado, este último com os cantos arredondados, os briquetes apresentam de 5 a 10 cm diâmetro, possui capacidade de briquetagem que pode variar de 50 a 800 kg/h (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

A prensa peletizadora consiste em um rolo que gira contra uma matriz dotada de vários furos de

pequeno diâmetro, a matéria-prima é colocada entre o rolo e a matriz, e a passagem do rolo provoca a extrusão do material através dos furos, o produto extrudado é denominado de pellet devido ao pequeno diâmetro (BHATTACHARYA *et al.*, 1989). A capacidade pode variar de 1 t/h a 30 t/h, o tamanho dos pellets é normalmente de 5 a 15 mm de diâmetro, com um comprimento de 30 mm (DA SILVA, 2007).

A compactação dos resíduos ocorre com a aplicação de pressão. A intensidade e o período de aplicação de pressão variam com as características do material original e com o tipo de prensa, a densidade final do produto depende da pressão aplicada durante a compactação (FILIPPETTO, 2008).

Temperatura de Compactação

A temperatura de compactação tem um papel relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. A compactação em temperaturas acima de 100 °C promove a plasticização da lignina contida nas células dos resíduos, que age como um aglutinante entre as partículas, dispensando, assim, o uso de ligantes adicionais na biomassa. Além disso, temperaturas elevadas evaporam parte da umidade da biomassa, melhorando o poder calorífico do produto compactado (BHATTACHARYA *et al.*, 1989).

A temperatura de compactação elevada melhora a qualidade dos briquetes, pois proporciona maiores valores de densidade aparente e densidade energética (SOUZA & VALE, 2016). PAULA (2010), avaliou o efeito da temperatura de briquetagem, chegou a conclusão que a resistência à compressão dos briquetes se elevou com o aumento da temperatura.

Tempo de Compactação

De acordo com PAULA (2010), o tempo de briquetagem ou o tempo de compactação pode ter um impacto significativo na resistência mecânica dos briquetes, em geral um tempo de compactação adequado permite melhor compactação do material, resultando em briquetes mais densos e com maior resistência.

Quando o tempo de compactação é muito curto, pode não haver tempo suficiente para que as partículas se unam de forma eficaz, levando à formação de briquetes mais frágeis, por outro lado um tempo excessivo pode resultar em superaquecimento ou degradação do material, afetando negativamente a sua integridade estrutural (PAULA, 2010).

2.6. Espécie usada

A *Brachystegia spiciformis* é uma espécie arbórea que pertence a família *Fabaceae*, subfamília *Leguminosae* – *Caesalpinioideae*, vulgarmente conhecida por messasa comum, morroto, mucarara, metamba, marota, tamba. *Brachystegia spiciformis* localiza-se no sul e leste da República Democrática do Congo, sudeste do Quênia, Tanzânia e Angola, Zimbábue, Moçambique e norte da África do Sul (ORWA *et al.*, 2009).

Brachystegia spiciformis é uma árvore de 8-25 m (máximo 28m) de altura com uma copa plana, profundamente fissurado verticalmente. Os ramos são pesados, empurrando para cima e para fora, muitas vezes torcendo e curvando, dando à árvore uma bela forma e equilíbrio (ORWA *et al.*, 2009).

A madeira de *Brachystegia spiciformis* é utilizada para construção, armações, móveis baratos, colmeias. É igualmente importante como fonte de lenha e carvão, estando entre as espécies preferidas para produção de carvão em toda a África Austral (PROTA, 2016).

A madeira é bastante pesada, com densidade de 680–915 kg/m³ a 12% teor de humidade. Devido à sua dureza e grão entrelaçado, a madeira é difícil de serrar e trabalhar com ferramentas manuais e mecânicas (PROTA, 2016).

MAGALHÃES (2018) estimou no âmbito do inventário florestal nacional um volume comercial a nível dessa espécie em 110 220 000 m³.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Obtenção e caracterização do material para a produção de briquetes

As pranchas da espécie *Brachystegia spiciformis* usadas para a produção da serradura foram obtidas de a partir de árvores extraídas da floresta de miombo da empresa florestal Levas-Flor, Lda. Situada no distrito de Cheringoma, província de Sofala, na região centro de Moçambique. O distrito de Cheringoma tem, um clima tropical húmido com duas estações distintas (estação seca e húmida), tem uma temperatura média anual de 24,7°C e uma precipitação média anual de 1428mm, possui solos arenosos e solos aluviais argilosos, é atravessado por 3 rios principais de regime permanente (MICOA, 2012).

A serradura foi obtida de serragem transversal de três pranchas em que tinham sido divididas a região do cerne e borne, a serragem foi feita por meio de uma serra disco móvel na carpintaria do CIF no Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM). A serragem foi efectuada sobre uma lona limpa de polietileno para evitar a contaminação do material com areia e outros impurezas durante o processo.

3.2. Caracterização da serradura do estudo

A caracterização do material consistiu na sua classificação granulométrica, e na determinação do teor de humidade e de cinza.

3.2.1. Classificação granulométrica

A serradura obtida no processo de serragem foi submetida à classificação granulométrica a partir de 3 amostras com peso de 100g cada. As amostras foram colocadas num crivo e em seguida agitada por 3 minutos aproximadamente usando peneiras com abertura de 0,5, 1, 2 e 4 mm, onde a peneira de 4mm foi usada para reter impurezas constituídas maioritariamente por casca e que foram descartadas em análises posteriores. A serradura retida nas restantes peneiras foi colocada em placas de petri e pesada em uma balança analítica de precisão de 0,01g. Em seguida calculou-se a percentagem de massa retida em cada peneira em relação a massa total, usando a seguinte fórmula (3):

$$w\% = \left(\frac{w_p}{w_t} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

W% - percentagem de partículas retiradas numa determinada peneira

W_p – peso da amostra retida numa determinada peneira (g)

W_t – peso total da amostra (g)

3.2.2. Determinação da humidade

Para a determinação da humidade da serradura foram usadas 3 placas de petri que foram inicialmente levadas a estufa a uma temperatura de 103°C por 10 minutos para a eliminação de humidade residual. Após o arrefecimento no dessecador, as placas de petri foram pesadas e adicionadas 5g de serradura cada e colocadas na estufa por 2 horas à temperatura de 103°C. No final de 2 horas elas foram retiradas da estufa, colocadas no dessecador para arrefecimento e em seguida pesadas novamente. Este procedimento foi seguido até que a diferença entre dois pesos consecutivos fosse menor ou igual a 0,2%.

A humidade da serradura foi calculada com base na seguinte fórmula (4), de acordo com o procedimento indicado na norma E871-82 (ASTM, 2013).

$$w\% = \left[\frac{(w_i - w_f)}{(w_i - w_c)} \right] \times 100 \quad (4)$$

Onde:

W% - Percentagem de humidade da amostra (%)

W_i - Peso inicial da amostra e placa de petri (g)

W_f - Peso final da amostra e placa de petri (g)

W_c - Peso da placa de petri (g)

3.2.3. Determinação do teor de cinza

O teor de cinzas foi determinado a partir de serradura triturada num moinho de facas de tipo Wiley até que as partículas fossem menores que 0,5 mm para formar uma amostra composta. Em seguida usou-se cadinhos de porcelana que foram inicialmente levados a mufla para aquecimento a uma temperatura de 600°C por 15 minutos. Após o arrefecimento no dessecador os cadinhos foram pesados e adicionados a cada um deles 2g de serradura e levados a mufla onde permaneceram a temperatura de 600°C por 15 horas. Em seguida foram retirados os cadinhos da mufla e coloca-los no dessecador para o arrefecimento e pesagem. Os cadinhos foram colocados novamente na mufla a 600°C em seguida arrefecidos e pesados, e esse procedimento foi seguido até que a diferença entre dois pesos consecutivos fosse de 0,2 mg, de acordo com a norma D1102-84 (ASTM, 2013). Segundo a mesma norma, o teor de cinza é dado pela equação (fórmula 5):

$$TC = \frac{Pf - Pc}{mi} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TC- Teor de Cinza (%)

Pf- Peso do cadinho + amostra após a queima na mufla

Pc-Peso do cadinho (g)

mi- massa da amostra inicial (g)

3.3. Acondicionamento da serradura e produção de briquetes

A serradura para produção dos briquetes foi acondicionada até 10% de conteúdo de humidade. Esta foi colocada numa bandeja e levada a estufa para secagem, onde a humidade foi controlada através de um analisador de humidade (figura 1).



