



Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Química
Licenciatura em Engenharia do Ambiente

Trabalho de licenciatura

Avaliação dos Briquetes Produzidos a partir de Resíduos de Processamento de Algodão provenientes da *Mozambique Cotton Manufactures (MCM)*



Autor:

Elton Rogério Cote

Supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng^o

Co-supervisor

Mestre Leila Paruque Jossias, Eng^a

Maputo, Agosto de 2024

Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Química
Licenciatura em Engenharia do Ambiente

Trabalho de licenciatura

Avaliação dos Briquetes Produzidos a partir de Resíduos de Processamento de Algodão provenientes da *Mozambique Cotton Manufactures (MCM)*



Autor:

Elton Rogério Cote

Supervisor:

Doutor Adolfo Condo, Eng^o

Co-supervisor

Mestre Leila Paruque Jossias, Eng^a

Chefe do departamento

Prof. Doutor Clemencio Nhamtumbo, Eng^o

Maputo, Agosto de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Elton Rogério Cote entregou as _____ cópias do seu trabalho de licenciatura em Engenharia do ambiente no dia ____/____/_____, cujo tema é:

Avaliação dos Briquetes Produzidos a partir de Resíduos de Processamento de Algodão provenientes da *Mozambique Cotton Manufactures* (MCM)

Maputo, Agosto de 2024

O Chefe de secretaria

DECLARAÇÃO SOBRE A PALAVRA DE HONRA

Eu, Elton Rogério Cote, declaro que o presente trabalho foi realizado inteiramente por mim, na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, no Departamento de Engenharia Química, no âmbito da conclusão do curso de Licenciatura em Engenharia do Ambiente, e que todas as fontes usadas foram devidamente citadas.

Maputo, _____ de _____ de 20_____

(Elton Rogério Cote)

AGRADECIMENTOS

Em primeiríssimo lugar agradeço a Deus pela graça que Deus tem-me concedido, pelo seu favor na minha vida, pela força que me tem dado dia após dia e especialmente em toda essa caminhada que foi longa e que só foi possível porque a mão de Deus esteve comigo, a Ele toda honra e glória pela concretização desse trabalho.

Quero agradecer em especial os meus pais, uau!, foram o meu grande suporte para a concretização deste grande sonho, ao meu pai Rogério Alberto Cote por ter investido incansavelmente nos meus estudos e pelos sacrifícios que ele fez pra que eu não parasse de estudar, igualmente agradecer a minha mãe Vitória Artur Tomás por me mimar, não me deixava descansar sem comer, fazia de tudo para que eu tivesse um ambiente favorável para estudar, agradeço muito mais pelas orações e intercessões dela, uma palavra que ela sempre dizia é “*vamos orar tudo vai dar certo*” e tudo no final deu certo.

Agradecer aos meus irmãos, meu irmão mais velho Alberto Rogério Cote e o meu irmão mais novo Euler Rogério Cote pelo suporte, apoio e momentos de alegria proporcionados para que eu continuasse motivado e alegre nos estudos, aliviando assim a tensão nos meus dias.

Um agradecimento especial vai para a Team Work + Cote, que são colegas que faziam parte do meu grupo de estudos, nomeadamente Nádia Arcanjo, Jéssica Gemo, Jéssica Langa, Leonésia Pelembe, Salustiana Jasse, por proporcionarem momentos de estudos alegres e objectivos, tendo aprendido muito com cada um deles, agradecer em especial a Anilza Vasco Muriane por tudo.

Agradecer aos meus supervisores, Prof. Doutor Eng.^o Adolfo Condo, e a Eng^a. Leila Parruque Jossias, pelo apoio dado, pelo tempo dispensado, por aceitar supervisionar este trabalho, dando cada um o melhor de si para que fosse possível adquirir bases para avançar, clarificando todas dúvidas, agradecer por todos ensinamentos transmitidos, correcções, sugestões, paciência e participação como se fosse deles, muito obrigado.

Agradecer a Industria Têxteis MCM (Mozambique Cotton Manufactures), por ter aberto as portas para que tivesse acesso aos resíduos, pelo esclarecimento de quase todos os procedimentos de processamento da fábrica, agradecendo o Eng.^o

Agostinho, O Mário da sala de operações, que muito me ajudou, me dando suporte em todas necessidades que tive no processo de recolha de matéria-prima.

Agradecer a colega de trabalho de Licenciatura Jéssica Ussumane Taquidir – da Engenharia Química, não teria conseguido a maior parte do trabalho sem a ajuda dela, foi um grande suporte no que concerne a toda fase laboratorial, ao Yunus também da Engenharia química pelo apoio, amigo da reta final, mas de grande valia para mim.

Agradecer a BECT, laboratório que nos permitiu fazer os testes de fervura, emissões, e índice de combustão, agradecer ao Bonga do BECT e em especial o técnico do BECT o Sr Afonso, a ele sou grato por ensinar tudo como se fossemos crianças, pela paciência, carinho, amor pelo seu trabalho e por nos ajudar, tivemos dias de trabalho cansativos mas de muita alegria e de muito aprendizado, o meu muito obrigado.

Agradecer ao meu amigo e irmão Éden Eusébio Simeão, pelas vigílias de estudos, amigo para vida, presente em todas as fases e momentos da minha vida, thanks, agradecer ao Clóves Chitambu, Carla Chitambu pelo apoio, agradecer aos irmão, amigos, colegas, todos que fizeram parte nessa caminhada directa ou indirectamente, agradecer a Julieta Cossa pelo apoio e suporte, a colega Neima Tovela, Mércia Nhatitima, e Santos Ugembe.

Muito obrigado a Todos.

Resumo

O presente trabalho teve como objectivo avaliar a qualidade dos briquetes produzidos a partir dos resíduos gerados durante o processamento de algodão na Mozambique Cotton Manufactures (MCM), uma indústria de Têxteis localizada no distrito de Marracuene na província de Maputo. Inicialmente os resíduos (semente, cascas e fios de algodão) recolhidos na *Mozambique Cotton Manufactures* foram submetidos a testes de análise granulométrica, densidade a granel, teor de cinzas, teor de voláteis e teor de carbono fixo. De seguida foram produzidos briquetes carbonizados e não carbonizados a uma pressão de 10 MPa, temperatura de 150°C, e granulometria de 0.075 a 1 mm. Os briquetes foram submetidos a testes de estabilidade dimensional, densidade aparente e energética, friabilidade, índice de combustão e de fervura.

Os resultados obtidos para os resíduos e briquetes não carbonizados foram de 648.08 kg/m³ para densidade a granel, 12.92% para TCF, 12.83% para PCS, 0.05% para expansão, 12,835.20 MJ/m³ para densidade energética, 0.75% para friabilidade, 0.4629 para ICOM e 700°C de temperatura máxima. Para os resíduos e briquetes carbonizados os resultados foram de 559.56 kg/m³ para a densidade a granel, 19.64% para TCF, 14.17% para PCS, 0.2% para expansão, 12,408.40 MJ/m³ para densidade energética, 3.18% para friabilidade, 0.4756 para ICOM e 811°C de temperatura máxima atingida. Estes valores indicam que os melhores resultados foram obtidos para os resíduos e briquetes carbonizados.

Palavras-chave: Biocombustíveis, Briquete carbonizado e não carbonizado, resíduo de algodão.

Abstract

The present work aimed to evaluate the quality of briquettes produced from waste generated during cotton processing at Mozambique Cotton Manufactures (MCM), a textile industry located in the district of Marracuene in the province of Maputo. Initially, the waste (seeds, husks and cotton threads) collected at Mozambique Cotton Manufactures, were subjected to particle size analysis, bulk density, ash content, volatile content and fixed carbon content tests. Carbonized and non-carbonized briquettes were then produced at a pressure of 10 MPa, a temperature of 150°C, and a grain size of 0.075 to 1 mm. The briquettes were subjected to tests for dimensional stability, apparent and energy density, friability, index of combustion and water boiling test.

The results obtained for non-carbonized waste and briquettes were 648.08 kg/m³ for bulk density, 12.92% for TCF, 12.83% for PCS, 0.05% for expansion, 12,835.20 MJ/m³ for energy density, 0.75% for friability, 0.4629 for ICOM and 700°C maximum temperature. For carbonized waste and briquettes the results were 559.56 kg/m³ for bulk density, 19.64% for TCF, 14.17% for PCS, 0.2% for expansion, 12,408.40 MJ/m³ for energy density, 3.18% for friability, 0.4756 for ICOM and 811°C maximum temperature reached. These values indicate that the best results were obtained for charred residues and briquettes.

Keywords: Biofuels, Carbonized and non-carbonized briquette, cotton waste.

Lista abreviaturas

ASTM	American Society For Testing Materials
ICOM	Índice de combustão
MCM	<i>Mozambique Cotton Manufactures</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
RS	Resíduos Sólidos
RH	Humidade relativa
Kgf	Quilograma força
Tf	Tonelada força
Rpm	Rotações por minuto
TC	Teor de cinzas
TCF	Teor de carbono fixo
TH	Teor de humidade
TV	Teor de voláteis
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
Ppm	Partes por milhões
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
MP ou PM	Material particulado
TLV-TWA	<i>Threshold Limit Value- The Weighted Average</i>
TLV-STEL	<i>Threshold limit Value – Short Term Expesure Limit</i>
TLV-C	<i>Threshold Limit Value – Ceiling</i>

Glossário

Cold Star	Partida a frio
Hot Start	Partida a quente
Simmer	Fervura
Pot temp	Temperatura da panela
TLV-C	Concentrações que não podem ser excedidas durante qualquer período de exposição
TLV-STEL	Concentrações em que o trabalhador pode ser exposto continuamente por um curto período de tempo quando exposto a altas concentrações sem que crie irritações ou danos crónicos na sua saúde
TLV-TWA	Concentrações em qual o trabalhador fica exposto 8 horas por dia sem sofrer efeitos adversos

Lista de figuras

Figura 1- Indústria Têxteis Mozambique Cotton Manufactures	11
Figura 2 - Separação das fibras das sementes de algodão	11
Figura 3- Procedimentos para a produção dos briquetes.....	12
Figura 4- Analisador de humidade	13
Figura 5- Moagem da biomassa.....	14
Figura 6- Peneiração no peneirador vibratório	14
Figura 7 - Biomassa no reactor, mufla para a carbonização	15
Figura 8- Cadinhos de níquel retirados da mufla	18
Figura 9 - a) Molde cilíndrico e b) prensa laboratorial	21
Figura 10- Moinho de bolas, ou tambor rotativo	23
Figura 11- Equipamento utilizado para os ensaios de índice de combustão.....	25
Figura 12- Medição da panela, água, fogão e combustível.....	27
Figura 13- Equipamentos para o teste de fervura e emissões	27
Figura 14- Figura padrão do WBT.....	28
Figura 15 - Briquetes não carbonizados produzidos com a humidade in nature	31
Figura 16 - Briquetes carbonizados e não carbonizados na humidade ideal	32
Figura 17- Distribuição granulométrica.....	33
Figura 18 - Massa da biomassa após a carbonização	34
Figura 19- Expansão dos briquetes dos resíduos de processamento de algodão	40
Figura 20 - Resultados do teste de friabilidade	42
Figura 21 - Gráfico da temperatura x tempo	44
Figura 22- Consumo da massa durante a combustão	45
Figura 23- Emissões de CO ₂ e CO durante a queima de carvão	48
Figura 24 - Emissões de CO ₂ e CO durante a queima do briquete carbonizado.....	49
Figura 25 - Emissões de CO ₂ e CO durante a queima do briquete não carbonizado... ..	49
Figura 26- Emissões de CO ₂ e CO durante a queima da lenha	50
Figura 27 - Fervura e material particulado do carvão.....	52
Figura 28 - Fervura e material particulado do briquete Carbonizado	53
Figura 29 - Fervura e material particulado do briquete não carbonizado	53
Figura 30 - Fervura e material particulado da lenha.....	54

Lista de tabelas

Tabela 1 - Quadro comparativo entre briquete e lenha	7
Tabela 2 - humidade da amostra antes e depois da carbonização	30
Tabela 3- Densidade a granel.....	34
Tabela 4 - Teores de cinza, teores de materiais voláteis e teores de carbono fixo	35
Tabela 5- Poderes caloríficos, PCS, PCI, PCU.....	38
Tabela 6- Densidade a granel, densidade aparente dos resíduos e dos briquetes.....	40
Tabela 7- Índice de combustão (ICOM)	43

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Objectivos	3
1.4. Metodologia.....	4
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1. Resíduos sólidos.....	5
2.2. Resíduos Lignocelulósicos.....	6
2.3. Biomassa para geração de energia	6
2.4. Briquetes.....	6
2.5. Preparação e caracterização da matéria-prima para a produção dos briquetes	8
2.6. Caracterização dos briquetes.....	9
3. PARTE EXPERIMENTAL	11
3.1. Descrição do local e recolha da amostra	11
3.2. Procedimentos experimentais	12
3.3. Caracterização inicial e preparação da amostra	12
3.3.1. Determinação de humidade da amostra.....	13
3.3.2. Moagem.....	13
3.3.3. Peneiração	14
3.3.4. Carbonização	14
3.4. Caracterização física, química e térmica da amostra.....	15
3.4.1. Caracterização física	15
3.4.1.1. Análise granulometria.....	16
3.4.1.2. Densidade a granel	16
3.4.2. Características químicas – análise imediata.....	16
3.4.2.1. Teor de cinzas.....	16
3.4.2.2. Teor de voláteis.....	17
3.4.2.3. Teor de carbono fixo	18
3.5. Características térmicas.....	19

3.5.1. Poder calorífico.....	19
3.6. Produção de briquetes: briquetagem	20
3.7. Características físicas, mecânicas e térmicas dos briquetes	21
3.7.1. Características físicas.....	21
3.7.1.1. Estabilidade dimensional.....	21
3.7.1.2. Densidade aparente	22
3.7.2. Características mecânicas.....	22
3.7.2.1. Friabilidade.....	22
3.7.3. Características térmicas dos briquetes.....	23
3.7.3.1. Densidade energética	24
3.7.3.2. Índice de combustão	24
3.8. Teste de fervura e emissões	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1. Características físicas da amostra	30
4.1.1. Determinação da Humidade da amostra	30
4.1.2. Resultado da análise granulométrica	32
4.1.3. Resultados da Carbonização.....	33
4.1.4. Densidade a granel	34
4.2. Características químicas – análise química imediata da amostra.....	35
4.2.1. Teor de cinzas	36
4.2.2. Teor de Voláteis	36
4.2.3. Teor de carbono fixo.....	37
4.3. Características térmicas da amostra.....	38
4.3.1. Poder calorífico.....	38
4.4. Características físicas, térmicas e mecânicas dos briquetes	39
4.4.1. Estabilidade dimensional.....	39
4.4.2. Densidade aparente e energética	40
4.4.3. Friabilidade	42
4.5. Índice de Combustão	43
4.6. Teste de fervura	47
4.7. Emissões.....	48

4.7.1. Emissões de <i>CO2 e CO</i>	48
4.7.2. Emissões de material particulado PM	52
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS.....	62

CAPITULO – I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Após a revolução industrial, as indústrias preocupavam-se apenas com a eficiência dos processos produtivos, não se importando com os resíduos produzidos assim como os impactos que esses processos têm causado ao meio ambiente, e isso fez com que os resíduos fossem descartados sem nenhum tratamento e processo de gestão. A falta de gestão e tratamento de resíduos industriais têm influenciado na contaminação das três matrizes, a água, solo e ar. A gestão de resíduos tem como principal meta a redução da geração de resíduos e trazer soluções para reintrodução desses materiais na cadeia produtiva (GUIA, 2015) *apud* (ARENDARTCHUK, 2021).

Os resíduos agro-industriais podem ser utilizados como fonte de energia e aproveitados na produção de biocombustíveis sólidos. A compactação dos resíduos é uma das formas eficientes para concentrar a energia disponível da biomassa, pois adensa os resíduos da biomassa em uma forma definida, convertendo-a em um material de maior valor comercial denominado briquete. Os briquetes surgiram como alternativa ao uso da lenha, e podem ser utilizados para a alimentação de caldeiras em processos industriais e existem estudos que inclusive visam a inserção destes biocombustíveis em sistemas de aquecimento doméstico (DE SOUSA, PIMENTA, & DA COSTA, 2017).