Figura 1. Analisador de humidade

A produção de briquetes foi conduzida no laboratório da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, na cidade de Maputo. A briquetadeira do laboratório era constituída por duas placas (placa superior e placa inferior) (figura 2, A). Por baixo da placa inferior encontrava-se um macaco que servia para movê-la no acto de compressão e o manómetro para o controle da pressão. A briquetadeira contém ainda um sistema de aquecimento móvel, cuja finalidade é elevar a temperatura do molde metálico cilíndrico que faz parte da briquetadeira. O molde metálico usado na produção dos briquetes tinha 5,3 cm de diâmetro interno, 7 cm de comprimento e paredes com 2 cm de espessura (figura 2, B).

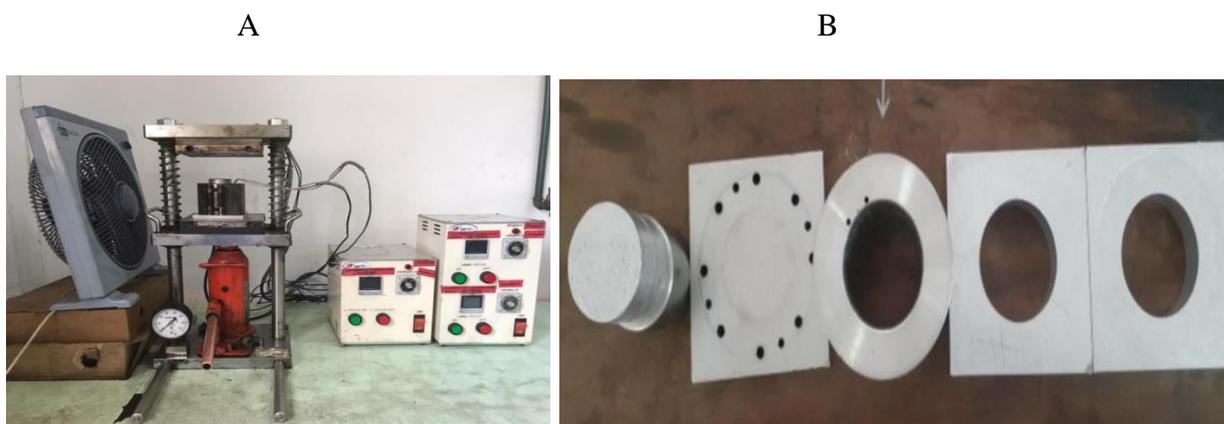


Figura 2. Briquetadeira e seus acessórios. A – Briquetadeira; B - Molde e os acessórios

Foram produzidos 48 briquetes (figura 3) de 60g, a partir de serradura com 10% de teor de humidade, temperaturas de prensagem variando entre 120°C e 150°C, à pressão de 12 Mpa, utilizando tempo de compactação de 2 a 3 minutos e um tempo de cura de 7 dias, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de briquetes de Brachystegia spiciformes produzidos para o ensaio

Posição	Tempo	Temperatura				Total
		120	130	140	150	
Cerne	2 min	3	3	3	3	12
	3 min	3	3	3	3	12
Borne	3 min	3	3	3	3	12
Mistura	3 min	3	3	3	3	12
Total		12	12	12	22	48

Após a produção seguida da cura, os briquetes foram colocados numa câmara de aclimatização, com ambiente interno de 20⁰C de temperatura e 65% de humidade relativa por mais ou menos 4 meses, condições estabelecidas para que os briquetes atinjam teor de humidade de 12%.



Figura 3. Briquetes produzidos

3.4. Determinação das propriedades físico-mecânicas dos briquetes

Aos briquetes produzidos foram determinadas propriedades físicas (densidade aparente e teor de humidade) e propriedades mecânicas (carga máxima de ruptura).

3.4.1. Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada para todos os briquetes produzidos usando o método estereométrico (fórmula 6), que consistiu na obtenção dos volumes dos briquetes (fórmula 7) a partir da medição dos respectivos diâmetros cruzados, e alturas medidas em 4 pontos usando um

paquímetro (figura 4) assim como, na determinação da massa do briquete usando uma balança com precisão de 0,01g.

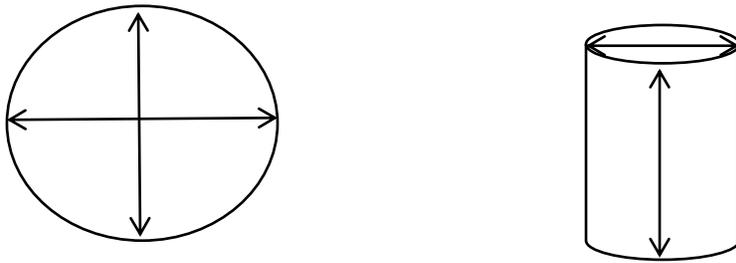


Figura 4. Ilustração do procedimento de medição de diâmetro e altura dos briquetes

A densidade aparente será dada pela fórmula abaixo:

$$D = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Onde:

D – densidade do briquete (g/cm³)

m- peso do briquete (g)

v- volume (cm³).

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad (7)$$

Onde:

π - 3.1416

d- diâmetro (cm)

h- altura (cm)

3.4.2. Teor de humidade

O teor de humidade foi determinado após o ensaio de resistência mecânica dos briquetes, a partir de serradura triturada para o ensaio de teor de cinzas, antes de ser realizada o referido ensaio. O

teor de umidade foi determinado seguindo o mesmo procedimento apresentado na seção 3.2.2. e em conformidade com a norma E871-82 (ASTM, 2013).

3.4.3. Carga máxima de ruptura

Para a obtenção da carga máxima de ruptura foram usados 48 briquetes que foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos usando a máquina universal de ensaios do Laboratório de Tecnologia da Madeira, da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da UEM (figura 5).



Figura 5. Teste de resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

O ensaio consistiu em comprimir os briquetes no sentido diametral isto é perpendicular à tangente horizontal das bordas circulares dos briquetes sob ensaio. Para tal, foram colocadas duas placas de painel de fibra duro com 7,5 mm de comprimento prensada sobre os pratos da máquina universal, sobre as quais foram colocados e centralizados os briquetes para serem comprimidos, em conformidade com a norma ABNT NBR 7222.

3.5. Análise de dados

A análise de dados foi feita usando os pacotes Stata e Excel. O pacote Excel foi utilizado para organizar e estruturar os dados coletados, realizar cálculos preliminares e testes estatísticos básicos (calcular médias, desvios padrão e outras estatísticas descritivas), permitindo a visualização clara dos dados por meio de gráficos e tabelas.

Para uma análise mais aprofundada das variâncias das medições, usou-se o Stata, para análise de variância com a finalidade de verificar se os tratamentos estudados apresentavam diferenças estatisticamente significativas entre si.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do Material de Estudo

4.1.1. Granulometria

A granulometria é um factor fundamental no processo de briquetagem, pois influencia diretamente a resistência mecânica do produto final. Uma distribuição adequada do tamanho das partículas não apenas melhora a compactação na formação dos briquetes, mas também garante maior homogeneidade e integridade estrutural, resultando em produtos mais robustos e duráveis, portanto, é essencial um controle rigoroso da granulometria para otimizar a eficiência do processo e a qualidade dos briquetes produzidos (NAKASHIMA *et al.*, 2017).

A Figura 6 apresenta a distribuição granulométrica da serradura obtida a partir da serragem de tábuas da espécie *Brachystegia spiciformis*.

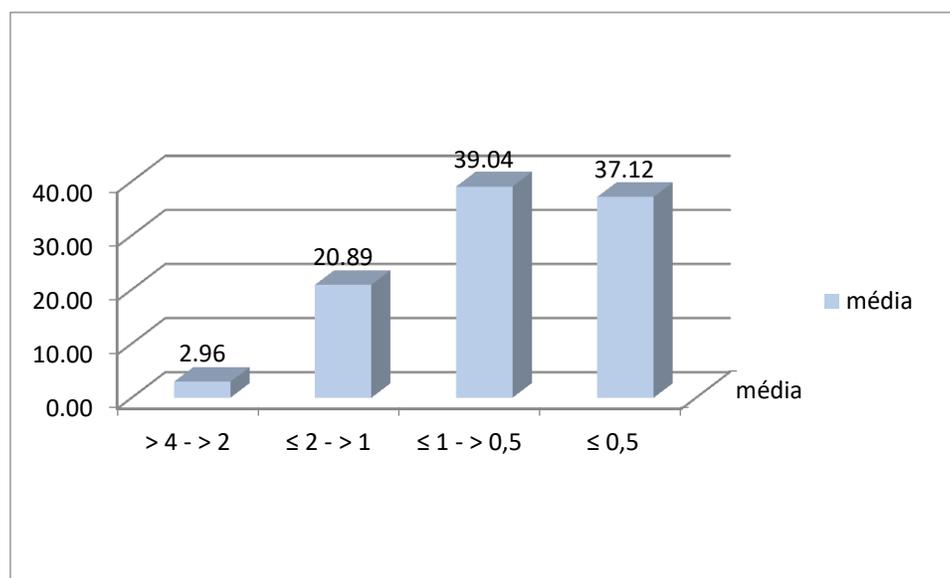


Figura 6. Granulometria de serradura de *Brachystegia spiciformis*

Em média, cerca de 76% da massa de serradura gerada a partir da serragem de *Brachystegia spiciformis* foi retida na peneira de 0,5 mm (pertencente ao intervalo de $\leq 1 > 0,5$) e no recipiente inferior da mesa vibratória ($\leq 0,5$ mm), enquanto que cerca de 20% da massa permaneceu na peneira de 1 mm (pertencente ao intervalo de $\leq 2 > 1$). O material retido nas peneiras de 4 mm e 2 mm, totalizando 2,96%, foi considerado desperdício não adequado para briquetagem. DA

SILVA *et al.* (2015), ao analisarem a serragem de eucalipto após o processo de moagem, notaram que uma grande proporção de partículas passou pela peneira de 0,5 mm. De acordo com ERIKSSON *et al.* (1990), a utilização de matéria-prima com uma granulometria menor favorece a produção de briquetes mais densos e resistentes, uma vez que há uma redução nos espaços vazios entre as partículas, resultando em uma melhor ligação durante o processo de compactação.

4.1.2. Teor de Humidade

A humidade inicial da serradura utilizada neste estudo foi, em média, de 11,17%. Esse valor encontra-se dentro do intervalo recomendado por diversos autores. JÚNIOR e PIMENTA (2015) fabricaram briquetes utilizando serradura de madeira com um teor de humidade de 12,1%, MARROZI (2012) utilizou serradura com 13,48% de humidade e VALENTIM (2021) obteve resultados satisfatórios ao produzir briquetes de *Brachystegia spiciformis* a partir de serradura com 10% de humidade. FILIPPETO (2008) sugere que a produção de briquetes seja feita com um teor de humidade entre 5% e 15%, considerando 8% como o nível mais apropriado para a maioria dos materiais a serem briquetados. O uso de serradura muito seca ou com humidade acima dos níveis recomendados pode resultar em briquetes com baixa estabilidade dimensional, que se podem desintegrarem-se durante o armazenamento ou transporte (QUIRINO, 1991).

Para a produção experimental de briquetes neste trabalho a serradura foi acondicionada à teor de humidade de 10 %.

4.1.3. Teor de Cinza

O teor de cinzas é um parâmetro crucial ao utilizar madeira ou seus derivados como fonte de energia, pois representa a percentagem de material inerte que não gera calor e impacta negativamente o poder calorífico da biomassa (BOAS, 2011). Idealmente, o teor de cinzas deve ser o mais baixo possível, uma vez que isso implica uma maior quantidade de material combustível, resultando em uma maior contribuição energética (BOAS, 2011). A tabela 2 apresenta os valores de teor de cinza para a espécie em estudo.

Tabela 2. Teor de cinza da serradura de *B. spiciformis* (%)

Posição	Média	C.V.	Máximo	Mínimo
Cerne	2,74	15,30	3,23	2,15
Borne	2,67	11,11	2,87	2,15
Mistura	3,04	5,79	3,26	2,84

(C. V.) quer dizer coeficiente de variação

O teor médio de cinzas encontrado para a serradura analisada neste estudo varia entre 2,67% e 3,04%. Esse valor é superior ao reportado por VALENTIM (2021), que obteve um teor de cinza de 1,96% ao estudar a mesma espécie, e aos dados de LHATE (2011) para algumas espécies nativas de Moçambique, como *Plectranthus verticillatus-icuria* e *Pterocarpus angolensis* DC-umbila (menor que 1%), *Millettia stulmannii* Taub-jambirre e *Pericopsis angolensis*-muanga (entre 1-2%), e aproximados aos valores reportados para *Afzelia quanzensis*-chanfuta, *Sterculia appendiculata*-metil e *Pseudolachnostylis maprouneifolia*-ntholo (acima de 2%). O teor elevado de cinzas na *Brachystegia spiciformis*, em comparação com os valores apresentados por LHATE (2011) para outras espécies nativas, pode ser atribuído às características intrínsecas da própria espécie.

4.2. Propriedades físicas e mecânicas dos briquetes

4.2.1. Densidade aparente

A densidade aparente dos briquetes é um parâmetro crucial, pois influencia diretamente suas condições de transporte e armazenamento. Trata-se de uma propriedade física que impacta a densidade energética, ou seja, a quantidade de energia disponível por unidade de volume de briquete.

Na tabela 3, são apresentados os valores médios da densidade aparente, levando em consideração o tempo e a temperatura de compactação.

Tabela 3. Densidade aparente de briquetes de Brachystegia spiciformis em g/m³

Posição	Tempo	Temperatura			
		120	130	140	150
Cerne	2 min	0,984 (2,45)	0,943 (2,37)	0,970 (1,26)	0,881 (5,67)
	3 min	0,931 (2,13)	0,969 (4,08)	0,983 (4,67)	0,974 (1,75)
Borne	3 min	0,909 (6,93)	0,929 (4,13)	0,866 (1,82)	0,910 (2,65)
Mistura	3 min	0,998 (2,00)	0,935 (4,35)	0,978 (1,45)	0,913 (2,88)

Os valores dentro de () são de coeficiente de variação

No presente estudo, os briquetes apresentaram valores médios de densidade aparente variando entre 0,866 e 0,998 g/cm³ semelhante aos resultados encontrados por PAULA (2010) e VALENTIM (2021). PAULA (2010), que investigou diferentes resíduos para a produção de briquetes, a densidade dos briquetes feitos de serradura foi de 0,90 g/cm³. Em pesquisa realizada por RODRIGUES (2010), os briquetes elaborados com finos de madeira de eucalipto mostraram uma densidade aparente média de 1,10 g/cm³. VALENTIM, (2021) apresenta valores de densidade aparente entre 0,82 e 0,93 g/cm³. É importante ressaltar que uma densidade aparente mais elevada é considerada desejável, pois há uma relação directamente proporcional entre a densidade aparente e a densidade energética do briquete. Assim, conforme a densidade aparente aumenta, ocorre também um incremento na densidade energética (DE SOUSA e DO VALE, 2016).

4.2.2. Carga máxima de ruptura

A carga máxima de ruptura é um indicador que mede a resistência mecânica dos briquetes e que resulta num parâmetro importante para auferir a resistência dos briquetes a eventos mecânicos durante o seu manuseamento, transporte e armazenamento.

Na tabela 4, são apresentados os valores médios da carga máxima de ruptura e o coeficiente de variação, levando em consideração o tempo e a temperatura de compactação.

Tabela 4. Carga máxima de ruptura de briquetes de serradura de *Brachystegia spiciformis* em N

Posição	Tempo	Temperatura			
		120	130	140	150
Cerne	2 min	3141,17 (8,98)	2657,9 (10,32)	2797,4 (8,88)	2448,4 (9,35)
	3 min	2416,03 (16,35)	2960,67 (14,33)	2964,33 (20,98)	2676,63 (10,39)
Borne	3 min	3770,77 (18,87)	4113 (7,88)	2878,93 (1,47)	3683,7 (7,96)
Mistura	3 min	3256,73 (10,31)	2574,9 (23,24)	3330,3 (14,6)	2847,27 (3,19)

Os valores dentro de () são de coeficiente de variação

PAULA *et al.* (2011) estudaram a produção de briquetes a partir de resíduos de madeira, como lascas e serradura, aplicando uma pressão de compactação de aproximadamente 2176 PSI (15,00 MPa). Eles observaram um valor médio de ruptura de 1.865,51 N, que está abaixo dos intervalos de valores observados neste estudo. Além disso, PROTÁSIO *et al.* (2011) registraram valores variando entre 2.745,86 N e 3.628,46 N, para briquetes feitos com serradura de eucalipto, cujos resultados também estão dentro do intervalo de 2.416,03 N a 4.113 N observado neste estudo. Em contraste, as cargas máximas de ruptura obtidas neste estudo superam as encontradas no trabalho de VALENTIM, (2021), que reporta valores de carga máxima de ruptura até 2.676,7 N para briquetes produzidos a partir de serradura de *Brachystegia spiciformis*. A alta resistência mecânica dos briquetes produzidos a partir de serradura de madeira é atribuído em parte à presença de lignina nas partículas de serradura.