Os briquetes apresentam muitas vantagens em comparação com a lenha, dentre elas destacam-se: O briquete apresenta densidade energética que pode ser três vezes maior que o da lenha, maior temperatura da chama, fácil transporte e manuseio e devido a baixa humidade produz menos cinzas e fuligem em comparação com a lenha (QUIRINO & BRITO, 1991).

Alguns factores que influenciam na produção e na qualidade dos briquetes são a densidade, a humidade e a dimensão dos resíduos. Quanto mais denso o briquete, maior a

agregação das partículas e mais resistente o produto final, o que facilita a sua armazenagem e transporte. O teor de humidade influencia de forma negativa na queima da biomassa vegetal, pois reduz a quantidade de energia que seria gerada durante a combustão (FERNANDEZ, et al., 2016). Os briquetes confeccionados a partir da biomassa com menor dimensão de partículas (menor granulometria) mostram-se mais resistentes que aqueles produzidos com partículas com maiores dimensões (DE SOUSA & DO VALE, 2016). Durante o estudo dos parâmetros da biomassa o poder energético é o que mais tem movido vários estudos voltados a produção de briquetes.

Após a visita numa das maiores indústrias têxteis de Moçambique, a MCM, concluiu-se que existe uma oportunidade em usar os conhecimentos de engenharia para a gestão dos resíduos produzidos no processamento de algodão que consiste no reaproveitamento da biomassa como matéria-prima para a produção de energia sustentável.

De modo geral a principal pergunta de pesquisa desse trabalho é de saber quais são as características dos briquetes produzidos através dos resíduos do processamento de algodão, e com isso saber se pode ser uma medida de gestão dos resíduos da MCM.

.O trabalho foi feito em duas etapas, a primeira etapa consistiu na recolha das amostras na MCM, e a segunda etapa consistiu na produção e análise dos briquetes.

1.2. Justificativa

A indústria Mozambique Cotton Manufacturs (MCM) produz cerca de 600kg de resíduos por dia. Além disso, resíduos produzidos não têm uma gestão ambiental adequado e sustentável, uma pequena parte dos resíduos são oferecidos aos agricultores locais que têm usado como adubos para fertilizar o solo e a maior parte tem sido queimado depois de ter sido armazenado por longo período, sendo que estes resíduos podem ser utilizados como fonte de energia alternativa, e assim reduzir o nível de desmatamento para produção do carvão vegetal, e também pode gerar mais emprego para todos os que reaproveirarem estes resíduos para produção de biocombustíveis, por isso, surge a necessidade de usar os conhecimentos adquiridos de engenharia para produzir briquetes usando os resíduos do processamento de algodão e poder dar um destino final adequado e sustentável.

Para os resíduos de processamento de algodão em estudo, objectiva-se encontrar alternativas sustentáveis para o seu reaproveitamento como fonte de energia, podendo ser para exportação ou produção de combustível sólido (briquete ou palete) para uso em uma caldeira industrial ou satisfação de outras necessidades energéticas.

Por outro lado, os briquetes possuem um elevado potencial para substituir a lenha que tem gerado grandes impactos ao meio ambiente durante a sua queima ou pelo abate de árvores para obtenção da mesma, e dependendo do seu poder calorífico pode até substituir o uso de carvão vegetal ou artificial em algumas zonas e assim reduzir os gases de efeito estufa (GEE).

1.3. Objectivos

Este trabalho tem como objectivo geral:

- Avaliar a qualidade dos briquetes produzidos a partir de resíduos gerados no processamento de algodão;

E como objectivos específicos:

- Caracterizar os resíduos do processamento do algodão;

- Analisar os parâmetros de produção dos briquetes
- Determinar as características físico-químicas, mecânicas e térmicas dos briquetes produzidos;

1.4. Metodologia

Para a elaboração deste trabalho obedece-se a seguinte metodologia:

- Visita de campo: para identificação do problema de pesquisa e recolha das amostras, as quais devem ser conservadas num lugar seco e com boa ventilação.
- Pesquisa bibliográfica: para a recolha de informações que ajudem na melhor compreensão, confrontação de resultados e desenvolvimento de um trabalho de qualidade, recorrendo a artigos científicos, pesquisa web, trabalhos de licenciatura, dissertações de mestrado, etc.
- Parte experimental: experiências laboratoriais.
- Análise, discussão dos resultados e organização do relatório.

CAPITULO – II- REVISÃO DA LITERATURA

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Resíduos sólidos

Segundo o Decreto 13/2006, relativo a resíduos sólidos são considerados como substâncias ou objectos que se eliminam, ou é de carácter obrigatório a sua eliminação segundo uma lei específica, também designados por lixo. (República de Moçambique, Conselho de Ministros, 2006)

Os resíduos sólidos (RS) de naturezas diversas constituem, nos dias atuais, um dos maiores problemas para o meio ambiente e à sociedade em geral. Os resíduos contaminam o solo e a água, a sua queima polui o ar e ainda favorecem a proliferação de insectos e outros animais que podem ser vectores de doenças. (DA SILVA, DA SILVA SANTOS, SILVA, & BERRÊDO, 2015)

Na legislação Moçambicana a gestão de resíduos compreende todos os procedimentos viáveis com vista a assegurar uma gestão ambientalmente segura, sustentável e racional dos resíduos, tendo em conta a necessidade da sua redução, reciclagem e reutilização, incluindo a separação, recolha, manuseamento, transporte, armazenagem e ou eliminação de resíduos bem como a posterior protecção dos locais de eliminação, por forma a proteger a saúde humana e o ambiente contra os efeitos nocivos que possam advir dos mesmos. Tendo como base a prevenção, redução, reutilização, reciclagem, e a valorização energética e orgânica, os materiais que antes eram residuais, em vez de serem automaticamente enviados para o lixo, passam a ser percebidos como suprimento de matéria-prima, e portanto, fontes úteis de material e energia para outros processos e produtos industriais. Hoje a tendência mundial, em especial nos países altamente industrializados, está baseada no seguinte (prevenção, redução, reutilização, reciclagem, Valorização energética e orgânica. (ARENDARTCHUK, 2021).

2.2. Resíduos Lignocelulósicos

De acordo com a (PAULA, 2010) *apud* (BATISTA, 2017), resíduos lignocelulósicos são todos aqueles que apresentam, principalmente, lignina e celulose em sua constituição. Estes resíduos podem ser gerados a partir do processamento da madeira, de culturas florestais, actividades agrícolas, agro-industriais, além dos gerados em actividades urbanas, como na capina e podas das árvores.

O aproveitamento do resíduo de algodão é de imenso valor para preservação ambiental, devido a redução do volume do lixo depositado no meio ambiente, à redução da poluição atmosférica e à utilização como matéria-prima para o desenvolvimento de novos produtos. Os resíduos de processamento de algodão são de grande valor, pois tanto a fibra como a semente são excelentes materiais orgânicos que podem ser aplicados no solo, na geração de energia renovável. Além disso, a semente pode ser usada na formulação de dietas de bovinos leiteiros e de corte.

2.3. Biomassa para geração de energia

A biomassa é todo material orgânico de origem vegetal derivados de reacções entre o dióxido de carbono, a água e a luz solar, ou seja, do processo da fotossíntese. O alto potencial energético da biomassa pode ser uma das soluções sustentáveis no que diz respeito à utilização de fontes alternativas de energia (VIEIRA, 2012) *apud* (BATISTA, 2017).

A energia contida na biomassa pode ser convertida em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de processos que envolvem conversões químicas, físicas e biológicas. De acordo com Werther *et al.* (2000), as biomassas com alto potencial energético incluem os resíduos agrícolas e os provenientes de actividades florestais.

2.4. Briquetes

Briquetes são produtos compactados de resíduos agro-florestais ou de outra biomassa lignocelulósica, consolidados a partir da acção de temperaturas acima de 120°C e pressão acima de 7,845MPa, formando blocos de forma definida e volume reduzido.

Está técnica, facilita principalmente o armazenamento, transporte e uso da biomassa (KALIYAN e MOREY, 2009) *apud* (DE SOUZA & DO VALE, 2016).

Segundo (GENTIL, 2008) *apud* (TOVARES & SANTOS, 2013), briquete é uma peça sólida de biomassa comprimida com uma carga média de 90 a 140 kgf/cm^2 (8,8260 MPa a 13,7293Mpa), gerando uma temperatura de 170°C a 270°C em uma câmara de briquetagem visando a decomposição parcial da lignina, apresentando teor de humidade de 5 a 15%, sendo o óptimo 8%, podendo ser produzido com ou sem aglutinante. Possui uma densidade entre (1000 a 1500 Kg/m^3) e, apresentando peças cilíndricas ou hexagonais com comprimento entre 7 a 10 cm e diâmetro 10 a 40 cm.

Os briquetes são utilizados como alternativa na geração de energia, substituindo por sua vez, o uso da lenha e evitando o abate de árvores para a produção do carvão vegetal e o uso da lenha. Uma tonelada 1 m^3 de briquete equivale a 7 m^3 de lenha, possuindo alto poder calorífico, que pode ser até três vezes maior que o da lenha, proporcionando economia na utilização do produto em fornos, caldeiras, entre outros (AGE-ITEC, 2007) *apud* (BATISTA, 2017).

A Tabela 1 ilustra as vantagens do briquete em relação a lenha e são apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 1 - Quadro comparativo entre briquete e lenha

Briquete	Lenha
Alto poder calorífico	Baixo poder calorífico
Armazenagem racional paletizada	Grandes áreas para armazenagem
Redução da mão de obra no manuseio	Maior mão de obra
Alta temperatura da chama	Baixa temperatura da chama
Redução de volume na estocagem e no transporte	Sujeira no local de estocagem e no transporte
Menos poluição com mais energia	Baixa uniformidade de calor
Baixo teor de cinzas	Grande quantidade de cinzas
Humidade baixa	Material com alta humidade

Fonte: Biomachine (2006) *apud* (ROCHA, BONDI, LEITE, & PINHEIRO, 2015),

2.5. Preparação e caracterização da matéria-prima para a produção dos briquetes

A matéria-prima usada na produção dos briquetes passa pelos seguintes procedimentos e testes:

2.5.1. Procedimentos

- **Moagem:** realizada com o intuito de reduzir o tamanho de partículas transformando-as num produto final mais homogêneo, onde o tamanho dos sólidos é reduzido mediante a aplicação de forças de impacto (RECH, CAPELARI, BERNARDO, & DE MOLINER, 2017), garantindo que as partículas estejam em melhores condições para a compactação no processo de briquetagem.
- **Peneiração:** permite obter frações de granulometria distintas, resultando em diversidade do tamanho de partículas, incluindo as de maior dimensão.

2.5.2. Testes

- **Carbonização:** definida como um processo de decomposição térmica que a biomassa sofre na ausência ou presença controlada de oxigênio, gerando resíduos sólidos e gases. O objetivo do processo de carbonização é aumentar o teor de carbono fixo por meio do tratamento térmico (BENITES, TEIXEIRA, REZENDE, & PIMENTA).
- **Análise granulométrica:** tem como objetivo classificar a distribuição dos diferentes tamanhos dos grãos e é determinada através da peneiração (RECH, CAPELARI, BERNARDO, & DE MOLINER, 2017).
- **Densidade a granel:** característica muito importante quando se trata de espaço que será ocupado pelo produto, pois quando menor for a massa específica do material, maior será seu volume, resultando em maiores gastos com transporte e armazenamento do produto (SILVA, et al., 2017).
- **Teor de cinzas:** corresponde a substâncias que não entram em combustão, permanecendo na forma sólida, e são indesejáveis para o uso energético (CHAVES, DO VALE, MELIDO, & ZOCH, 2013), uma vez que as cinzas são

compostas de material inorgânico (fósforo, cálcio, e potássio) e têm uma relação inversa com o poder calorífico.

- **Teor de materiais voláteis** está relacionada à reactividade da biomassa que se pretende queimar, isto é, à facilidade que a biomassa tem de atingir a ignição. Quanto maior o seu teor, maior será a sua reactividade, e conseqüentemente, a ignição no processo de combustão para geração de energia, facilitando a queima do material (LOBATO, REIS, DA SILVA, PENISCH, & NAGAISHI, 2017).
- **Teor de carbono fixo:** definido como o carbono que pode sofrer combustão, e esta representa a parte que remanesce após a liberação do teor de cinzas e dos materiais voláteis, BORSATO *et al* (2009) *apud* (COSTA L. R., 2016)
- **Poder calorífico:** representa a quantidade de energia libertada durante a combustão completa de um combustível por unidade de massa ou volume (PEREIRA & SEYE, 2011). Essa pode ser expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI). O PCS indica a quantidade de energia libertada pela combustão de uma unidade de massa em um calorímetro de volume constante com recuperação de toda energia de vaporização da água formada pela combustão. Enquanto que para o PCI, a energia consumida para vaporização da água formada pela combustão é descontada (FRANCESQUETT, DOPKE, DA COSTA, KIPPER, & FERRÃO, 2013). Poder calorífico útil (PCU) representa a quantidade efectiva de energia libertada pela massa ou volume do combustível, pois desconta a energia necessária para a evaporação da água contida no material. (COSTA, OLIVEIRA, FREITAS, LEAL, & PEREIRA, 2017).
- **Briquetagem:** processo mecânico na qual se aplica pressão em uma biomassa dispersa em partículas, visando compactá-la em sólidos com geometria definida (CARNEIRO, et al., 2015).

2.6. Caracterização dos briquetes

Para a caracterização dos briquetes são determinadas as seguintes propriedades:

- **Densidade aparente:** definida como a relação entre a massa total de um material e o seu volume total ocupado por ele, incluindo vazios e poros. Essa medida considera tanto os espaços ocupados pelas partículas sólidas quanto as lacunas

entre elas (IndustriaPedia.net). A densidade aparente tem uma proporção directa com a densidade energética, e para o caso dos briquetes é preciso que haja uma maior densidade energética. A partir da densidade aparente é possível determinar a quantidade de energia ou calor acumulado neste material com volume definido.

- **Densidade energética** (DE) quantidade de calor por unidade de volume ($Gcal/m^3$ ou GJ/m^3), é a propriedade que avalia o desempenho da biomassa como combustível, pois resume as características físicas e químicas (composição química, poder calorífico e cinzas). É definida como o produto entre o poder calorífica e a densidade aparente (Pinheiro et al, 2005) *apud* (DE SOUSA & DO VALE, 2016).
- **Friabilidade:** serve para determinar a resistência do briquete ao desgaste, quando submetidos a uma acção mecânica de aparelhagem específica. Para ser aprovado, nenhum briquete deve ter sido quebrado, apresentar quebras ou rachaduras. (MAGALHÃES, 2022). Saber o quanto o briquete é friável ajuda a prever o que pode acontecer com ele em caso de queda, transporte ou armazenamento.

CAPITULO – III – PARTE EXPERIMENTAL

3. PARTE EXPERIMENTAL

Este capítulo aborda os principais procedimentos empregues na realização do trabalho prático, partindo da colecta da amostra até aos ensaios laboratoriais.

3.1. Descrição do local e recolha da amostra

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi recolhida na indústria têxtil *Mozambique Cotton Manufactures* (MCM). Esta foi fundada em 2012 e está localizada na província de Maputo, distrito de Marracuene, sendo uma das maiores produtoras de fios a partir de algodão em Moçambique.



Figura 1- Indústria Têxteis Mozambique Cotton Manufactures

Os resíduos compostos pela rama, semente, folhas e fibras de algodão, foram colectadas e encaminhados para o Laboratório do Departamento de Engenharia Química, da Faculdade de Engenharia, para a realização das experiências laboratoriais.



Figura 2 – Resíduos de processamento de algodão sem fibras a esquerda e com fibras a direita

3.2. P

Procedimentos experimentais

O procedimento experimental usado para a preparação da biomassa, produção e avaliação da qualidade dos briquetes está resumido na figura abaixo (Figura 3).