4.3. Efeito de diferentes variáveis sobre as propriedades energéticas e mecânicas dos briquetes

4.3.1. Efeito da região do lenho na densidade aparente, teor de cinza e carga máxima de ruptura

O efeito da região do lenho do material usado na produção dos briquetes foi analisado para densidade aparente o teor de cinzas e a carga máxima de ruptura, através da análise de variância por meio do teste de comparação de médias de Fisher-Hayter. A Tabela 5 apresenta os resultados da análise.

Tabela 5. Efeito da região do lenho sobre as propriedades energéticas e mecânicas dos briquetes

Propriedade analisada	Temperatura	Grupo vs Grupo	Média 1	Média 2	Diferença de médias	Teste F
Densidade aparente	120°C	Cerne vs Borne	0,9311	0,9094	0,0217	0,9427
		Cerne vs Mistura	0,9311	0,9983	0,0672	2,9223
		Borne vs Mistura	0,9094	0,9983	0,0889	3,8650*
	130°C	Cerne vs Borne	0,9693	0,9288	0,0405	1,7752
		Cerne vs Mistura	0,9693	0,9346	0,0347	1,5203
		Borne vs Mistura	0,9288	0,9346	0,0050	0,2549
	140°C	Cerne vs Borne	0,9831	0,8664	0,1167	6,9285*
		Cerne vs Mistura	0,9831	0,9775	0,0055	0,3275
		Borne vs Mistura	0,8664	0,9775	0,1112	6,6010*
	150°C	Cerne vs Borne	0,9737	0,9099	0,0638	4,8463*
		Cerne vs Mistura	0,9737	0,9125	0,0612	4,6498*
		Borne vs Mistura	0,9099	0,9125	0,0026	0,1964
Teor de cinza		Cerne vs Borne	2,7440	2,6740	0,0700	0,4980
		Cerne vs Mistura	2,7440	3,0360	0,2920	2,0775
		Borne vs Mistura	2,6740	3,0360	0,3620	2,5755
Carga máxima de ruptura	120°C	Cerne vs Borne	2416,0333	3770,7667	1354,7334	4,6160*
		Cerne vs Mistura	2416,0333	3256,7334	840,7001	2,8645
		Borne vs Mistura	3770,7667	3256,7334	514,0333	1,7515
	130°C	Cerne vs Borne	2960,6667	4113,0000	1152,3333	4,3105*
		Cerne vs Mistura	2960,6667	2574,9000	385,7667	1,4430
		Borne vs Mistura	4113,0000	2574,9000	1538,1000	5,7535*
	140°C	Cerne vs Borne	2964,3333	2878,9333	85,4001	0,3241
		Cerne vs Mistura	2964,3333	3330,3000	365,9667	1,3890
		Borne vs Mistura	2878,9333	3330,3000	451,3668	1,7131
	150°C	Cerne vs Borne	2676,6333	3683,7000	1007,0667	7,2930*
		Cerne vs Mistura	2676,6333	2847,2667	170,6334	1,2357
		Borne vs Mistura	3683,7000	2847,2667	836,4333	6,0573*

(*) *diferença significativa entre as médias estudadas*

De acordo com a Tabela 5, observaram-se diferenças significativas da densidade aparente para as temperaturas de 120°C, 140°C e 150°C, mas de um modo geral a densidade aparente apresenta uma tendência decrescente de seus valores na direção Cerne, Mistura, Borne. A maior densidade aparente do cerne em comparação ao borne pode ser atribuída à sua composição mais homogênea e maior conteúdo de lignina, que conferem maior compactação e resistência (SANTOS *et al.*, 2020). Isso colabora com a observação de que, em briquetes de madeira, a densidade está frequentemente relacionada à proporção de componentes estruturais e à humidade presente, como discutido por FERREIRA *et al.* (2018). Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas para o teor de cinzas.

Relativamente à carga máxima de ruptura, foram detectadas diferenças significativas para as temperaturas de 120°C, 130°C e 150°C, onde de um modo geral a carga máxima de ruptura apresentou uma tendência de aumento na direção radial cerne, mistura, borne. A maior resistência mecânica dos briquetes do borne pode ser explicada pela menor densidade básica da madeira do borne em relação ao cerne (MUSSANA, 2018) que resulta em maior razão de compactação (IWAKIRI, 2005).

4.3.2. Efeito da temperatura de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima

O efeito da temperatura de compactação foi analisado sobre a densidade aparente e a carga máxima de ruptura através do teste de Fisher-Hayter de comparação de médias (Tabela 6).

Tabela 6. Efeito da temperatura de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura

Propriedade analisada	Natureza do material	Grupo vs Grupo	Média 1	Média 2	Diferença de médias	Teste F
Densidade aparente	Cerne	120°C vs 130°C	0,9311	0,9693	0,0382	2,0078
		120°C vs 140°C	0,9311	0,9831	0,0520	2,7308
		120°C vs 150°C	0,9311	0,9737	0,0426	2,2394
		130°C vs 140°C	0,9693	0,9831	0,0138	0,7230
		130°C vs 150°C	0,9693	0,9737	0,0044	0,2316
		140°C vs 150°C	0,9831	0,9737	0,0094	0,4914
	Borne	120°C vs 130°C	0,9094	0,9288	0,0194	0,8498
		120°C vs 140°C	0,9094	0,8664	0,0430	1,8818
		120°C vs 150°C	0,9094	0,9099	0,0005	0,0239
		130°C vs 140°C	0,9288	0,8664	0,0624	2,7316
		130°C vs 150°C	0,9288	0,9099	0,0189	0,8260
		140°C vs 150°C	0,8664	0,9099	0,0436	1,9057
	Mistura	120°C vs 130°C	0,9983	0,9346	0,0637	4,0683*
		120°C vs 140°C	0,9983	0,9775	0,0207	1,3255
		120°C vs 150°C	0,9983	0,9125	0,0858	5,4806*
		130°C vs 140°C	0,9346	0,9775	0,0429	2,7428
		130°C vs 150°C	0,9346	0,9125	0,0221	1,4122
		140°C vs 150°C	0,9775	0,9125	0,0650	4,1551*
Carga máxima de ruptura	Cerne	120°C vs 130°C	2416,0333	2960,6667	544,6334	2,1093
		120°C vs 140°C	2416,0333	2964,3333	548,3000	2,1235
		120°C vs 150°C	2416,0333	2676,6333	260,6000	1,0093
		130°C vs 140°C	2960,6667	2964,3333	3,6667	0,0142
		130°C vs 150°C	2960,6667	2676,6333	284,0334	1,1000
		140°C vs 150°C	2964,3333	2676,6333	287,7000	1,1142
	Borne	120°C vs 130°C	3770,7667	4113,0000	342,2333	1,4175
		120°C vs 140°C	3770,7667	2878,9333	891,8334	3,6938
		120°C vs 150°C	3770,7667	3683,7000	87,0667	0,3606
		130°C vs 140°C	4113,0000	2878,9333	1234,0667	5,1112*
		130°C vs 150°C	4113,0000	3683,7000	429,3000	1,7781
		140°C vs 150°C	2878,9333	3683,7000	804,7668	3,3332
	Mistura	120°C vs 130°C	3256,7334	2574,9000	681,8334	2,7929
		120°C vs 140°C	3256,7334	3330,3000	73,5667	0,3013
		120°C vs 150°C	3256,7334	2847,2667	409,4667	1,6772
		130°C vs 140°C	2574,9000	3330,3000	755,4001	3,0942
		130°C vs 150°C	2574,9000	2847,2667	272,3667	1,1156
		140°C vs 150°C	3330,3000	2847,2667	483,0334	1,9786

(*) diferença significativa entre as médias estudadas

Os resultados indicaram que para o cerne, com exceção de um caso (para a temperatura de 150 °C), a densidade aparente e a carga máxima aumentaram com o aumento da temperatura, o que foi confirmado por estudo de GARCÍA *et al.* (2015), onde a densidade aparente de briquetes de biomassa tende a aumentar conforme a temperatura de processamento se eleva, devido à maior compactação das fibras. FERREIRA (2019), ao analisar as temperaturas de 100, 130 e 160 °C na produção de briquetes de cerne e de borne de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, verificou que os briquetes de cerne a 160 °C apresentavam maior resistência mecânica. LIMA e FERREIRA (2018) indicam que a resistência mecânica dos briquetes aumenta com a temperatura até um certo ponto, devido à maior interação entre as partículas.

No entanto, para a maior parte dos casos as posições borne e mistura revelam um fenômeno contrário, onde a densidade aparente reduz com o aumento da temperatura de compactação. A situação mais crítica observa-se para os briquetes de mistura onde em dois casos o efeito da temperatura sobre a densidade aparente é estatisticamente significativo. Há necessidade de estudos adicionais aumentando o tamanho da amostra para o esclarecimento dessas constatações que são contrárias ao que é indicado na literatura.

4.3.3. Efeito do tempo de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura

O efeito do tempo de compactação na densidade aparente e na carga máxima dos briquetes foi analisado apenas para os briquetes do cerne através do teste de Tukey de comparação de médias (Tabela 7).

Tabela 7. Efeito do tempo de compactação sobre a densidade aparente e carga máxima de ruptura dos briquetes

Propriedade analisada	Temperatura de compactação	Bloco	Margem	Erro padrão	Grupos não ajustados	
Densidade aparente	120°C	2 minutos	0,9843	0,0128	A	
		3 minutos	0,9311	0,0128	B	
	130°C	2 minutos	0,9431	0,0185	A	
		3 minutos	0,9693	0,0185	A	
	140°C	2 minutos	0,9704	0,0194	A	
		3 minutos	0,9831	0,0194	A	
	150°C	2 minutos	0,8813	0,0215	A	
		3 minutos	0,9737	0,0215	B	
	Carga máxima de ruptura	120°C	2 minutos	3141,167	198,1576	A
			3 minutos	2416,033	198,1576	A
130°C		2 minutos	2657,9	206,3004	A	
		3 minutos	2960,667	206,3004	A	
140°C		2 minutos	2797,4	273,3477	A	
		3 minutos	2964,333	273,3477	A	
150°C		2 minutos	2448,4	147,0113	A	
		3 minutos	2676,633	147,0113	A	

Os resultados mostram que, em geral, a densidade aparente tende a aumentar com o aumento da temperatura de compactação, uma observação que é verificada por SILVA *et al.* (2019) que observaram que a densidade aparente de briquetes de biomassa aumentou linearmente com a temperatura, indicando uma melhor compactação das partículas da biomassa em temperaturas mais elevadas. A exceção observada para a densidade aparente em 120°C durante o tempo de compactação de 2 minutos é intrigante, pelo que há necessidade de estudos adicionais com maior tamanho amostra para o seu esclarecimento. Observou-se uma tendência de aumento da carga máxima de ruptura com o aumento do tempo de compactação, entretanto não se observaram

diferenças significativas entre os dois tempos de compactação para as diferentes temperaturas de compactação.

4.3.4. Implicações práticas dos resultados obtidos

A análise dos resultados obtidos nas diferentes propriedades dos materiais (densidade aparente, teor de cinza e carga máxima de ruptura) em função da temperatura e do tempo de compactação revela várias implicações práticas:

Escolha de tipo de material: as diferenças significativas observadas entre os grupos cerne, borne e mistura em várias condições indicam que a escolha do tipo de material deve ser feita com base nas propriedades desejadas para a aplicação. Os briquetes do borne apresentaram maior carga de ruptura que os do cerne e mistura, sugerindo maior integridade dos briquetes do borne durante o seu manuseamento

Escolha de temperatura de compactação: os resultados indicam que a temperatura de compactação influencia significativamente a densidade aparente e a carga máxima de ruptura dos materiais. Portanto, na seleção de materiais para aplicações específicas, é crucial considerar a temperatura de compactação. Por exemplo, para aplicações que demandam alta resistência, as temperaturas de 140°C e 150°C podem ser preferíveis, pois tendem a resultar em maiores propriedades mecânicas.

Efeito do tempo de compactação: o tempo de compactação também se mostrou relevante, especialmente para a densidade aparente. Um tempo de compactação de 3 minutos geralmente resulta em melhores propriedades do que 2 minutos. Isso sugere que, em processos de fabricação, uma otimização do tempo de compactação pode melhorar as características do produto final.

Impacto na sustentabilidade e eficiência: o entendimento do comportamento dos materiais em diferentes temperaturas e tempos pode levar à otimização dos processos de fabricação, o que não apenas melhora as propriedades dos produtos, mas também potencialmente reduz desperdícios e custos. Isso é especialmente relevante em indústrias onde a sustentabilidade e a eficiência dos recursos são prioridades.

Desenvolvimento de normas e padrões: os resultados podem contribuir para o desenvolvimento de normas de qualidade e especificações técnicas para a produção de briquetes, garantindo que o produto atenda a critérios de desempenho em diferentes condições de uso.

V. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos apresentam-se as seguintes conclusões:

1. A serradura proveniente da serragem de pranchas de *Brachystegia spiciformis* com serra disco é predominantemente composta por partículas finas, com 76% das partículas apresentando uma granulometria inferior a 2 mm.
2. Os valores de densidade aparente, teor de cinzas e carga máxima obtidos neste estudo variaram conforme as condições de prensagem, apresentando os valores de 0,866 g/cm³ a 0,998 g/cm³ para a densidade aparente, de 2,67% a 3,04% para o teor de cinza e de 2 416,03 N a 4 113 N para a carga máxima de ruptura.
3. A região do lenho teve efeito estatisticamente significativo sobre a densidade aparente, onde de modo geral, a densidade aparente foi maior para o cerne em comparação ao borne; a carga máxima de ruptura apresentou uma tendência de aumento na direcção cerne, mistura e borne.
4. A densidade aparente aumentou com a temperatura, excepto em um caso específico a 120°C, e a carga máxima de ruptura dos briquetes aumentou com a temperatura, especialmente para os briquetes de cerne.
5. O aumento do tempo de compactação geralmente resultou em uma carga máxima de ruptura maior.

VI. RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados recomenda-se:

1. Realizar uma pesquisa aprofundada sobre a influência que a temperatura de compactação tem nas propriedades físico-mecânicas e energéticas dos briquetes e produzir um maior número de amostra e ou repetições ao se realizar a pesquisa com vista a verificar os casos em que os resultados são ilógicos.
2. Realizar testes adicionais em diferentes condições de temperatura e tempo de compactação para validar as tendências observadas e determinar padrões mais robustos.
3. Realizar testes de índice de combustão para avaliar o desempenho dos briquetes durante a combustão (quantidade de massa perdida em função do tempo e temperatura, e tempo necessário para os briquetes serem reduzidos a cinza).
4. Testar o poder calórico dos briquetes
5. Testar outras matérias primas como serradura de outras espécies nativas.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✚ ATANASSOV, B.; EGAS, A.; FALCÃO, M.; FERNANDES, A.; MAHUMANE, G. 2012. Mozambique urban biomass energy analysis, Dezembro 2012. Ministério da Energia de Moçambique.
- ✚ BARBOSA, B. M.; SIQUEIRA, H. F.; CABRAL, C. P. T.; CANDIDO, W. L.; SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, S. C. O.; BARBOSA, A. R. 2021. Qualidade de briquetes produzidos a partir do mix de resíduo agroindustrial com eucalipto. Livro: Recursos Naturais: Energia de Biomassa, p. 185-196.
- ✚ BENÍCIO, E. L. 2011. Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- ✚ BILA, S. I. S. 2004. Avaliação da produção, comercialização e uso de serradura na cidade de Maputo, Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- ✚ BHATTACHARYA, S. C.; SETT, S.; SHRESTHA, R. M. 1989. State of the art for biomass densification. Energy Sources, v. 11, n. 3, p. 161-182, New York.
- ✚ BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B.; VALIN, M.; QUIRINO, W. F. 2014. Influencia da pressão e material nas propriedades de briquetes de biomassa florestal. 1º Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas, 02 a 05 de junho, Minas Gerais.
- ✚ BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; FONSECA, S. M. 1979. Bracatinga: Características químicas do carvão vegetal. Brasil Madeira, Curitiba, 3(33):6-7.
- ✚ CHAVES A. M. B. et al. 2013. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. Enciclopédia Bioesfera, Goiânia, v.9, n.17, p.533-542.
- ✚ DA SILVA, C. A. 2007. Estudo técnico-económico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Planeamento de Sistemas Energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ✚ DA SILVA, D. A.; YAMAJI, F. M.; De BARROS, J. L.; Da RÓZ, A. L.; NAKASHIMA, G. T. 2015. Caracterização de biomassas para a briquetagem. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, Brasil.
- ✚ DE ABEU, Paulo Henrique Fernandes. 2005. Formas de Aproveitamento do Resíduo da Madeira. Universidade Estadual de Maringá. Maringá-Paraná. Brasil.