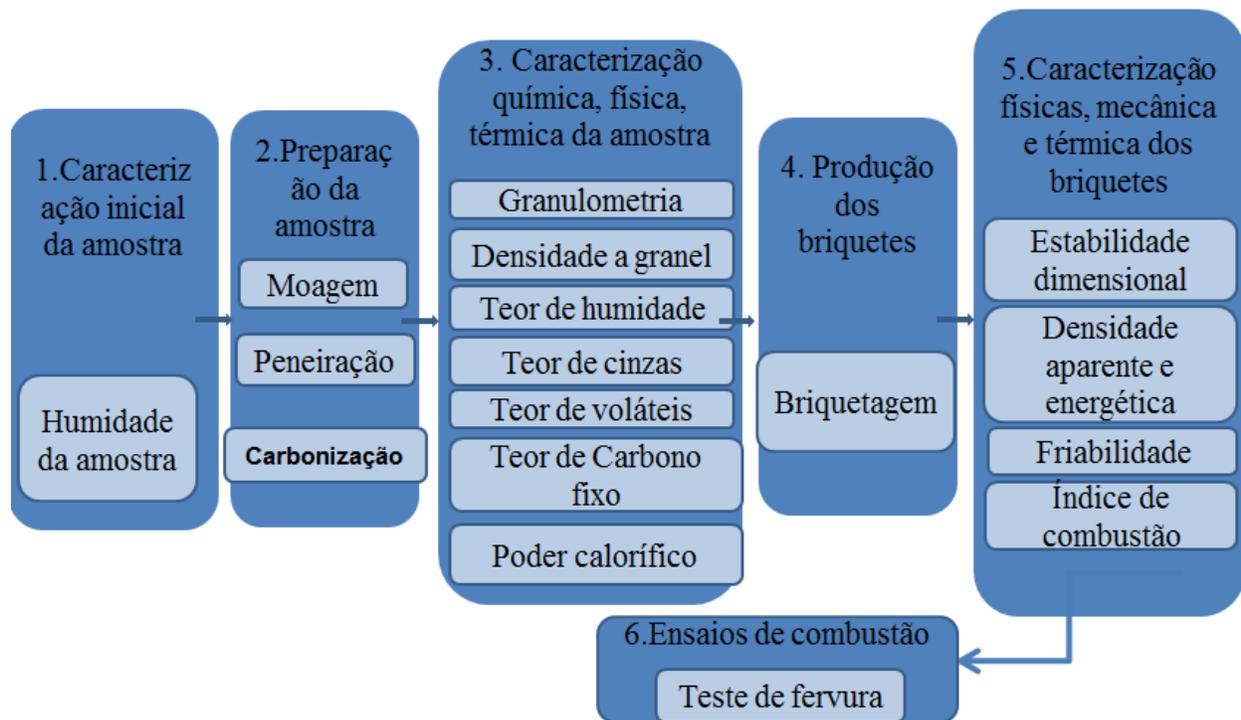


Figura 3- Procedimentos para a produção dos briquetes

3.3. Caracterização inicial e preparação da amostra

A caracterização inicial e preparação da amostra consistiu nas etapas abaixo descritas:

3.3.1. Determinação de umidade da amostra

Para a determinação da umidade da amostra, utilizou-se um analisador de umidade da marca *Sartorius* modelo MA 100, conforme ilustrado na Figura 4. A umidade foi determinada a uma temperatura de 105°C, e aproximadamente 1g da amostra foi empregada para este fim, com três repetições o ensaio. Cada ensaio teve a duração de aproximadamente 5 min.



Figura 4- Analisador de umidade

3.3.2. Moagem

Para o processo de moagem da matéria-prima foi utilizado um moinho de marca *Retsch*, modelo ZM 200, conforme ilustrado na Figura 5.

O procedimento consiste em introduzir gradualmente as amostras no moinho, para evitar sobrecarregar o equipamento e prejudicar seu desempenho, como demonstrado na Figura 5.



Figura 5- Moagem da biomassa

3.3.3. Peneiração

Para a peneiração, foram pesados 150g da amostra utilizando uma balança analítica da marca *Denver Instrument*; modelo: M-310, essa amostra foi então colocada no peneirador que possui os diâmetros de malha de (4mm; 1,18mm; 1mm; 0,75mm; 0,6mm, 0,5mm, 0,075mm), submetida a um tempo de 15 min com uma amplitude de 80Hz, utilizando um peneirador vibratório de marca *Tampson*, modelo VS 1000, conforme ilustrado na Figura 6.



Figura 6- Peneiração no peneirador vibratório

3.3.4. Carbonização

Para realizar a carbonização da biomassa, uma quantidade específica foi medida colocada em um reactor, que foi então colocado em uma mufla de marca: *Termolab- fornos Eléctricos*; modelo: MLM. O perfil de temperatura consistiu em duas horas de aqueci-

mento partindo da temperatura ambiente até que a biomassa atingisse uma temperatura de 400 ° C, seguidas de duas horas de residência em que a temperatura foi mantida constante em 400 ° C, e finalmente, quatro horas de arrefecimento até atingir 150 °C.

Logo após a retirada a biomassa, foi possível calcular o rendimento dividindo a massa restante após a carbonização pela massa inicial da amostra antes do processo, conforme mostra a Equação 1.

$$\eta = \frac{m_i}{m_c} \times 100\% \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

η – Rendimento (%)

m_i – Massa inicial (g)

m_c – Massa carbonizada (g)



Figura 7 - Biomassa no reactor, mufla para a carbonização

3.4. Caracterização física, química e térmica da amostra

3.4.1. Caracterização física

A caracterização física inclui: Análise granulométrica e densidade a granel.

3.4.1.1. Análise granulometria

Tendo sido concluída a peneiração, procedeu-se à pesagem das massas retidas para determinar as frações presentes em cada peneira. Isso possibilitou o cálculo da fração retida (X_i), de acordo com a Equação 2.

$$X_i = \frac{\text{massa retida}}{\text{massa total}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

X_i – Fração retida (%)

3.4.1.2. Densidade a granel

Para obter o valor da densidade a granel, balões foram pesados vazios. Com o auxílio de um funil e uma espátula, as amostras foram introduzidas nos balões de 25 cm^3 até atingirem o limite, batendo o balão sobre uma superfície para melhor agregação de partículas, até que não houvesse mais espaço para colocar a matéria-prima no volume definido de 25 cm^3 . O teste foi realizado em triplicata e os balões foram pesados para determinar a massa presente no volume de 25 cm^3 . A densidade a granel foi determinada pela Equação 3.

$$\rho_{\text{granel}} = \frac{m_{\text{amostra}}}{\text{Volume}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

ρ_{granel} – Densidade a granel (kg/m^3)

m_{amostra} – Massa da amostra (kg)

V – Volume do balão (m^3)

3.4.2. Características químicas – análise imediata

A caracterização química ou análise da amostra consistiu na determinação do teor de cinzas, teor de voláteis e teor de carbono fixo.

3.4.2.1. Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi realizada seguindo o protocolo D-1102 da NORMA ASTM. O procedimento constituiu em secar a amostra por 24 horas em uma estufa a uma temperatura de 105°C removendo assim a humidade da amostra. Em seguida, o cadinho vazio foi pesado para determinar sua massa, e aproximadamente 2g da amostra (partículas menores que 0,075mm) foram introduzidos no cadinho. Este foi então colocado na mufla de marca *Termolab-fornos Eléctricos*; modelo: MLM, e mantido por um intervalo de tempo de aproximadamente 21 horas a temperaturas entre 250 à 575°C.

Quando a mufla atingiu 150°C durante o arrefecimento, os cadinhos foram removidos e foram imediatamente armazenados num dessecador até alcançar a temperatura ambiente. Posteriormente os cadinhos contendo as cinzas foram pesados e os valores obtidos foram utilizados para calcular o teor de cinzas. Este procedimento foi em triplicata. O teor de cinzas foi determinado utilizando a Equação 4:

$$TC = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

TC – Teor de cinzas (%);

m_2 – Cadinho + cinzas ;

m_1 – Cadinho vazio ;

m_0 – Amostra fresca

3.4.2.2. Teor de voláteis

Para esse fim, recorreu-se ao protocolo E-872-82 da NORMA ASTM para determinar o teor de materiais voláteis. O procedimento consistiu em pesar 1g da amostra com uma granulometria menor que 0.075mm, que foi então seca por 24h em uma estufa a 105°C. Em seguida, a amostra foi colocada em um cadinho de Níquel com tampa para evitar contacto com o ar durante a perda de voláteis. Os cadinhos cobertos foram então inseridos na mufla por um período de 7 min, mantidos a uma temperatura de 950°C (Figura 8). Posteriormente, as amostras foram removidas e colocadas em um desseca-

dor para arrefecimento até atingir a temperatura ambiente, momento em que foram pesadas para determinar a perda de massa.



Figura 8- Cadinhos de níquel retirados da mufla

O teor de voláteis foi determinado pela Equação 5:

$$TV = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{m_{amostra}} \times 100\% \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

TV – Teor de voláteis (%);

$m_{inicial}$ – Cadinho + amostra (g);

m_{final} – Cadinho -voláteis (g);

$m_{amostra}$ – Massa da amostra (g)

3.4.2.3. Teor de carbono fixo

O carbono fixo foi determinado de acordo com a norma ASTM E870-82, calculando-se diferença entre a massa total da amostra e os teores de voláteis e cinzas, conforme mostra a Equação 6.

$$TCF = 100 - (TC + TV) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

TCF – Teor de carbono fixo (%);

TC – Teor de cinzas (%);

TV – Teor de voláteis (%);

3.5. Características térmicas

A caracterização térmica da amostra consistiu na determinação do poder calorífico.

3.5.1. Poder calorífico

De acordo com Parikh (2005) *apud* (PEREIRA & SEYE, 2011) o poder calorífico superior pode ser determinado pela Equação 7:

$$PCS = 0,3536(TCF) + 0,1559(TV) - 0,0078(TC) \quad (\text{Equação 7})$$

De acordo com Souza (2010) *apud* (HABITZREITER, et al., 2019), o PCI pode ser obtido pela Equação 8:

$$PCI = PCS - \left[\frac{600 \cdot 9 \cdot H}{100} \right] \quad (\text{Equação 8})$$

Segundo Brito (1993) e Vale *et al.* *apud* (MATOS, 2021) poder calorífico útil (PCU) pode ser determinado pela Equação 9:

$$PCU = PCI * (1 - TH) - 600TH \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

PCI – é poder calorífico inferior (Kcal/kg)

PCS – poder calorífico superior (Kcal/kg)

PCU – Poder calorífico útil (Kcal/kg)

H – teor de hidrogénio (%) \approx 3,5% segundo Pereira *et al* (2013) *apud* (COSTA, OLIVEIRA, FREITAS, LEAL, & PEREIRA, 2017)

600 – Calor de condensação da água a 0°C

9- Representa a quantidade da água (kg) que se forma ao oxidar um quilo de hidrogénio.

TH – teor de humidade (base húmida) (%)

TC – teor de cinzas (%)

TCF – teor de carbono fixo (%)

TV – teor de voláteis (%)

O parâmetro teor de hidrogénio (H) neste estudo foi determinado por análise elementar. A análise elementar determina a percentagem da massa que representa um elemento químico. Na falta de equipamentos para a realização da análise elementar é possível utilizar as correlações encontradas na literatura (PARIKH, 2007) *apud* (PEREIRA & SEYE, 2011). As fórmulas das correlações são as que seguem abaixo:

$$C(\%) = 0,637(TCF) + 0,455(TV)$$

$$H(\%) = 0,052(TCF) + 0,062(TV)$$

$$O(\%) = 0,304(TCF) + 0,476(TV)$$

3.6. Produção de briquetes: briquetagem

Para a produção dos briquetes, foi utilizada uma prensa laboratorial e um molde cilíndrico feito de aço inoxidável, com diâmetro interno de 50 mm e altura de 33 mm, conforme ilustra a Figura 9-a. Foram pesadas 60g da amostra com granulometria que varia entre 0,075 mm a 1 mm e introduzidas no molde (Figura. 9 – a), que foi então colocado na prensa (Figura 9 – b). Uma cinta que revestiu o molde (Figura 9 – b.4) para garantir o seu aquecimento lateral da amostra. A placa superior (Figura 9 – b.1) e a placa inferior (Figura 9 – b.5) foram responsáveis por elevar a temperatura nas posições superiores e inferiores da amostra, respectivamente. Dessa forma, as placas e a cinta garantem a distribuição uniforme da temperatura em toda a amostra. Dois termopares (Figura 9 – b.3) foram utilizados para monitorar a evolução da temperatura. Eles foram colocados nos orifícios (Figura 9-a.6) do molde, sendo que um deles mediu a elevação da temperatura na cinta e o outro, a elevação da temperatura nas placas. Para garantir a eficácia da pressão, foram colocados dois cilindros de diâmetros de aproximadamente 50 mm (Figura 9-b.2).

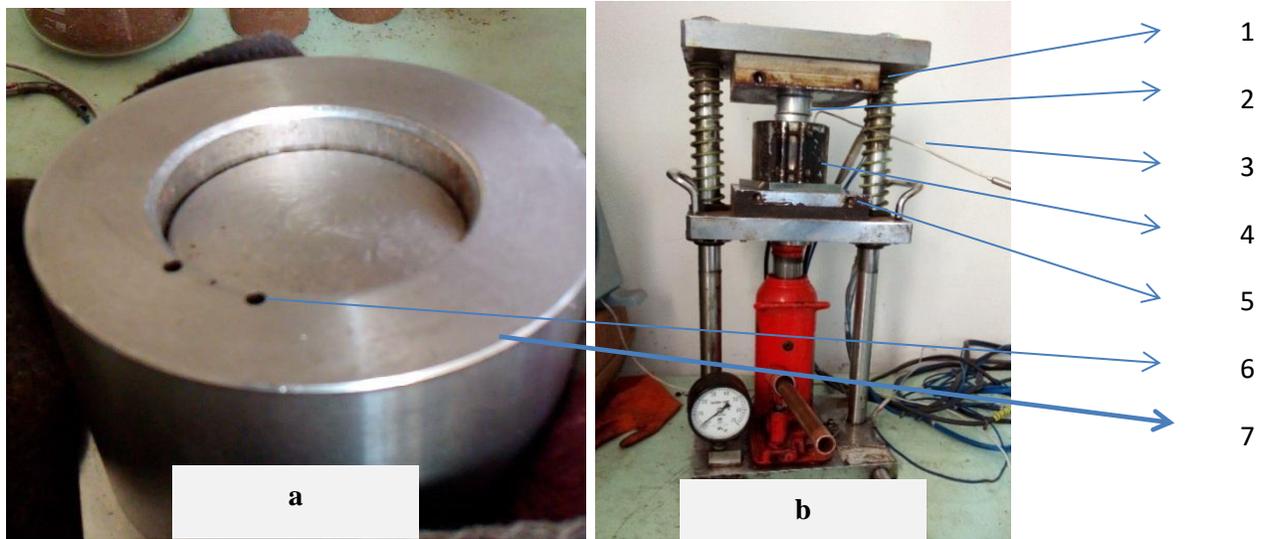


Figura 9 - a) Molde cilíndrico e b) prensa laboratorial

A compactação foi realizada aplicando-se uma pressão constante de 10 MPa à temperatura de 150°C. Ao atingir a Temperatura de 150°C da cinta, foi cronometrado um período de 5 min para desligar os equipamentos de aquecimento. Em seguida, com o auxílio de um ventilador, foi proporcionado um arrefecimento mais rápido.

3.7. Características físicas, mecânicas e térmicas dos briquetes

3.7.1. Características físicas

A caracterização física dos briquetes consistiu na determinação da estabilidade dimensional e da densidade aparente.

3.7.1.1. Estabilidade dimensional

Logo após a confecção de cada briquete, foi realizada a verificação da estabilidade dimensional, medindo-se o diâmetro e a altura do briquete com o auxílio de um paquímetro digital de marca: Mituloyo, modelo CD – 6"CSX, em intervalos de tempo de 0, 1, 24, 48, 72 e 96 horas. Isso permitiu acompanhar a expansão longitudinal dos briquetes, até que não fossem mais observadas alterações significativas em suas dimensões. As medições realizadas serviram para determinar os valores da expansão longitudinal, indicando assim a qualidade do briquete em relação à absorção de hu-

midade e ao grau de compactação. Esses dados são relevantes para o estudo de viabilidade do armazenamento e transporte dos briquetes.