- ✚ DEMAJORIVIC, J. 1995. Da política tradicional de tratamento do lixo à política de gestão de resíduos sólidos: as novas prioridades. *Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v.35, n.3, p.88-93.
- ✚ EGAS, A. F.; FERNADES, A. M.; BILA, N. F.; WILISSONE, A. 2016. Cadeia de fornecimento e consumo de combustíveis lenhosos nas cidades de Pemba e Montepuéz. Relatório. Maputo. Moçambique.
- ✚ EGAS, A. F. 2010. Energia de biomassa: Padrões de consumo e tecnologias de produção. Departamento de Engenharia Florestal-Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- ✚ EGAS, A. F. & NHANTUMBO, I. 2021. Proposta de modelo para o desenvolvimento da indústria florestal. Maputo.
- ✚ ERIKSSON, S.; PRIOR, M. 1990. The briquetting of agricultural wastes for fuel, Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- ✚ FERREIRA, J. M., ET AL. 2018. Estudo das propriedades físicas de briquetes de serradura. *Journal of Biomass Science*.
- ✚ FERREIRA, VITÓRIA ROBERTA DA SILVA. 2019. Produção e avaliação de briquetes de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) — Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba.
- ✚ FILIPPETTO, D. 2008. Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-económica e potencial de mercado. Dissertação (Mestrado em Planeamento de sistemas energéticos), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ✚ FURTADO, T. S.; VALIN, M.; BRAND, M. A.; BELLOTE, A. F. J. 2010. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileiro*, v. 30, p. 101-106. Brasília.
- ✚ GARCÍA, R., MARTÍNEZ, J., & SILVA, L. 2015. Efeitos da temperatura na densidade aparente de briquetes de biomassa. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, 10(2), 123-134.
- ✚ GONÇALVES, J. E. 2010. Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. Tese

(Doutorado em Agronomia- Energia da Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP.

- # HOUANA, I. M. 2015. O papel da educação ambiental na promoção do uso de resíduos de serração e carpintaria como combustíveis: Um estudo de caso do Distrito Municipal KaMavota em Maputo. Universidade Eduardo Mondlane. Maputo.
- # IWAKIRI, S. 2005. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: Fupef. 247p.
- # KARUNANITHY, C.; WANG, Y.; MUTHUKUMARAPPAN, K.; PUGALENDHI, S. 2012. Physiochemical characterization of briquettes made from different feedstocks. *Biotechnology Research International*, n. 1, p. 1-12.
- # LIMA, A. C., & FERREIRA, L. S. 2018. Estudo da resistência mecânica de briquetes de biomassa. *Bioenergy Research*, 11(3), 752-761.
- # LHATE, I. 2011. Chemical composition and machinability of selected wood species from Mozambique. Tese de Doutorado. Uppsala
- # MADALENA, Lilian Cristina de Souza. 2019. Análise Físico-Química e Energética de Briquetes de Feijão Guandu (*Cajanus cajan*) SILG 2009 Submetidos à Torrefação, Paraná-Brasil
- # MAGALHÃES, T. M. 2018. Relatório do IV Inventario Florestal Nacional. Maputo
- # MICOA. 2012. Projecto de avaliação ambiental estratégia da zona costeira-Moçambique. Perfil ambiental e mapeamento do uso actual da terra nos distritos da zona costeira de Moçambique
- # MUSSANA, A. 2018. Influência das classes diamétricas na variação das propriedades físico-mecânicas de *Brachystegia spiciformis* e *Julbernardia globiflora* nos distritos de Maganja da Costa e Mocubela (Zambézia). Dissertação de mestrado. Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal. UEM. Maputo 49p
- # OLIVEIRA, R. R. L. 2013. Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinados com parafina: caracterização de algumas propriedades. Ciências dos Materiais, Universidade Federal de São, Sorocaba- SP.
- # ORWA, C.; MUTUA, A.; KINDT, R.; JAMNADASS, R.; ANTHONY, S. 2009. Agroforestry Database: a tree reference and selection guide, version 4.0. World Agroforestry Centre, Kenya.

- # OSHIRO, T. L. 2016. Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulosicos. Tese (Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná
- # PAULA, L. E. de R.; TRUGILHO, P. F.; REZENDE, R. N. De ASSIS, C. O.; BALIZA, A. E. R. 2011. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. Pesquisa Florestal Brasileira, v.33, n.66, 103-112. Colombo
- # PAULA, L. E. R. 2010. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- # PROTA 7(2): Timbers/Bois d'œuvre 2 Record display. 17/08/2016- 10:58
- # PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. R. R. 2011. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. Pesquisa Florestal Brasileira. V.31, n.68, 273-283.
- # QUIRINO, W. F. 2003. Utilização energética de resíduos vegetais. LPF/IBAMA. p.14. Brasília.
- # QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. 1991. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. (Serie Técnica, 13), Brasília: LPF/IBAMA, 18.
- # QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA. F.; FILHO, M, T. 2012. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. Sci. For., Piracicaba, v. 40, n 96, p. 525-536.
- # RIBEIRO, N.; SITOIE, A. A.; GUEDES, B. S.; STAISS, C. 2002. “Manual de silvicultura tropical”. FAO, Maputo, Moçambique.
- # RODRIGUES, V. A. J. 2010. Valorização energética de Iodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa- MG.
- # SANTOS, Rosimeire Cavalcante. 2010. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. Tese (Doutoramento em Ciência e Tecnologia da Madeira), Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais, Brasil. 173 p.
- # SANTOS, A. L., et al. 2020. Influência da composição na densidade de briquetes de madeira. Revista Brasileira de Biomassa.

- # SILVA, D. A.da.et. al. 2015. Caracterização de Biomassas Para a Briquetagem. *Florestas*, Curitiba, PR, v.45, n.4, p.713-722.
- # SILVA, J. R., *et al.* 2019. Influência da temperatura na densidade aparente de briquetes de biomassa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(5), 345-352.
- # SOUZA, F. 2014. Avaliação da qualidade de briquetes produzidos com seis biomassas agro-florestais por método não destrutivos. Tese (Doutoramento em Ciências Florestais). Universidade de Brasília.
- # SOUZA, F. & VALE, A. T. 2016. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.36, n.88, p.405-413.
- # VALENTIM, EDSON, D. P. A. 2021. Avaliação de propriedades físico-mecânicas de briquetes produzidos a partir de serradura de messassa comum. Tese (Licenciatura em Engenharia Florestal). Universidade Eduardo Mondlane.
- # WERTZ-KANOUNNIKOFF, S.; LOCATELLI, B.; BROCKHAUS, M. 2011. Ecosystem-based adaptation to climate change: what scope for payments for environmental services? *Climate and Development* 3(2): 143-158. DOI:10.1080/17565529.2011.582277

VIII. Anexos

Influência da região do lenho na carga máxima

Para a temperatura de 120°C

```
. *(2 variables, 9 observations pasted into data editor)
```

```
. anova var2 var1
```

```
Number of obs =          9    R-squared      = 0.6441
Root MSE      =    508.33    Adj R-squared = 0.5255
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	2806309.5	2	1403154.7	5.43	0.0451
var1	2806309.5	2	1403154.7	5.43	0.0451
Residual	1550394	6	258399		
Total	4356703.5	8	544587.93		

```
. predict erro, residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.94930	0.745	-0.474	0.68242

```
. hetttest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