Para a análise da expansão longitudinal, foi usada a Equação 10.

$$Expansão_{t=t} = \frac{H_{t=t} - H_{t=t_0}}{H_{t=t_0}} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

H – altura do briquete (mm)

t – tempo (horas)

3.7.1.2. Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente, pesou-se o briquete na balança para determinar sua massa. Em seguida, com os briquetes que não apresentassem variações muito significativas em sua altura e diâmetro, foram determinados os respectivos volumes. Tendo-se calculado o volume dos briquetes e conhecendo a massa de cada briquete, utilizou-se a seguinte equação (Equação 11) para a determinação da densidade aparente:

$$\rho_{aparentel} = \frac{m_{briquete}}{V_{briquete}} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

$\rho_{aparentel}$ – Densidade aparente (Kg/m^3)

$m_{briquete}$ – Massa do briquete (Kg)

$V_{briquete}$ – Volume do briquete (m^3)

3.7.2. Características mecânicas

As características mecânicas consistiram no teste de friabilidade.

3.7.2.1. Friabilidade

O cálculo da quantidade de finos gerados foi possível através da seguinte expressão:

$$\text{Friabilidade} = \frac{\text{massa}_{\text{inicial}} - \text{massa}_{\text{final}}}{\text{massa}_{\text{inicial}}} \times 100\% \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$\text{massa}_{\text{inicial}}$ – Massa do briquete antes do teste de friabilidade (Kg)

$\text{massa}_{\text{final}}$ – Massa do briquete depois do teste de friabilidade (Kg)

Friabilidade (%)

Para a obtenção dos dados, foi necessário pesar três briquetes e coloca-los dentro de um moinho de bolas (sem as bolas) de marca *Anand A.C induction Motor* conforme ilustra a Figura13, previamente ajustado uma velocidade de 40 rotações por minuto (rpm) durante 5 minutos, e o tambor girando a uma velocidade rotacional constante. Após este processo os briquetes foram retirados do moinho e pesados novamente para determinar a sua perda de massa, e, assim, obter o valor da massa final do briquete.



Figura 10- Moinho de bolas, ou tambor rotativo

3.7.3. Características térmicas dos briquetes

As características térmicas dos briquetes determinadas nesse trabalho foram a densidade energética e o índice de combustão:

3.7.3.1. Densidade energética

Para a obtenção dos valores das densidades energéticas dos resíduos não carbonizados, far-se-á o produto do PCU dos resíduos não carbonizado pela densidade a granel dos resíduos não carbonizados, e para o cálculo da densidade energética dos briquetes não carbonizados far-se-á o produto do PCU do briquete não carbonizado pela densidade aparente dos briquetes não carbonizados, a mesma sequência será feita para os briquetes carbonizados. O cálculo da densidade energética dos resíduos e dos briquetes teve como base, as seguintes equações:

Densidade energética do resíduo: $\rho_{energética} = \rho_{granel} * PCU$ (Equação 13)

Densidade energética do briquete: $\rho_{energética} = \rho_{aparente} * PCU$ (Equação 14)

Onde:

$\rho_{energética}$ – Densidade energética (MJ/m³);

$\rho_{aparente}$ – Densidade aparente (Kg/m³);

ρ_{granel} - Densidade a granel (Kg/m³);

PCU - Poder calorífico útil (MJ/Kg).

3.7.3.2. Índice de combustão

O conceito do índice de combustão (ICOM), basea-se no desprendimento de energia durante a queima. Espera-se que o briquete de boa qualidade forneça altas temperaturas por um longo período, consumindo uma pequena quantidade de massa QUIRINO e BRITO (1991) *apud* (SPADIM, EUFRADE JUNIOR, ARRUDA, GUERRA, & LEONELLO, 2020). Portanto, o índice é directamente proporcional ao tempo de queima e às temperaturas registadas durante o processo, é inversamente proporcional à quantidade de massa consumida.

O índice de combustão foi determinado utilizando um fogão de marca: *jikoko burn* (Figura 11 - 3), uma balança marca *Ohaus ranger 3000* (Figura 11 - 1), duas placas de

madeira para proteger a balança do calor da combustão (Figura 11 - 2), e um termopar que é um medidor de temperatura (Figura 11 - 4) , conforme mostra a (Figura 11).



Figura 11- Equipamento utilizado para os ensaios de índice de combustão

Para o teste do índice de combustão, inicialmente foi colocado sobre a balança uma base de madeira, e o peso da madeira foi desconsiderado. Em seguida, o fogão foi colocado sobre a base, contendo uma quantidade específica do combustível (lenha, carvão e briquetes). Foi determinado 5% da quantidade de cada tipo de combustível utilizado os quais correspondem a quantidade de querosene necessária para iniciar ignição. Em seguida, um termopar foi posicionado para a medição da temperatura.

Com auxílio de um cronômetro, uma balança e um termopar foi possível determinar variação da massa consumida e, da temperatura em intervalos de 5 minutos. Esses valores foram registados em tabelas, facilitando a elaboração do gráfico de massa versus tempo.

E assim foi possível saber qual foi a temperatura máxima atingida, o tempo que foi necessário para atingir a temperatura máxima de cada combustível e o consumo de massa, e estes são os valores necessários para que seja possível o cálculo do índice de combustão.

O índice de combustão (ICOM), foi calculado pela Equação 15:

$$ICOM = \frac{A \times B}{100 \times C} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

A= percentagem do tempo de teste no qual a temperatura permanece acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total de 120 min;

B = Percentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150°C;

C= Percentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

O ICOM, assim calculado é adimensional. As unidades se anula no cálculo das percentagens e estas se cancelam com a divisão por 100.

3.8. Teste de fervura e emissões

O teste de fervura da água, conhecido como WBT (Watter Bolling Test), consiste na simulação do procedimento de cozimento de alimentos e pode ser utilizado para uma rápida comparação do desempenho de diferentes tipos de combustíveis. Este teste mede o tempo necessário para que cada tipo de combustível ferva um volume igual de água em condições semelhantes (ONUEGBU, EKPUHOBI, OGBU, OKEOMA, & OBUMSELU, 2011).

Teste de fervura da água é definido na versão 4.2.2 do WBT como uma simulação simplificada do processo de cozinhar, que é empregado para medir a eficiência com que um fogão utiliza a lenha para aquecer água em panelas, além de medir as emissões produzidas durante o processo de cozimento (CANTO, 2014).

O Procedimento experimental para a recolha de dados é:

- Pesar o fogão, pesar a quantidade do combustível, pesar o fogão com combustível (briquete, lenha ou carvão);
- Pesar a panela com a respectiva tampa (duas panelas);
- Colocar 2500g de água na panela (com temperatura da água de 18 a 21° C), e pesar a panela com água e com a respectiva tampa;
- Medir a temperatura ambiente e a quantidade de CO e CO₂ presentes;

- Medir 5% da biomassa, que corresponde à quantidade de querosene, e adicionar na biomassa.
- Faltando 2 a 3 minutos para conclusão de todos os procedimentos preliminares para iniciar o teste de fervura, pode-se acender o combustível e deixar um tempo até que toda quantidade de querosene adicionada seja consumida;
- Colocar a panela no fogão e, fixar o termopar no seu interior através do orifício na tampa;



Figura 12- Medição da panela, água, fogão e combustível



Figura 13- Equipamentos para o teste de fervura e emissões

O WBT é composto por 3 três fases mostradas na Figura 14:

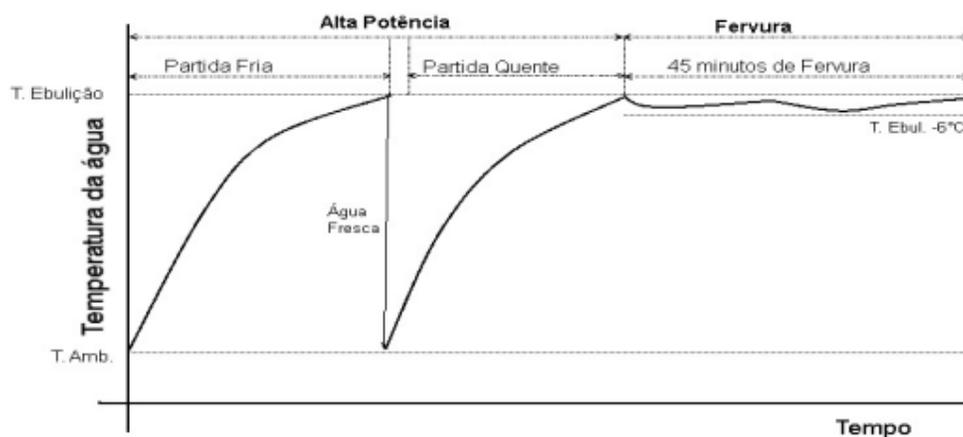


Figura 14- Figura padrão do WBT

O teste é feito na seguinte sequência:

Passo 1 – Inicia-se na etapa de *Partida Frio*. Dentro desta fase de *Alta potência*, a panela com água à temperatura ambiente é aquecida até atingir a temperatura de ebulição da água. Uma vez atingido o estado de ebulição da água, são medidos o tempo, a quantidade de água remanescente e a quantidade da biomassa consumida até a fervura da água; em seguida:

Passo 2 – Inicia-se a etapa de *Partida Quente*, ainda na fase de *Alta Potência*. Com o fogão aquecido, a água e a biomassa são repostas, e os procedimentos do ensaio da *Partida a Frio* são repetidos. Novamente, quando a água entrar em ebulição, anota-se o tempo da fase, pesa-se a quantidade de água remanescente e a biomassa residual, incluindo as cinzas.

Passo 3 – Em seguida inicia a fase de *Baixa Potência*, na qual a segunda panela é colocada no fogão sem reposição de água, e por 45 minutos a temperatura de ebulição é mantida constante. Durante esse período, são registrados o consumo de biomassa, o

tempo decorrido e o peso da água remanescente. Durante todos os procedimentos, as emissões são monitoradas.

Os dados colectados, são posteriormente tratados e lançados nas planilhas de cálculo conforme o protocolo estabelecido. Essas planilhas apontam para cada fase os desempenhos, incluindo as potências, consumos específicos de combustível, emissões de CO, CO_2 e teores de particulados.

CAPITULO – IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente estudo, relativos às características físicas, térmicas e mecânicas dos resíduos do processamento de algodão, e dos respectivos briquetes produzidos. Além disso, também são apresentados os resultados dos testes de fervura e de emissões.

4.1. Características físicas da amostra

4.1.1. Determinação da Humidade da amostra

Os resultados de humidade obtidos neste estudo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - humidade da amostra antes e depois da carbonização

Material	Humidade <i>in nature</i> (%)	TH (%)
Resíduo não carbonizado	8,26 ± 0,30	5,50±50
Resíduo carbonizado	3,10 ± 12	10,20±30

➤ Humidade *in nature*

Os resultados de humidade média obtidos através do analisador de humidade indicam que os resíduos de processamento de algodão, como colhidos apresentavam valores de humidade recomendados na literatura, que varia de 8% a 16% para a produção de briquetes (SCHUTZ, ANAMI, & TRAVESSINI, 2010). Isso seria bastante vantajoso, uma vez que os resíduos não precisariam ser submetidos a secagem. Para os resíduos em estudo, os briquetes por eles produzidos apresentavam rachaduras e baixa resistência no intervalo de humidade recomendado pela literatura (Figura 15). Como resposta, as amostras foram secadas baixando a humidade, até que se alcançassem resultados desejados, que são briquetes com boa estabilidade e sem rachaduras.

Após a carbonização dos resíduos do processamento do algodão a humidade ficou consideravelmente abaixo do recomendado pela literatura, o que exigiu a humidificação da amostra para ajustar a humidade para o intervalo recomendado.



Figura 15 - Briquetes não carbonizados produzidos com a humidade in nature

➤ Teor de humidade

O teor de humidade dos resíduos (biomassa) para a briquetagem é um factor muito importante pois influencia na estabilidade, e durabilidade dos briquetes. O excesso ou a falta da humidade podem resultar em briquetes instáveis, que podem se desfazer durante o transporte e armazenamento (SCHUTZ, ANAMI, & TRAVESSINI, 2010).

Para evitar que os briquetes apresentem fracturas devido à expansão dos gases, é necessário que a matéria-prima seja seca, No entanto, para garantir a formação adequada do aglomerado de partículas é imprescindível que a humidade esteja dentro dos padrões recomendados, como (MANICO, LEONIDO, & COUVEIA, 2020), acima discutido.

No caso dos resíduos não carbonizados, foram realizados vários testes para determinar a humidade ideal, uma vez que briquetes produzidos com humidade de 8 a 16%, apresentavam rachaduras e alguns até se quebraram. Essas rachaduras foram atribuídas ao excesso de óleo na biomassa.

A humidade definida como ideal para a biomassa não carbonizada na produção de briquetes de qualidade, sem rachaduras, e melhor resistência foi no intervalo de 5% a 6,5%. e para biomassa carbonizada no intervalo de 9,90% a 10,50%. os briquetes produzidos na humidade ideal estão apresentados na Figura 16.



Figura 16 - Briquete não carbonizado a esquerda e carbonizados a direita produzidos com a humidade ideal

Tanto os briquetes produzidos a partir de biomassa não carbonizada quanto os provenientes da biomassa carbonizada não necessitaram de aglutinante.

O briquete será menos resistente se humidade da biomassa for muito baixa, devido a falta de interacção entre a água e as partículas, dificultando assim as ligações de hidrogénio, forças interfaciais e capilares. Por outro lado, se a humidade da biomassa for elevada, os briquetes produzidos serão frágeis porque haverá diminuição considerável das interacções do tipo Van der Waals (forças intermoleculares), que decresce à medida que a distância entre as partículas aumenta (BOROWYCZ, et al., 2018).

4.1.2. Resultado da análise granulométrica

Após a moagem e peneiração dos resíduos, obteve-se a distribuição granulométrica conforme ilustrado na Figura 17.

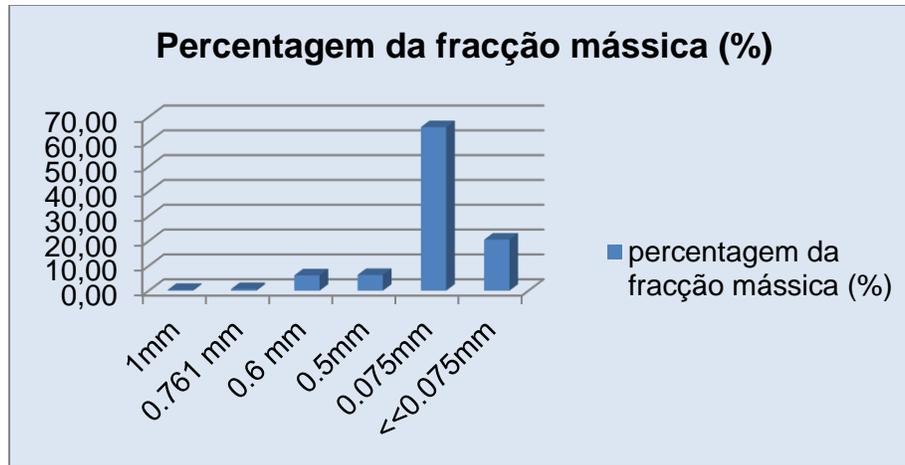


Figura 17- Distribuição granulométrica

Analisando a distribuição granulométrica dos resíduos de processamento de algodão após a moagem, foi possível observar que as partículas com tamanhos compreendidos entre 0,075mm e menores estão em maiores quantidades, constituindo assim a fracção predominante na fracção granulométrica. No entanto, para a produção dos briquetes, foram utilizadas partículas com tamanhos entre 0,075 a 1mm, excluindo aquelas menores que 0,075mm, que representa o pó.

Ao analisar a influência da granulometria, observa-se que os briquetes com maiores dimensões apresentam menor resistência mecânica, isso ocorre devido ao menor preenchimento dos espaços vazios, o que dificulta a compactação do briquete e resulta em uma maior tendência a esfarelar após a briquetagem (OHANA, 2012). Por outro lado, os briquetes compostos por partículas de menor dimensão (menor granulometria), mostram-se mais propensos à compactação, resultando em maior densidade aparente e resistência mecânica em comparação com aqueles de maior dimensão (maior granulometria) que são menos densas e menos resistentes (FERNANDEZ, et al., 2016).

4.1.3. Resultados da Carbonização

A figura a seguir (Figura 18), mostra como ficou a biomassa após a carbonização.



Figura 18 - Massa da biomassa após a carbonização

Após a carbonização, parte dos voláteis é liberada, o que influencia na redução da massa. A partir dessa redução, foi possível calcular o rendimento, que foi de 69%. Este valor mostrou-se muito superior ao encontrado na carbonização da madeira para obtenção do carvão vegetal cujo rendimento foi de 40 % (BENITES, TEIXEIRA, REZENDE, & PIMENTA).

A carbonização dos resíduos foi realizada durante 1 hora, 2 horas e 3 horas de residência, respectivamente. No entanto, todos os cálculos e a produção de briquetes de biomassa carbonizado, foram baseados em um tempo de residência de 2 horas. Isso se deve ao facto de que este tempo apresentou menor teor de cinzas e maior teor de materiais voláteis conforme mostrado na Tabela 3, mesmo tendo um menor teor de carbono fixo em comparação com os resíduos carbonizados durante 1 hora e 3 horas. No entanto, o briquete produzido com resíduo carbonizado com 2 horas de residência é considerado superior, pois gera menos danos (corrosão) nos equipamentos.

4.1.4. Densidade a granel

Na tabela a seguir, encontram-se apresentados os resultados referentes a densidade a granel.

Tabela 3- Densidade a granel

Material	Densidade a granel (kg/m ³)
Biomassa não carbonizada	648,08
Biomassa carbonizada	559,56

A tabela anterior, mostra valores elevados da densidade a granel dos resíduos de processamento de algodão em comparação com os valores de densidade a granel dos resíduos do processamento de algodão encontrados por (MORAIS, 2007), que são de 526,06 kg/m³. Constatou-se ainda que, os valores da densidade a granel dos resíduos de processamento de algodão mostraram-se elevados em comparação com os valores da densidade a granel do carvão vegetal e da lenha, que variam de 180 kg/m³ a 300 kg/m³ (RODRIGUES & MOURA, 2023), e da lenha que foram de 448,26 kg/m³ (MORAIS, 2007), respectivamente. É importante notar que a densidade a granel afecta no espaço ocupado pela biomassa. Quanto maior for o volume ocupado pela biomassa, menor será a quantidade a ser transportada ou armazenada, e isso também influencia na densidade energética, pois esses factores têm uma proporcionalidade directa.

A densidade a granel representa maior quantidade de massa num volume reduzido, isto é, quanto maior for o valor da densidade a granel, menor será o espaço ocupado e consequentemente menor o espaço necessário para armazenagem e transporte (PEREIRA, et al., 2016).

É de extrema importância que os resíduos lignocelulósicos apresentem valores elevados de densidade a granel, pois isso influencia factores como o custo de transporte e a densidade energética, que são essenciais para a viabilidade económica das energias renováveis (OLIVEIRA, BARBOSA, LIMA, YAMAJI, & JUNIOR, 2017). A densidade a granel também interfere no dimensionamento da câmara para a combustão do material (PEREIRA, et al., 2016).

4.2. Características químicas – análise química imediata da amostra

Os resultados correspondentes à análise química imediata dos materiais são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Teores de cinza, teores de materiais voláteis e teores de carbono fixo

Material	TC (%)	TV (%)	TCF (%)
-----------------	---------------	---------------	----------------

Não carbonizada	32.50	54.63	12.86
Literatura (MORAIS, 2007)	1.85	79.68	18.47
Carbonizada 1 hora	38.86	36.12	25.01
Carbonizada 2 horas	32.34	48.02	19.64
Carbonizada 3 horas	37.12	34.88	28.01

4.2.1. Teor de cinzas

Os valores obtidos para os teores de cinzas, tanto para os briquetes carbonizados quanto para os não carbonizados foram de 32,34% e 32,50%, respectivamente. Ao comparar estes resultados com os valores encontrados na literatura, que são em torno de 1,85% (MORAIS, 2007), os resultados encontrados deste estudo mostraram-se significativamente elevados. Isso não é um bom resultado, pois está muito acima da faixa recomendada, que é de no máximo 4%, e valores acima desse limite podem causar corrosão nos equipamentos (PADILLA, PIRES, YAMAJI, & FANDINO, 2016).

O teor de cinzas representa a percentagem de material inerte que não produz calor, e está directamente relacionado com o poder calorífico. Um aumento nos valores de teor de cinzas diminui o poder calorífico do combustível. Segundo QUIRINO (1991) *apud* (NAKASHIMA, et al., 2016), um baixo teor de cinzas garante maior resistência do briquete, além de um poder calorífico mais elevado, resultando em a briquetes de melhor qualidade.

Além disso, os valores de teor de cinzas obtidos neste estudo mostraram-se também muito elevados quando comparados com os de (AVELAR, 2012), que foram de 8, 93%. Isso indica, uma disparidade significativa nos resultados, que pode ser justificada pela adição de produtos químicos no cultivo de algodão, tais como pesticidas, herbicidas, fertilizantes e esfoliantes, que contêm vários materiais inorgânicos e contaminam a composição natural do algodoeiro.

4.2.2. Teor de Voláteis

Conforme os resultados mostrados na Tabela 4, os valores de teor voláteis não carbonizados e carbonizados foram de 54,63 e 48,02% respectivamente, e estes valores mostraram-se inferiores que os obtidos por (MORAIS, 2007), que foram de 79,68%.

Sabendo que o teor de voláteis determina a facilidade com que o combustível inicia a queima, é desejável que se tenham valores elevados do teor de materiais voláteis, pois quanto maior for o teor de materiais voláteis mais fácil o combustível entra em estado de ignição, mas menor será o carbono fixo (MIOLA, FROTA, UCHÔA, OLIVEIRA, & DE ASSIS LEONARDO FILHO, 2020).

Para (AVELAR, 2012), os resultados do teor de materiais voláteis para os resíduos de algodão foram de 90,2% que mostraram-se também ser muito elevados comparados com os obtidos nesse estudo que foram de 54,63% para os resíduos não carbonizados e 48,02% para os resíduos carbonizados de algodão.

Os valores do teor de materiais voláteis obtidos nesse estudo só seriam satisfatórios caso os valores de teor de cinzas fosse abaixo de 4%, pois permitiria que o teor de carbono fixo fosse muito elevado o que também condicionaria num elevado poder calorífico.

4.2.3. Teor de carbono fixo

O teor do carbono fixo foi calculado usando os valores de teor de cinzas e o teor de materiais voláteis, os teores de carbono fixo obtidos nesse estudo foram de 12,86% para os resíduos não carbonizados e de 19,64% para os resíduos carbonizados. No estudo feito por (AVELAR, 2012), os resultados obtidos do teor de carbono fixo dos resíduos de algodão foi de 0,86% que mostra-se ser muito baixo comparando com os obtidos nesse estudo que são 12,86% e 19,64% para resíduo não carbonizado e carbonizado respectivamente, e os valores baixos obtidos por ele foram devido ao elevado teor de materiais voláteis.

O teor de carbono fixo de resíduos de algodão obtidos por (MORAIS, 2007) no seu estudo foi de 18,47%, mostrando-se superior quando comparado com os obtidos nesse estudo que foram 12,86% para os resíduos não carbonizados e de 19,64% para os

resíduos carbonizados, influenciando num elevado poder calorífico, que é uma característica de extrema importância quando o objectivo é maior geração de energia.

Segundo MCKENDRY (2002), *apud* (DE ANDRADE, 2015), o teor de carbono fixo representa a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de humidade, ou seja a massa que é efectivamente queimada.

Para BRITO; BARRICHELO (1982) *apud* (DO VALE, MENDES, AMORIM, & DANTAS, 2011), combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, implicando maior tempo de residência nos aparelhos de queima, em comparação com os outros que têm menor teor de carbono fixo.

4.3. Características térmicas da amostra

4.3.1. Poder calorífico

Os resultados do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), e poder calorífico útil (PCU) obtidos nesse estudo, foram apresentados na Tabela 5, e também colocados os valores da literatura para melhor comparação dos resultados.

Tabela 5- Poderes caloríficos, PCS, PCI, PCU

Material	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCU (MJ/kg)
Não carbonizada	12.81	10.62	9.25
Literatura (AVELAR, 2012)	17.89	16.65	14.84
Carbonizada 2 horas	14.18	12.02	10.54

Observando os resultados nesse estudo apresentados na Tabela 5, é possível notar que os valores de poder calorífico superior (PCS) foram de 12.81 MJ/kg e de 14.18 MJ/kg, poder calorífico inferior (PCI) de 10,62 MJ/kg e 12,02 MJ/kg, poder calorífico útil (PCU) de 9,25 MJ/kg e 10,54 MJ/kg para os resíduos não carbonizados e carbonizados respectivamente.

Comparando os poderes caloríficos da biomassa em estudo com os da literatura, constatou-se que os resultados desse estudo mostraram-se inferiores que os de (AVELAR, 2012), que teve como poder calorífico superior, inferior e útil de 17,89 MJ/kg, 16.65

MJ/kg e 14,84 MJ/kg respectivamente, e isto foi devido ao elevado teor de materiais voláteis e baixo valor do teor de cinzas. Nesse trabalho em estudo o que influenciou em baixos valores de poderes caloríficos foi o elevado teor de cinzas que mostrou-se ser oito vezes maior que o recomendado na literatura.

Observando os resultados dos poderes caloríficos de 19,65 MJ/kg, 18,29 MJ/kg e 16,20 MJ/kg para poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCI) respectivamente obtidos por (MORAIS, 2007), é possível constatar que estes resultados são muito maiores que os realizados nesse estudo, devido ao baixo valor de teor de cinzas (TC) que foi de 1,85%, alto valor do teor de materiais voláteis (TV) que foi de 79,68% e teor de carbono fixo (TCF) de 18,47%.

Poder calorífico pode ser definido como a quantidade de calor libertada na combustão completa de uma unidade de massa de combustível. Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização de resíduos como fonte de energia, em substituição aos combustíveis derivados do petróleo e aproveitamento energético (MORAIS, 2007).

Um dos outros factores que pode contribuir para valores baixos de poder calorífico é o teor de humidade, pois influência directamente no potencial energético, quanto maior a humidade, menor será o poder calorífico (MUZEL, DE OLIVEIRA, HANSTEAD, PRATES, & GOVEIA, 2014).

4.4. Características físicas, térmicas e mecânicas dos briquetes

4.4.1. Estabilidade dimensional

Após a sua produção, os briquetes foram submetidos a medições do diâmetro e altura para que fosse possível saber o seu comportamento no sentido longitudinal, calculando assim a expansão longitudinal ao longo do tempo (Figura 19).

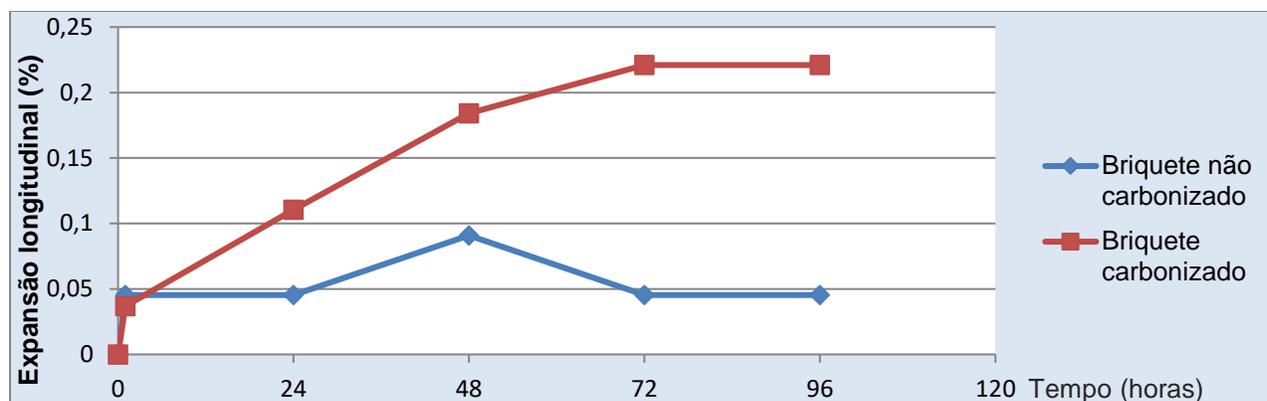


Figura 19-Expansão dos briquetes dos resíduos de processamento de algodão

Os valores da expansão longitudinal foram de 0,05% para briquetes não carbonizados e 0,25% para os briquetes carbonizados, o que significa que os briquetes do resíduo do processamento de algodão apresentam baixa variação do seu tamanho, e essa baixa absorção de umidade é devido a cobertura criada pelo óleo em volta do briquete, e isso também mostra que o processo de compactação e interação entre as partículas foram eficientes para a produção de briquetes de qualidade.

Foi possível constatar que os briquetes entraram em estabilidade após 72 horas, sendo possível recomendar que após 72 horas já se podem fazer outros testes tais como a resistência a compressão, friabilidade, densidade aparente porque já não há variações significativas da altura dos briquetes.

4.4.2. Densidade aparente e energética

Os resultados da densidade aparente e energética dos resíduos e dos briquetes estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6- Densidade a granel, densidade aparente dos resíduos e dos briquetes

Material	Densidade a granel (resíduos) Kg/m ³	Densidade aparente (briquetes) Kg/m ³	Densidade energética (resíduos) MJ/m ³	Densidade energética (briquete) MJ/m ³
Não carbonizado	648.08	1384.11	6009.82	12835.20
Carbonizado	559.56	1177.57	5896.25	12408.40

i. Densidade aparente

Após os briquetes atingirem a estabilidade dimensional, foram realizadas medições de massa e volume, para determinar sua densidade aparente. Os resultados apresentados na Tabela 6, mostram que os briquetes produzidos tiveram valores de densidade aparente iguais a 1177,57 e 1384,11 Kg/m^3 para briquetes carbonizados e não carbonizados, respectivamente. Esses resultados foram satisfatórias em comparação com os valores de densidade aparente dos briquetes não carbonizados mencionados em (DE SOUSA DIAS, et al., 2012), que são 1100 Kg/m^3 . Além disso, os resultados obtidos demonstram valores superiores de densidade aparente em comparação com os mencionados em (MORAIS, 2007), que são de 1070 Kg/m^3 . Vale ressaltar que quanto maior o valor da densidade aparente, maior será a resistência do briquete e menor será o espaço ocupado. A densidade aparente do briquete é duas vezes maior que a densidade a granel, o que significa que ocupará a metade do espaço comparado com um briquete comprimido. Isso evidencia as vantagens do uso dos equipamentos de briquetagem para obter uma melhor compactação e briquetes de qualidade.

Além disso, a densidade aparente está directamente relacionada à densidade energética do material. Portanto, é desejável que a densidade aparente seja elevada para aumentar a densidade energética do material.

ii. Densidade energética

Os resultados apresentados na Tabela 6, mostram que a densidade energética dos resíduos e dos briquetes não carbonizados foram superiores aos carbonizados, isto pelo facto de os não carbonizados apresentarem maior densidade aparente que é directamente proporcional a densidade energética, isso devido ao menor tamanho de partículas dos briquetes não carbonizados.

Quanto menor for o tamanho de partículas maior será a compactação do material, resultando numa maior densidade aparente e energética dos briquetes.

Os valores obtidos da densidade energética dos briquetes não carbonizados mostraram-se maiores que os obtidos por (AVELAR, 2012) que foram de 619,99

MJ/m³, e este resultado pode ser justificado pelo facto de não ter havido uma boa moagem dos resíduos resultando numa baixa compactação. O resultado obtido neste trabalho mostrou-se ser dez vezes maior que o obtido na literatura.

Sabendo que a densidade energética dos briquetes compreende a quantidade de energia por unidade de volume, então quanto maior o valor da densidade energética maior é a quantidade de energia presente em uma unidade de volume, resultando numa queima mais eficiente e duradoura.

4.4.3. Friabilidade

A Figura a seguir (Figura 20), apresenta os resultados do ensaio de friabilidade ou teste de tamboreamento realizado para a biomassa não carbonizada e para biomassa carbonizada.