```
chi2(1)      =      1.16
```

```
Prob > chi2  =      0.2820
```

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	2416.0333 3770.7667	1354.7334	4.6160*
1 vs 3	2416.0333 3256.7334	840.7001	2.8645
2 vs 3	3770.7667 3256.7334	514.0333	1.7515

Para temperatura de 130°C

. anova var3 var1

Number of obs = 9 R-squared = 0.7492
 Root MSE = 463.034 Adj R-squared = 0.6656

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	3842439.7	2	1921219.9	8.96	0.0158
var1	3842439.7	2	1921219.9	8.96	0.0158
Residual	1286404.1	6	214400.69		
Total	5128843.8	8	641105.48		

. predict erro, residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.93753	0.918	-0.141	0.55617

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.69

Prob > chi2 = 0.4062

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	2960.6667 4113.0000	1152.3333	4.3105*
1 vs 3	2960.6667 2574.9000	385.7667	1.4430
2 vs 3	4113.0000 2574.9000	1538.1000	5.7535*

Para temperatura de 140°C

. anova var4 var1

Number of obs = 9 R-squared = 0.2163
 Root MSE = 456.352 Adj R-squared = -0.0449

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	344956.78	2	172478.39	0.83	0.4813
var1	344956.78	2	172478.39	0.83	0.4813
Residual	1249542.1	6	208257.02		
Total	1594498.9	8	199312.36		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.91645	1.228	0.349	0.36367

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.00

Prob > chi2 = 0.9574

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	2964.3333 2878.9333	85.4001	0.3241
1 vs 3	2964.3333 3330.3000	365.9667	1.3890
2 vs 3	2878.9333 3330.3000	451.3668	1.7131

Para temperatura de 150°C

```
. anova var5 var1
```

```
Number of obs =          9    R-squared      = 0.8355
Root MSE      = 239.174    Adj R-squared = 0.7806
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	1742919.9	2	871459.95	15.23	0.0045
var1	1742919.9	2	871459.95	15.23	0.0045
Residual	343224.55	6	57204.091		
Total	2086144.4	8	260768.06		

```
. predict erro,residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.86827	1.935	1.186	0.11781

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 2.10

Prob > chi2 = 0.1470

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	2676.6333 3683.7000	1007.0667	7.2930*
1 vs 3	2676.6333 2847.2667	170.6334	1.2357
2 vs 3	3683.7000 2847.2667	836.4333	6.0573*

Influência da região do lenho na densidade

Para temperatura de 120°C

```
. anova var2 var1
```

```
Number of obs =          9      R-squared      = 0.5751
Root MSE      =    .039847      Adj R-squared = 0.4335
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.01289606	2	.00644803	4.06	0.0767
var1	.01289606	2	.00644803	4.06	0.0767
Residual	.00952661	6	.00158777		
Total	.02242267	8	.00280283		

```
. predict erro,residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.91653	1.226	0.347	0.36430

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance
Variables: erro

```
chi2(1)      =      3.62
Prob > chi2  =      0.0572
```

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1
studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9311 0.9094	0.0217	0.9427
1 vs 3	0.9311 0.9983	0.0672	2.9223
2 vs 3	0.9094 0.9983	0.0889	3.8650*

Para temperatura de 130°C

. anova var3 var1

Number of obs = 9 R-squared = 0.2350
 Root MSE = .039509 Adj R-squared = -0.0201

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.00287634	2	.00143817	0.92	0.4478
var1	.00287634	2	.00143817	0.92	0.4478
Residual	.00936598	6	.001561		
Total	.01224232	8	.00153029		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.86732	1.949	1.200	0.11507

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.01

Prob > chi2 = 0.9194

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1
 studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9693 0.9288	0.0405	1.7752
1 vs 3	0.9693 0.9346	0.0347	1.5203
2 vs 3	0.9288 0.9346	0.0058	0.2549

Para temperatura de 140°C

. anova var4 var1

Number of obs = 9 R-squared = 0.8359
 Root MSE = .029171 Adj R-squared = 0.7812

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.02600629	2	.01300314	15.28	0.0044
var1	.02600629	2	.01300314	15.28	0.0044
Residual	.0051057	6	.00085095		
Total	.03111199	8	.003889		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.93383	0.972	-0.047	0.51861

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 3.09

Prob > chi2 = 0.0786

. fhcomp var1 var1

too many variables specified

r(103);

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9831 0.8664	0.1167	6.9285*
1 vs 3	0.9831 0.9775	0.0055	0.3275
2 vs 3	0.8664 0.9775	0.1112	6.6010*

Para temperatura de 150°C

. anova var5 var1

Number of obs = 9 R-squared = 0.7149
 Root MSE = .022795 Adj R-squared = 0.6199

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.00781966	2	.00390983	7.52	0.0232
var1	.00781966	2	.00390983	7.52	0.0232
Residual	.00311776	6	.00051963		
Total	.01093743	8	.00136718		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	9	0.94155	0.859	-0.249	0.59834

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.01

Prob > chi2 = 0.9082

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 2, 6) = 3.4604559

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9737 0.9099	0.0638	4.8463*
1 vs 3	0.9737 0.9125	0.0612	4.6498*
2 vs 3	0.9099 0.9125	0.0026	0.1964

Influência do tempo de compactação na densidade

Para temperatura de 120°C

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	.9843442	.0127646	
2	.9310559	.0127646	

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	.9843442	.0127646	.9489041	1.019784
2	.9310559	.0127646	.8956158	.966496

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	-.0532883	.0180518	-2.95	0.042

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	-.0532883	.0180518	-.1034082	-.0031684

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	-.0532883	.0180518	-2.95	0.042	-.1034082	-.0031684

Para temperatura de 130°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.1997
 Root MSE = .032116 Adj R-squared = -0.0004

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.00102932	1	.00102932	1.00	0.3743
var1	.00102932	1	.00102932	1.00	0.3743
Residual	.00412583	4	.00103146		
Total	.00515514	5	.00103103		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	.9430899	.0185424	A
2	.9692855	.0185424	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	.9430899	.0185424	.8916081	.9945718
2	.9692855	.0185424	.9178037	1.020767

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t	P> t
var1				
2 vs 1	.0261956	.0262229	1.00	0.374

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	.0261956	.0262229	-.0466107	.0990019

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t	P> t	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	.0261956	.0262229	1.00	0.374	-.0466107	.0990019

.

Para temperatura de 140°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.0505
 Root MSE = .03356 Adj R-squared = -0.1869

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.0002395	1	.0002395	0.21	0.6687
var1	.0002395	1	.0002395	0.21	0.6687
Residual	.00450522	4	.0011263		
Total	.00474471	5	.00094894		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	.970417	.0193761	A
2	.9830528	.0193761	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	.970417	.0193761	.9166202	1.024214
2	.9830528	.0193761	.9292561	1.03685

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	.0126358	.027402	0.46	0.669

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	.0126358	.027402	-.0634443	.088716

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	.0126358	.027402	0.46	0.669	-.0634443	.088716

Para temperatura de 150°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.6969
 Root MSE = .037301 Adj R-squared = 0.6212

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.01279902	1	.01279902	9.20	0.0387
var1	.01279902	1	.01279902	9.20	0.0387
Residual	.00556537	4	.00139134		
Total	.01836439	5	.00367288		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	.8813237	.0215356	
2	.9736962	.0215356	

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	.8813237	.0215356	.8215314	.9411116
2	.9736962	.0215356	.9139039	1.033489

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	.0923725	.0304559	3.03	0.039

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	.0923725	.0304559	.0078134	.1769316

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	.0923725	.0304559	3.03	0.039	.0078134	.1769316

.

Influência do tempo de compactação na carga máxima

Para temperatura de 120°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.6260
 Root MSE = 343.219 Adj R-squared = 0.5325

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	788727.63	1	788727.63	6.70	0.0608
var1	788727.63	1	788727.63	6.70	0.0608
Residual	471197.36	4	117799.34		
Total	1259925	5	251985		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	3141.167	198.1576	A
2	2416.033	198.1576	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	3141.167	198.1576	2590.993	3691.34
2	2416.033	198.1576	1865.86	2966.207

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	-725.1334	280.2372	-2.59	0.061

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	-725.1334	280.2372	-1503.197	52.92984

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	-725.1334	280.2372	-2.59	0.061	-1503.197	52.92984

Para temperatura de 130°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.2121
 Root MSE = 357.323 Adj R-squared = 0.0152

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	137501.5	1	137501.5	1.08	0.3580
var1	137501.5	1	137501.5	1.08	0.3580
Residual	510718.25	4	127679.56		
Total	648219.74	5	129643.95		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	2657.9	206.3004	A
2	2960.667	206.3004	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	2657.9	206.3004	2085.118	3230.682
2	2960.667	206.3004	2387.885	3533.448

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	302.7667	291.7528	1.04	0.358

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	302.7667	291.7528	-507.269	1112.802

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	302.7667	291.7528	1.04	0.358	-507.269	1112.802

.

Para temperatura de 140°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.0445
 Root MSE = 473.452 Adj R-squared = -0.1943

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	41800.115	1	41800.115	0.19	0.6881
var1	41800.115	1	41800.115	0.19	0.6881
Residual	896627.88	4	224156.97		
Total	938428	5	187685.6		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	2797.4	273.3477	A
2	2964.333	273.3477	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	2797.4	273.3477	2038.465	3556.335
2	2964.333	273.3477	2205.398	3723.268

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	166.9333	386.5721	0.43	0.688

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	166.9333	386.5721	-906.3628	1240.23

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	166.9333	386.5721	0.43	0.688	-906.3628	1240.23

.

Para temperatura de 150°C

. anova var2 var1

Number of obs = 6 R-squared = 0.2315
 Root MSE = 254.631 Adj R-squared = 0.0394

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	78135.615	1	78135.615	1.21	0.3339
var1	78135.615	1	78135.615	1.21	0.3339
Residual	259347.96	4	64836.991		
Total	337483.58	5	67496.716		

. pwcompare var1, mcompare(tukey) cieffects pveffects effects cimargins groups

Pairwise comparisons of marginal linear predictions

Margins : asbalanced

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Margin	Std. Err.	Unadjusted Groups
var1			
1	2448.4	147.0113	A
2	2676.633	147.0113	A

Note: Margins sharing a letter in the group label are not significantly different at the 5% level.

	Margin	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
1	2448.4	147.0113	2040.231	2856.569
2	2676.633	147.0113	2268.464	3084.802

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t	
var1				
2 vs 1	228.2332	207.9054	1.10	0.334

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1				
2 vs 1	228.2332	207.9054	-349.0047	805.4712

note: option tukey ignored since there is only one comparison

	Contrast	Std. Err.	Unadjusted t P> t		Unadjusted [95% Conf. Interval]	
var1						
2 vs 1	228.2332	207.9054	1.10	0.334	-349.0047	805.4712

.

Influência da temperatura de compactação na densidade

Para cerne

```
. anova var3 var1
```

```
Number of obs =      12    R-squared      = 0.3512
Root MSE      =    .03298    Adj R-squared = 0.1079
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.00470994	3	.00156998	1.44	0.3007
var1	.00470994	3	.00156998	1.44	0.3007
Residual	.00870122	8	.00108765		
Total	.01341116	11	.0012192		

```
. predict erro, residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.96773	0.539	-1.203	0.88559

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.70

Prob > chi2 = 0.4021

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9311 0.9693	0.0382	2.0078
1 vs 3	0.9311 0.9831	0.0520	2.7308
1 vs 4	0.9311 0.9737	0.0426	2.2394
2 vs 3	0.9693 0.9831	0.0138	0.7230
2 vs 4	0.9693 0.9737	0.0044	0.2316
3 vs 4	0.9831 0.9737	0.0094	0.4914

Para borne

. anova var3 var1

Number of obs = 12 R-squared = 0.3339
 Root MSE = .039583 Adj R-squared = 0.0841

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.0062828	3	.00209427	1.34	0.3291
var1	.0062828	3	.00209427	1.34	0.3291
Residual	.0125348	8	.00156685		
Total	.0188176	11	.00171069		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.93106	1.152	0.275	0.39149

. hetttest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 2.99

Prob > chi2 = 0.0840

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9094 0.9288	0.0194	0.8498
1 vs 3	0.9094 0.8664	0.0430	1.8818
1 vs 4	0.9094 0.9099	0.0005	0.0239
2 vs 3	0.9288 0.8664	0.0624	2.7316
2 vs 4	0.9288 0.9099	0.0189	0.8260
3 vs 4	0.8664 0.9099	0.0436	1.9057

Para cerne + borne

. anova var3 var1

Number of obs = 12 R-squared = 0.7013
 Root MSE = .027111 Adj R-squared = 0.5893

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	.01380464	3	.00460155	6.26	0.0171
var1	.01380464	3	.00460155	6.26	0.0171
Residual	.00588003	8	.000735		
Total	.01968467	11	.00178952		

. predict erro,residual

. swilk erro

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.98143	0.310	-2.281	0.98871

. hettest erro

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.33

Prob > chi2 = 0.5681

. fhcomp var1

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	0.9983 0.9346	0.0637	4.0683*
1 vs 3	0.9983 0.9775	0.0207	1.3255
1 vs 4	0.9983 0.9125	0.0858	5.4806*
2 vs 3	0.9346 0.9775	0.0429	2.7428
2 vs 4	0.9346 0.9125	0.0221	1.4122
3 vs 4	0.9775 0.9125	0.0650	4.1551*

.

Influência da temperatura de compactação na carga máxima

Para cerne

```
. anova var3 var1
```

```
Number of obs =      12    R-squared      = 0.2797
Root MSE      = 447.225    Adj R-squared = 0.0097
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	621472.9	3	207157.63	1.04	0.4273
var1	621472.9	3	207157.63	1.04	0.4273
Residual	1600081	8	200010.13		
Total	2221553.9	11	201959.45		

```
. predict erro,residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.96574	0.572	-1.087	0.86143

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.01

Prob > chi2 = 0.9419

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	2416.0333 2960.6667	544.6334	2.1093
1 vs 3	2416.0333 2964.3333	548.3000	2.1235
1 vs 4	2416.0333 2676.6333	260.6000	1.0093
2 vs 3	2960.6667 2964.3333	3.6667	0.0142
2 vs 4	2960.6667 2676.6333	284.0334	1.1000
3 vs 4	2964.3333 2676.6333	287.7000	1.1142

Para borne

```
. anova var3 var1
```

```
Number of obs =      12    R-squared      = 0.6371
Root MSE      =    418.19  Adj R-squared = 0.5010
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	2456204.8	3	818734.95	4.68	0.0359
var1	2456204.8	3	818734.95	4.68	0.0359
Residual	1399062.2	8	174882.78		
Total	3855267.1	11	350478.83		

```
. predict erro, residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.95804	0.701	-0.692	0.75553

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 3.12

Prob > chi2 = 0.0774

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1
studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	3770.7667 4113.0000	342.2333	1.4175
1 vs 3	3770.7667 2878.9333	891.8334	3.6938
1 vs 4	3770.7667 3683.7000	87.0667	0.3606
2 vs 3	4113.0000 2878.9333	1234.0667	5.1112*
2 vs 4	4113.0000 3683.7000	429.3000	1.7781
3 vs 4	2878.9333 3683.7000	804.7668	3.3332

Para cerne + borne

```
. anova var3 var1
```

```
Number of obs =      12    R-squared      = 0.4429
Root MSE      = 422.851    Adj R-squared = 0.2340
```

Source	Partial SS	df	MS	F	Prob>F
Model	1137079.5	3	379026.49	2.12	0.1760
var1	1137079.5	3	379026.49	2.12	0.1760
Residual	1430421.5	8	178802.69		
Total	2567501	11	233409.18		

```
. predict erro,residual
```

```
. swilk erro
```

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
erro	12	0.95879	0.689	-0.727	0.76639

```
. hettest erro
```

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: erro

chi2(1) = 0.60

Prob > chi2 = 0.4402

```
. fhcomp var1
```

Fisher-Hayter pairwise comparisons for variable var1

studentized range critical value(.05, 3, 8) = 4.0406505

grp vs grp	group means	mean dif	FH-test
1 vs 2	3256.7334 2574.9000	681.8334	2.7929
1 vs 3	3256.7334 3330.3000	73.5667	0.3013
1 vs 4	3256.7334 2847.2667	409.4667	1.6772
2 vs 3	2574.9000 3330.3000	755.4001	3.0942
2 vs 4	2574.9000 2847.2667	272.3667	1.1156
3 vs 4	3330.3000 2847.2667	483.0334	1.9786

```
.
```