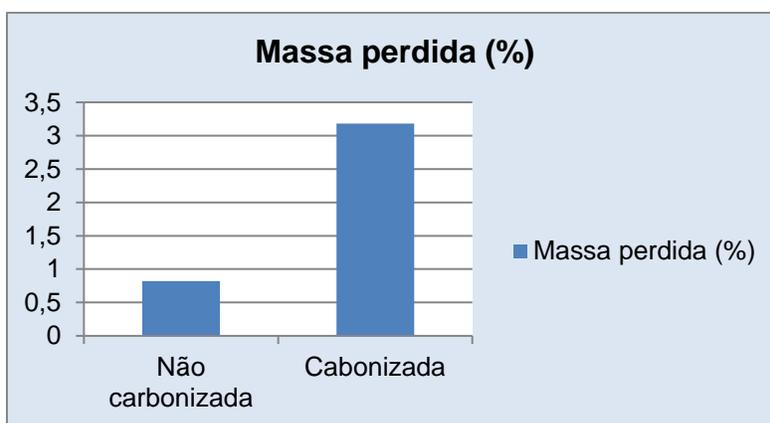


Figura 20 - Resultados do teste de friabilidade

Os briquetes produzidos com os resíduos de processamento de algodão apresentam índices de friabilidade compreendidos entre 0,82 e 3,18%. Como se pode observar na Figura 20, os briquetes produzidos com os resíduos não carbonizados mostraram-se menos friáveis comparativamente aos briquetes produzidos com os resíduos carbonizados. Isso deve-se à perda de uma parte da lignina durante a carbonização, que atua como aglutinante (TELEKEN, BONASSA, SCHNEIDER, PARISSOTO, & DE OLIVEIRA, 2015).

O teste de friabilidade é realizado para prever a resistência dos briquetes ao atrito durante os processos de empacotamento, manuseio e distribuição (VAZ, 2013). Os briquetes produzidos nesse estudo, são classificados como pouco friáveis, o que é um resultado desejado, pois durante o transporte e armazenamento dos briquetes, haverá pouca perda de massa.

Os briquetes carbonizados e não carbonizados, apresentaram um índice de friabilidade inferior quando comparada com o carvão de resíduos de exploração florestal que foi de 35,2% (GHIMARÃES, 2021).

4.5. Índice de Combustão

Foram calculados os índices de combustão (ICOM) dos briquetes, carvão vegetal e da lenha, os resultados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Índice de combustão (ICOM)

Material	ICOM
Briquete não carbonizado	0.4629
Briquete carbonizado	0.4756
Carvão vegetal	0.5793
Lenha	0.4787

Os valores encontrados de ICOM neste estudo para os briquetes foram de 0.4756 e 0.4629 para os briquetes carbonizados e não carbonizados respectivamente. Os valores de ICOM dos briquetes carbonizados e não carbonizados mostraram-se dentro do intervalo recomendado na literatura (PAULA, TRUGILHO, REZENDLE, DE ASSIS, & BALIZA, 2011), num estudo onde verificou-se o ICOM dos briquetes de várias biomassas compreendidos entre 0.4293 a 0.6464.

Quanto ao carvão vegetal, (PAULA, TRUGILHO, REZENDLE, DE ASSIS, & BALIZA, 2011), obteve ICOM de 0.5572, que se mostraram próximos dos obtidos nesse estudo, conforme demonstrado na Tabela 7, por sua vez, a lenha teve valores de ICOM 0.4787 também demonstrando um bom índice de combustão.

O carvão vegetal apresentou um ICOM mais elevado nesse estudo que foi de 0.5793, mostrando-se como o que possui melhor desempenho na combustão dentre as amostras analisadas. Isto significa que o carvão vegetal gera mais energia (calor) com o menor consumo de massa comparativamente com os outros combustíveis.

Nas figuras abaixo (Figura 21 e Figura 22), é possível observar o comportamento dos combustíveis (briquetes, carvão e lenha) em relação à variação da temperatura e à perda de massa ao longo do tempo durante a combustão.

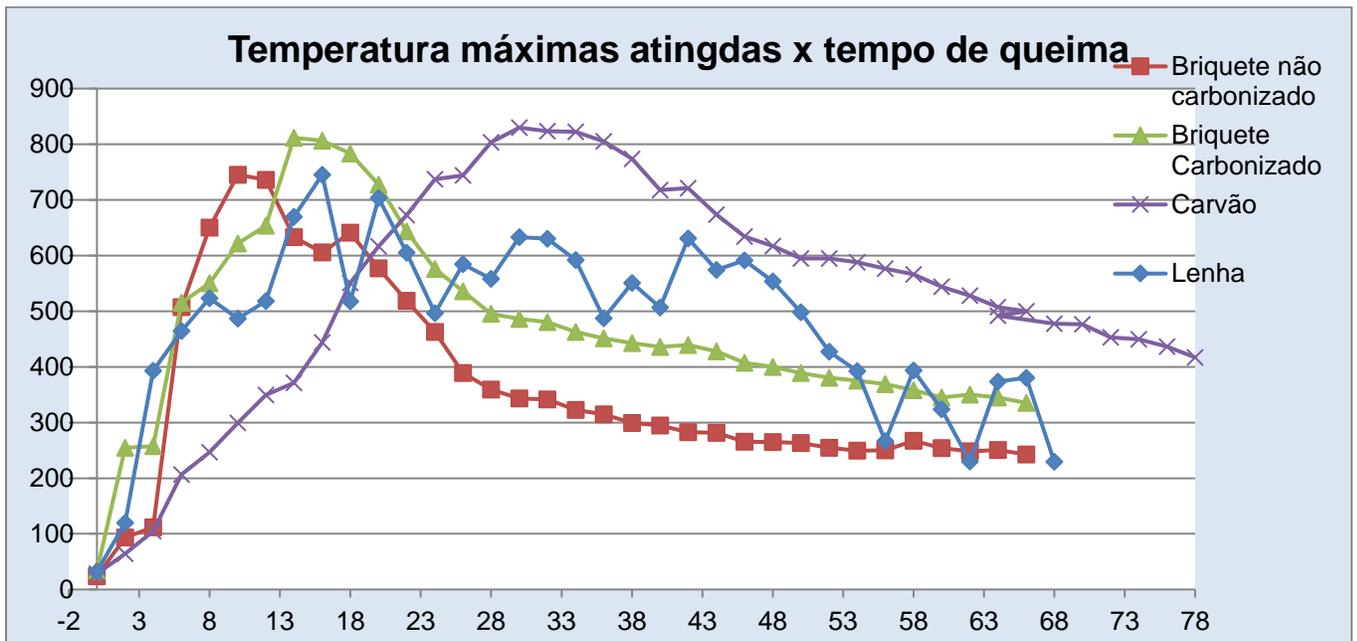


Figura 21- Gráfico da temperatura x tempo

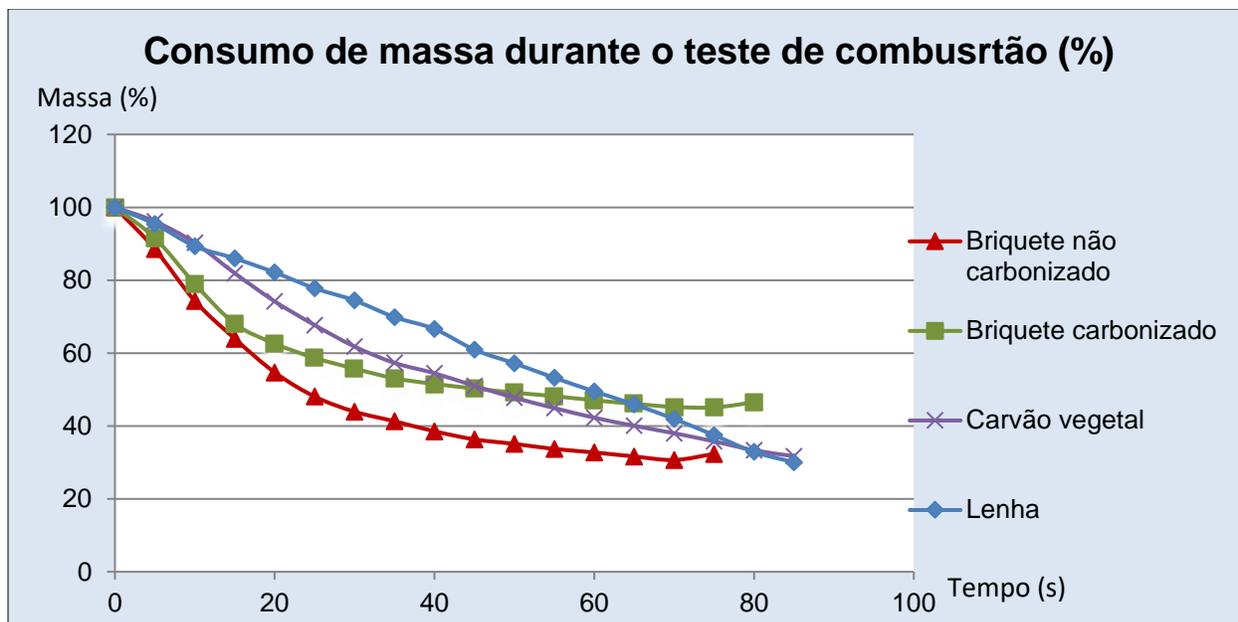


Figura 22- Consumo da massa durante a combustão

Analisando a Figura 21, que mostra a variação da temperatura em função do tempo, observa-se que os briquetes carbonizados e o carvão vegetal apresentam temperaturas máximas mais elevadas em comparação com as alcançadas pelos briquetes não carbonizados e pela lenha.

O carvão vegetal levou mais tempo para atingir a temperatura máxima, chegando a 829°C a 30 minutos após da ignição, permaneceu com temperaturas acima de 400°C por aproximadamente 60 minutos, o que torna um combustível muito eficiente para geração de energia térmica. As temperaturas máximas alcançadas aqui são superiores às encontradas por (QUIRINO & BRITO, 1991), que foram de aproximadamente 400°C.

A lenha também levou cerca de 30 minutos para atingir sua temperatura máxima, que foi a de 745.10° C. As temperaturas da lenha não mostram um decréscimo estável devido a necessidade de sempre arrumar a lenha, o que favorece o aumento da temperatura, caso contrário, a chama se apaga, o que pode resultar um declínio abrupto da temperatura.

Os briquetes atingiram suas temperaturas máximas em menos tempo em comparação com o carvão vegetal e a lenha. Os briquetes alcançaram suas temperaturas máximas

em aproximadamente 15 min, metade do tempo necessário para a lenha e o carvão vegetal. Os briquetes carbonizados atingiram uma temperatura máxima de aproximadamente 811°C e mantiveram temperaturas acima de 400°C por cerca de 40 minutos. Os briquetes não carbonizados atingiram temperaturas máximas de aproximadamente 745°C, superiores as temperaturas alcançadas por (PAULA, TRUGILHO, REZENDLE, DE ASSIS, & BALIZA, 2011), que foram de aproximadamente 400°C para briquetes de várias biomassas.

Os briquetes e o carvão vegetal não apresentaram vários picos de temperatura, o que é vantajoso, pois conforme mencionado por (QUIRINO & BRITO, 1991), para o cozimento e aquecimento, é importante uma temperatura média constante. Picos de temperatura elevada não são desejáveis, pois exigem realimentações frequentes de combustível, para manter essa temperatura, como é o caso a lenha.

Na Figura 22, é possível observar que os briquetes não carbonizados têm sua massa consumida de forma mais rápida durante a combustão em comparação com os briquetes carbonizados. Isso se deve ao facto de que os briquetes não carbonizados possuem um teor de cinzas maior e teor de carbono fixo menor, os quais influenciaram em uma queima mais rápida em comparação com os briquetes carbonizados, cujo teor de cinzas foi menor e, conseqüentemente, o teor de carbono fixo foi maior, conforme mostrado na Tabela 4, pag. 36. É sabido que quanto maior o teor de carbono fixo, maior será o tempo de resistência do combustível, pois a queima será mais lenta.

Ao observar o comportamento do carvão e da lenha, é possível perceber que a sua massa consumida em relação ao tempo foi menos rápida em comparação com os briquetes. O comportamento da massa consumida da lenha tende a ser linear nesse estudo, não porque a massa fosse consumida de uma forma quase constante ou porque a lenha apresentasse uma queima mais lenta, mas sim devido ao facto de que era sempre necessária a reposição da lenha para evitar que chama apagassem. Isso não permitiu uma análise mais detalhada da massa consumida da lenha.

No caso do carvão, esse comportamento já era esperado, pois o mesmo apresenta um maior teor de carbono fixo, e também porque (PAULA, TRUGILHO, REZENDLE, DE

ASSIS, & BALIZA, 2011) obteve um gráfico da massa consumida do carvão com um comportamento similar.

4.6. Teste de fervura

No teste de fervura da água, utilizando carvão vegetal na fase de alta potência com partida a frio, ou seja enquanto o fogão estava a temperatura ambiente e o combustível após a sua ignição, o carvão vegetal levou aproximadamente 15 minutos para que a primeira panela contendo 2500g de água iniciasse a fervura, Na fase de alta potência com partida a quente, o combustível levou cerca de 10 minutos para que a segunda panela de 2500g de água começasse a ferver. Na terceira fase que é mais importante, representando o teste de fervura que simula o longo tempo de cozimento de legumes, o carvão vegetal mostrou-se eficiente, mantendo sua temperatura estável o suficiente para ferver a água por 45 min sem variações muito significativas de temperatura conforme mostra a Figura 27, pag. 52. Isso demonstra sua potência e capacidade de sustentar o cozimento por um período prolongado.

No caso do briquete carbonizado, na fase de alta potência com partida a frio, o briquete levou cerca de 10 minutos para ferver a água. Na fase de alta potência com partida a quente, o combustível levou cerca de 8 minutos para ferver a água. Além disso, durante o teste de fervura, que é a terceira fase, a panela foi mantida fervendo por 45 minutos, conforme mostra a Figura 28, pag 53. Para o briquete não carbonizado, na fase de alta potência com partida a frio, o briquete levou cerca de 15 minutos para ferver 2500g de água. Na fase de alta potência com partida a quente, o briquete levou cerca de 10 min para ferver a segunda panela. Novamente, durante a terceira fase, o equilíbrio foi mantido, com a panela fervendo por 45 minutos, conforme mostra a Figura 29, pag. 53.

No caso da lenha, na fase de alta potência com partida a fria, levou cerca de 18 minutos para ferver 2500g de água. Na fase de alta potência com a quente, o combustível levou aproximadamente 10 min para ferver a água. Na terceira fase, a lenha apresentou mais complicações do que os outros combustíveis, conforme mostra a Figura 30, pag. 54. A lenha requer um monitoramento constante, exigindo que seja constantemente adicionada para evitar a diminuição da temperatura. Nas duas primeiras fases

(primeira e segunda), o objectivo do monitoramento é garantir que a temperatura atinja o máximo. No entanto, na terceira fase, em que é necessário manter a temperatura para ferver a água por 45 minutos, geralmente não há necessidade de monitoramento. Enquanto outros combustíveis podem manter a água fervendo sem intervenção, no caso da lenha, sem o controle, a chama pode-se apagar, o que prejudicaria o processo do cozimento. Portanto, é possível observar que os briquetes carbonizados não carbonizados de resíduos de algodão demonstram comportamento semelhante ao do carvão vegetal no teste de fervura.

4.7. Emissões

4.7.1. Emissões de CO_2 e CO

Os gráficos a seguir, mostram as emissões de CO_2 e CO dos combustíveis (briquetes, carvão e lenha).

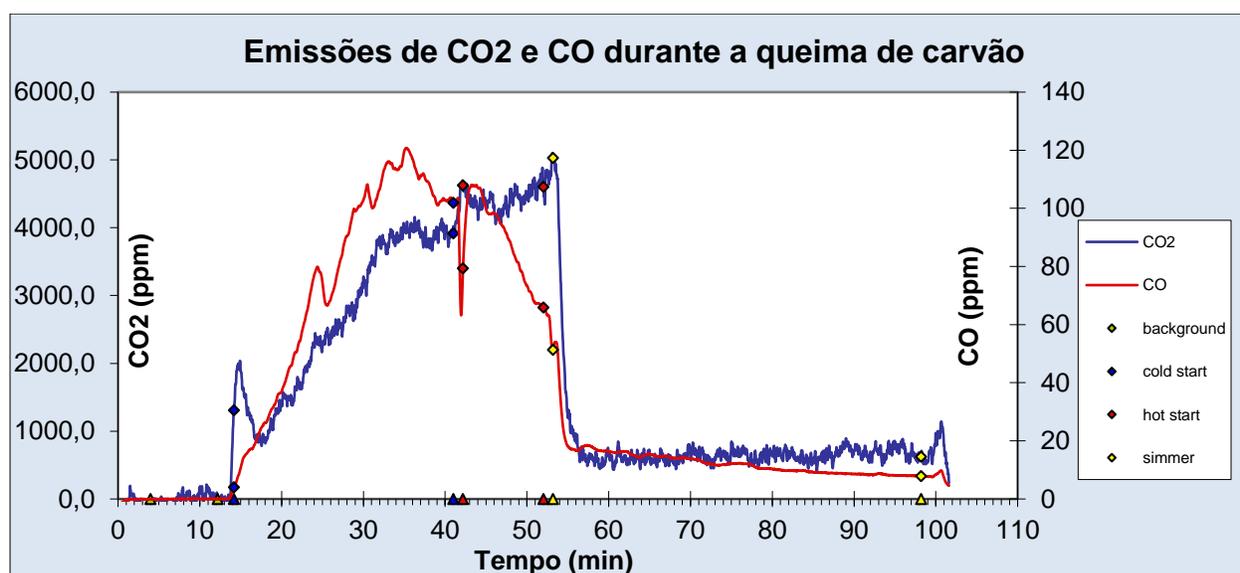


Figura 23- Emissões de CO_2 e CO durante a queima de carvão

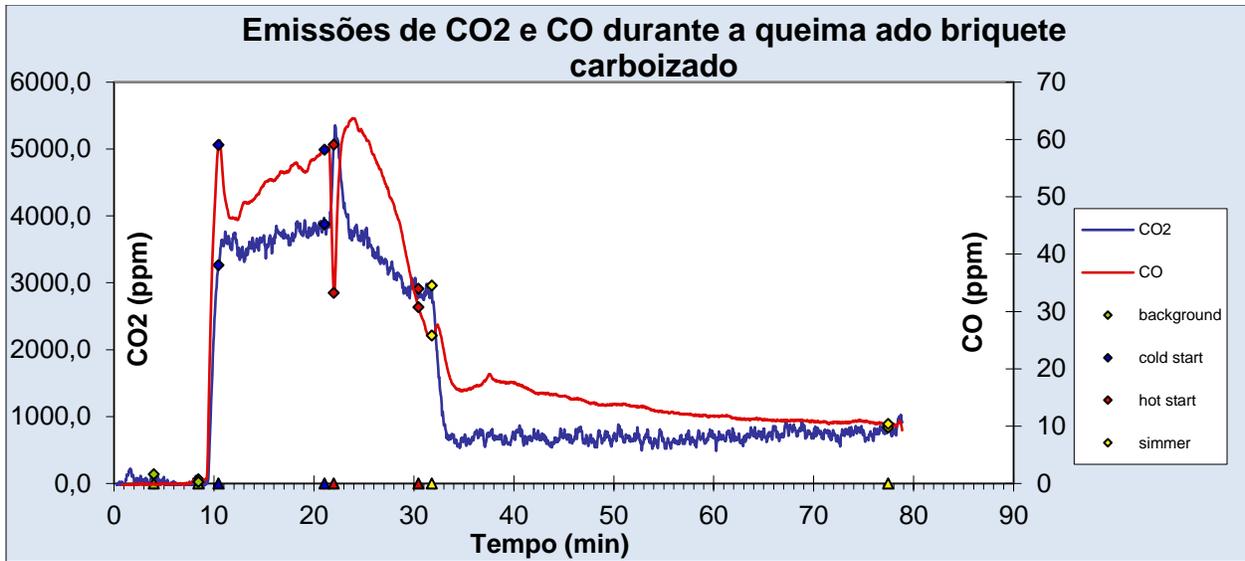


Figura 24 - Emissões de CO₂ e CO durante a queima do briquete carbonizado

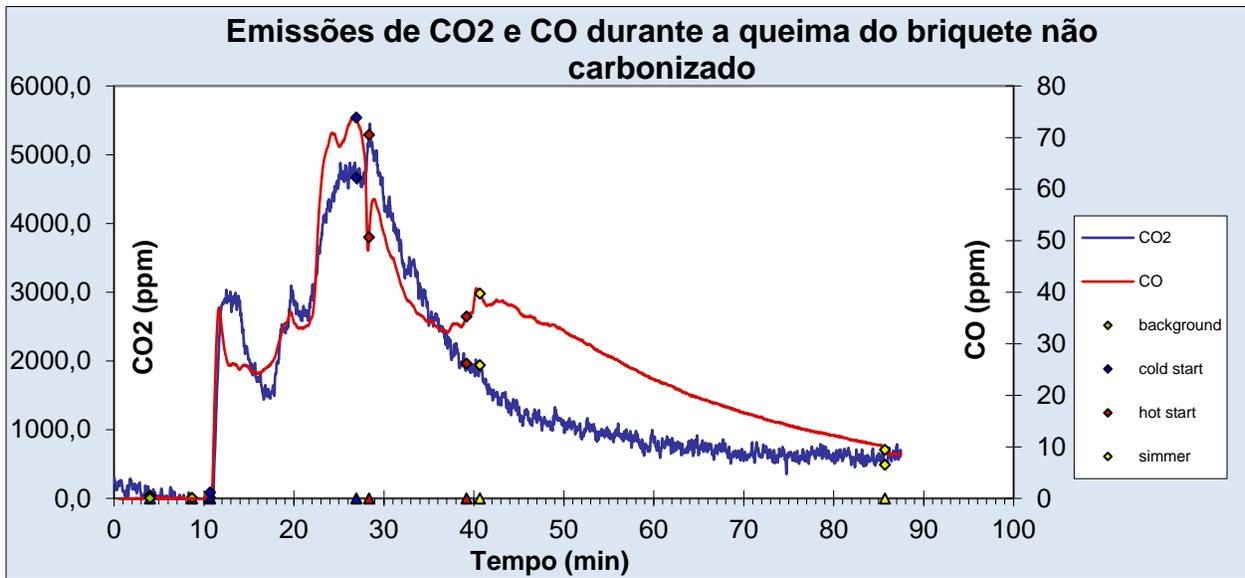


Figura 25 - Emissões de CO₂ e CO durante a queima do briquete não carbonizado

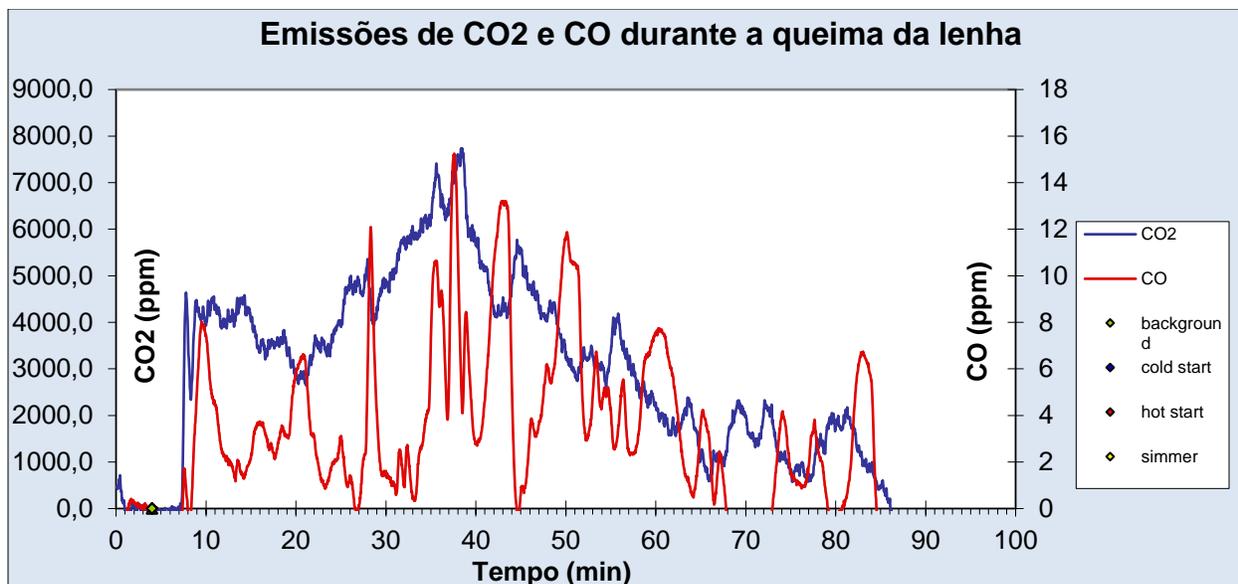


Figura 26- Emissões de CO₂ e CO durante a queima da lenha

Segundo os gráficos acima ilustrados, é possível observar que as emissões de CO₂ da lenha (Figura 26) foram superiores às do carvão vegetal (Figura 23), dos briquetes carbonizados (Figura 24) e não carbonizados (Figura 25). As emissões de CO₂ do carvão vegetal (Figura 23) foram 5000 ppm, com valores acima de 2000 ppm em um intervalo de tempo de aproximadamente 30 minutos. Já as emissões de CO₂ da lenha (Figura 26), foram ainda mais elevadas, atingindo cerca de 8000 ppm, com valores acima de 2000 ppm em um período de aproximadamente 55 minutos.

Os briquetes carbonizados (Figura 24) registaram valores de CO₂ de aproximadamente 5000 ppm. Houve valores de emissões acima de 2000 ppm em aproximadamente 25 minutos. No caso dos briquetes não carbonizados, os valores de CO₂ emitidos durante a combustão foram aproximadamente 5000 ppm, e valores acima de 2000 ppm num período de aproximadamente 30 minutos, mostrando-se assim superior ao carvão vegetal e os briquetes carbonizados.

Segundo (KUCHEN, FISCH, LEÃO, LEÃO, & FERNANDA, 2008), em ambientes fechados é recomendável 1000 ppm na concentração de CO₂. É descrito que em ambientes cujas concentrações de CO₂ estão abaixo de 400 ppm são especiais, de 400 a

600 ppm são de alta qualidade, de 600 a 1000 ppm a qualidade é média, e que concentrações superiores a 1000 ppm indicam a qualidade baixa.

A Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA) recomenda evitar que a concentração de CO_2 ultrapasse 1500 ppm em ambientes internos ocupados por pessoas inativas, pois pode provocar sonolência, redução na produtividade humana, dor de cabeça, além de acelerar os batimentos cardíacos (COMIN & AGUIAR, 2014). A norma da ABRAVA expõe que a concentração média de CO_2 no ar exterior normalmente é da ordem de 350 ppm, mas pode alcançar 500 ppm em áreas urbanas de tráfego muito intenso de veículos.

Segundo Wathes (1999) *apud* (DOS SANTOS, 2008), o limite máximo de exposição ao CO_2 para os humanos, considerando 8 horas de exposição em média, é de 5 000 ppm. Os briquetes carbonizados e o carvão vegetal mostraram-se nos limites recomendados na literatura.

Segundo (SILVEIRA, 2001), para ambientes industriais, os guidelines recomendados pelo ACGIH-1999 são de 5000 ppm ou $9 \text{ g}/\text{m}^3$ (TWA) e 30 000 ppm ou $54 \text{ g}/\text{m}^3$ (STEL/C), o que mostra que a queima de lenha ultrapassou os limites estabelecidos de emissões de CO_2 para ambientes industriais. Os briquetes carbonizados mostraram-se mais recomendáveis.

No que diz respeito às emissões de CO do carvão vegetal (Figura 23), apresentou valores mais elevados do que outros combustíveis (briquetes e lenha). Durante a combustão, o carvão vegetal emitiu aproximadamente 120 ppm de pico de CO, seguido pelos briquetes com quase a metade dos valores emitidos pelo carvão vegetal, cerca de 70 ppm de pico para os briquetes não carbonizados e 60 ppm de pico para os briquetes carbonizados. A lenha por sua vez, demonstrou ser o que menos emite CO apresentando valores significativamente menores em comparação com outros combustíveis, cerca de 16 ppm.

O limite máximo de CO recomendado por Wathes (1999) citado por (DOS SANTOS, 2008), é de 10 ppm para exposição contínua dos animais nas instalações, enquanto para os humanos, considerando-se exposições de 8 horas em média, é de 50 ppm.

Segundo (CERON, 2010), o teor de pico de emissões de CO não deve exceder 400 ppm. Observando os valores obtidos neste estudo, é possível perceber que nenhum dos combustíveis aqui queimados (carvão, lenha e briquetes) ultrapassou ou chegou à metade desse valor.

4.7.2. Emissões de material particulado PM

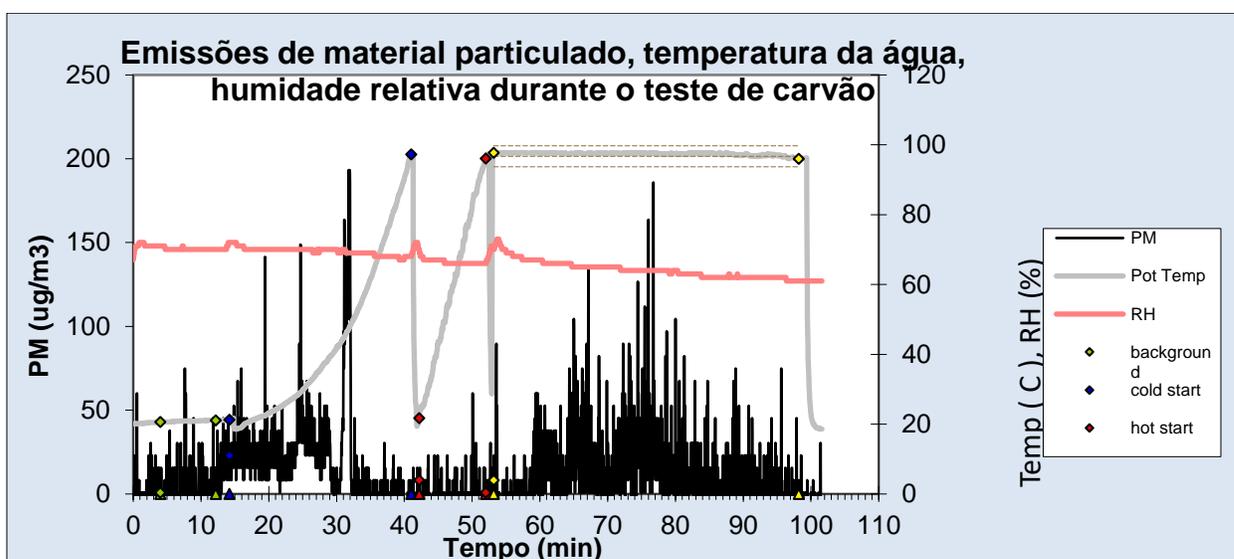


Figura 27 - Fervura e material particulado do carvão

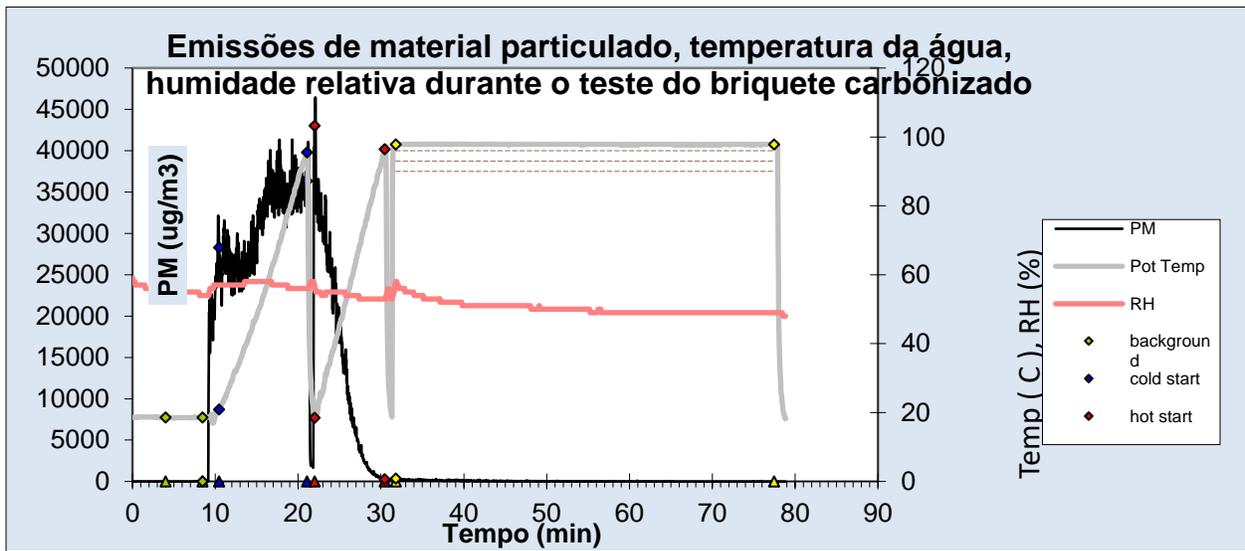


Figura 28 - Fervura e material particulado do briquete Carbonizado

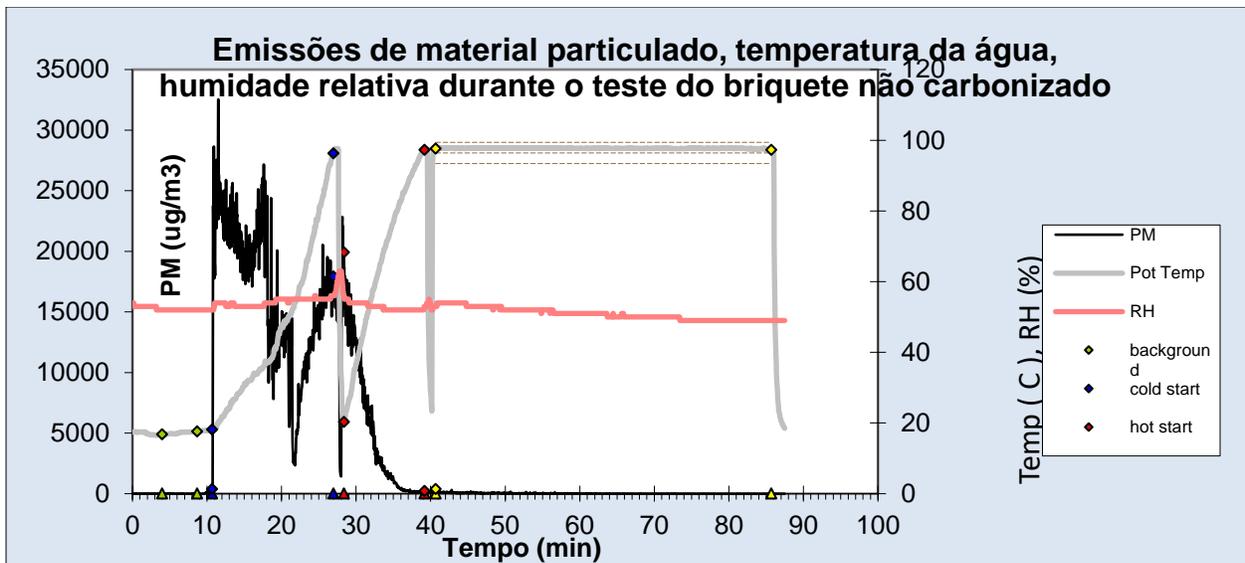


Figura 29 - Fervura e material particulado do briquete não carbonizado

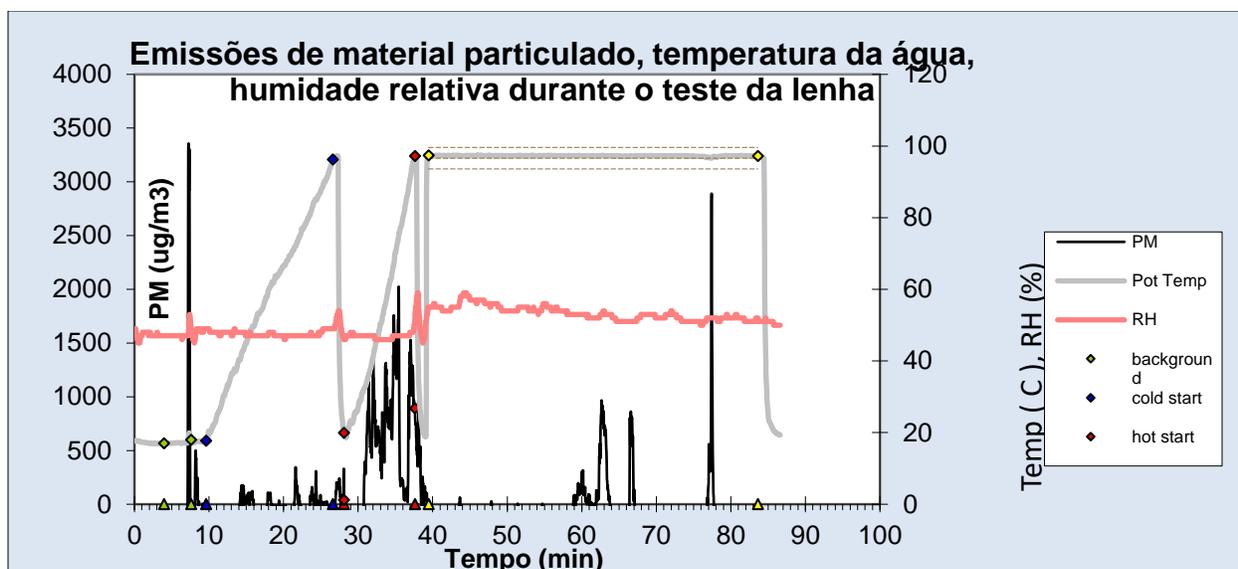


Figura 30 - Fervura e material particulado da lenha

O material particulado (MP) é reconhecido como um poluente atmosférico com grande impacto na saúde humana, sendo as principais fontes de MP as emissões veiculares, e a queima da biomassa (DE ARAUJO & DO ROSARIO, 2020). O estudo do material particulado é de grande interesse, pois quanto é emitido, piora a qualidade de ar globalmente. Prevê-se que por volta de 2050, as doenças cardiorrespiratórias agravadas pela poluição por material particulado (PM), serão a principal causa de morte relacionada ao meio ambiente em todo mundo, superando as mortes por malária, consumo de água insalubre e falta de saneamento básico (BRITO, ARAUJO, & SILVA, 2018).

Observando as figuras (Figura 27, 28, 29 e 30) é possível constatar que os briquetes apresentaram valores muito elevados do material particulado em comparação com a lenha e o carvão, cerca de trezentas vezes mais que o carvão vegetal. E essa diferença é significativa, os valores de pico de material particulado alcançados pelo carvão vegetal foram de aproximadamente $200\mu g/m^3$, emitindo aproximadamente $50\mu g/m^3$ ao longo de um período de 100 minutos, ou seja, durante toda a combustão do carvão vegetal. Para a lenha, os valores de pico de material particulado alcançados foram de aproximadamente $2000\mu g/m^3$.

Os briquetes, por sua vez, apresentaram valores elevados do material particulado. No caso do briquete carbonizado (Figura 28), foram emitidos aproximadamente 40000

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. O tempo máximo durante o qual houve emissão do material particulado foi de aproximadamente 20 min, e a emissão do MP ocorreu nos primeiros minutos. E essa emissão foi notável devido a fumaça libertada nos primeiros minutos da queima do combustível. O MP do briquete não carbonizado mostrou-se inferior ao carbonizado, porém a diferença não é significativa em comparação com o carvão ou lenha. O briquete não carbonizado apresentou valores próximos de $35000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em um período de 30 minutos, não apresentando emissões após esse intervalo de tempo.

A resolução CONAMA nº 491/2018 estabeleceu como limites máximos de material particulado a serem imitados em 24 horas, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o PM_{10} e $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $PM_{2,5}$, respectivamente (CONAMA, 2018).

O Boletim da República de Moçambique 1 série - nº 52, o limite máximo de material particulado a ser imitado por 24 horas é de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (BOLETIM DA REPÚBLICA, 2010). Tanto os briquetes quanto o carvão vegetal mostraram estar acima dos limites estabelecidos na literatura tanto para partículas de tamanho maior quanto para os de tamanho menor, sendo o carvão o que está mais próximo do limite estabelecido.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Com a elaboração do seguinte trabalho, foi possível fazer a caracterização físico-química e térmica dos resíduos do processamento do algodão, produzir e fazer a caracterização física, térmica e mecânica dos briquetes, tendo constatado o seguinte:

- O resíduo do processamento de algodão é muito oleoso, o que ajuda na interação entre partículas, permitindo assim maior interligação dos resíduos;
- Os resíduos do processamento do algodão mostraram-se muito bons quanto a compactação, o que permite uma maior densidade aparente (559.56 kg/m^3 e 648.08 kg/m^3), e conseqüentemente uma maior densidade energética ($12,835.20 \text{ MJ/m}^3$ e $12,408.40 \text{ MJ/m}^3$), para briquetes não carbonizados e carbonizados, respectivamente. É desejável que os valores das densidades (energética e aparente) sejam elevados na produção dos briquetes, isso significa maior quantidade de energia em menor espaço de volume;
- Os briquetes do resíduo do processamento do algodão, mostraram-se pouco friáveis (0.82% e 3.18%), para briquetes não carbonizados e carbonizados, respectivamente, mostrando maior resistência dos briquetes, principalmente os não carbonizados, garantindo segurança na transportação para os produtores e para os consumidores, sabendo que não chegarão ao destino em estilhaços;
- Os briquetes mostraram valores pouco baixos quanto aos seus poderes caloríficos (12.81 MJ/kg e 14.18 MJ/kg), para briquetes não carbonizados e carbonizados, respectivamente. Estes valores foram devido ao baixo valor do teor de carbono fixo, mas não os tornando inviáveis para fins energéticos;
- Quanto ao ICOM, os briquetes carbonizados e não carbonizados mostraram-se dentro dos limites recomendados na literatura (0.4293 a 0.6464);
- Os briquetes mostraram-se menos emissores de monóxido e dióxido de carbono em relação ao carvão vegetal, a lenha mostrou-se a que menos emite monóxido de carbono, e a que emite mais o dióxido de carbono. Os briquetes quanto as emissões de CO e CO₂ estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas;

- Os briquetes mostraram-se mais rápidos em ferver a água em relação ao carvão vegetal e a lenha, e isso torna eles bons concorrentes quanto a flexibilidade, e também não apresentaram variações bruscas de temperatura, o que é bom para o cozimento de alimentos;
- Os briquetes carbonizados e não carbonizados apresentaram temperaturas máximas elevadas (811°C e 745°C), respectivamente, e é desejável que as temperaturas sejam elevadas para o cozimento de alimentos;
- Os briquetes dos resíduos do processamento do algodão, no caso dessa matéria-prima em estudo, apresentaram um elevado teor de cinzas (32.50% e 32.34%), para os briquetes não carbonizados e carbonizados, respectivamente, o que remete a um estudo mais aprofundado para saber como melhorar o combustível quanto ao teor de cinzas;
- Os briquetes emitiram maiores quantidades de material particulado, com valores que chegam a ser 300 vezes maior que os recomendados na literatura, e isso é justificável devido a adição de fertilizantes, pesticidas, insecticidas para o crescimento da planta, o que significa que o resíduo do processamento do algodão ele pode ser uma fonte ideal para geração de energia, desde que no seu processo de produção haja menos adição de materiais inorgânicos, e isso pode-se provar pelo facto de outros autores terem obtido valores muito baixos de teores de cinzas, o que significa que houve pouca adição de fertilizantes.

5.1.2. Recomendações

- Devido a maior quantidade de óleo, pode-se fazer primeiro a extracção do óleo para a produção biodiesel, e a biomassa restante produzir briquetes, talvez assim haveria menor liberação de fumaça durante a combustão;
- As fibras não processadas resultantes da preparação do algodão, lã e fibras sintéticas podem ser usadas como enchimento de almofadas e colchões;
- Para fins energéticos, garantir que a biomassa tenha pouca matéria inorgânica (fertilizantes, pesticidas, insecticidas...) no processo do plantio e crescimento das plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENDARTCHUK, R. (2021). *Análise da Gestão e Reaproveitamento dos Resíduos Sólidos no Brasil: caso de uma empresa têxtil*. Blumenau.
- AVELAR, N. V. (2012). *Potencial dos resíduos sólidos da indústria Têxtil para fins energéticos*. Minas Gerais.
- BATISTA, M. G. (2017). *Aproveitamento da casca de coco e podas de árvores no processo de briquetagem*. Pombal-PB.
- BENITES, V. D., TEIXEIRA, W. G., REZENDE, M. E., & PIMENTA, A. S. (s.d.). *Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as terras pretas de Índio*.
- BOLETIM DA REPÚBLICA, . (2010). *12^o Suplemento*.
- BOROWYCZ, M., DA ROCHA, S. H., BRUNS, D., LEMOS, L. R., DA SILVA, G. L., ASSUNÇÃO, G. B., & STEINMETZGER, T. (2018). *Análise da resistência mecânica dos briquetes de resíduos de biomassa para utilização em processos metalúrgicos*. São Paulo.
- BRITO, P. H., ARAUJO, R. S., & SILVA, G. M. (2018). *Composição química do material particulado atmosférico: Uma revisão da literatura*. Ceará.
- CANTO, S. A. (2014). *Uma nova proposta de avaliação de fogões à biomassa*. Belém.
- CARNEIRO, A. C., VITAL, B. R., DONATO, D. B., DA SILVA, C. M., MAGALHÃES, M. A., & ARAUJO, C. A. (2015). *Propriedades de briquetes obtidos de finos de carvão vegetal*. Brasília.
- CERON, L. P. (2010). *Controle do excesso de ar em processos de combustão*.
- CHAVES, A. M., DO VALE, A. T., MELIDO, R. C., & ZOCH, V. P. (2013). *Características energéticas da madeira e carvão vegetal de colnes de eucalyptus spp*. Brasília.
- COMIN, T. T., & AGUIAR, M. L. (2014). *Monitoramento de dióxido de carbono em um ambiente escolar*. Florianópolis.
- CONAMA, C. N. (2018). *Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018*.
- COSTA, A. C., OLIVEIRA, A. C., FREITAS, A. J., LEAL, C. S., & PEREIRA, B. L. (2017). *Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializados em cuiabá*. Cuiabá- Brasil.

- COSTA, L. R. (2016). *Caracterização e compactação de resíduos lignocelulósicos visando a produção de biocombustíveis sólidos*. Londrina.
- DA SILVA, M. S., DA SILVA SANTOS, D. A., SILVA, F. P., & BERRÊDO, V. C. (2015). *Gestão de resíduos de uma indústria de produção de fios de linha através da aplicação da produção mais limpa*. Rondonópolis.
- DE ANDRADE, L. A. (2015). *Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar*. Uberlândia.
- DE ARAUJO, J. M., & DO ROSARIO, N. M. (2020). *Poluição atmosférica associada ao material particulado no estado de São Paulo: Análise baseada em dados de satélite*. São Paulo.
- DE SOUSA DIAS, J. M., DE SOUSA, D. T., BRAGA, M., ONOYAMA, M. M., MIRANDA, C. H., BARBOSA, P. F., & ROCHA, J. D. (2012). *Produção de briquetes péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais*. Brasília.
- DE SOUSA, E. C., PIMENTA, A. S., & DA COSTA, D. S. (2017). *caracterização física de briquetes produzidos a partir de resíduos de bambu e serragem de angelim-vermelho*.
- DE SOUSA, F., & DO VALE, A. T. (2016). *Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem*.
- DE SOUZA, F., & DO VALE, A. T. (2016). *Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem*.
- DO VALE, A. T., MENDES, R. M., AMORIM, M. R., & DANTAS, V. F. (2011). *Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinho manso (*Jatropha curcas*)*. Brasília.
- DOS SANTOS, P. A. (2008). *Qualidade do ar, conforto térmico e desempenho de frango de cort em dois sistemas de aquecimento e de ventilação*. Minas Gerais-Brasil.
- FERNANDEZ, B. O., GONÇALVES, B. F., PEREIRA, A. C., HANSTED, A. L., PÁDUA, F. A., DA RÓZ, A. L., & YAMAJI, F. M. (2016). *Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa*. Sorocaba-SP.
- FRANCESQUETT, J. Z., DOPKE, H. B., DA COSTA, A. B., KIPPER, L. M., & FERREIRA, M. F. (2013). *Determinação do poder calorífico de amostras de gasolina*.

utilizando espectroscopia no inflavermelho próximo e regressão multivariada. Porto Alegre.

GHIMARÃES, L. K. (2021). *Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão.* Belém.

HABITZREITER, T. L., ADAMI, P. F., BRUN, E. J., BATISTA, V. V., FERREIRA, M. L., & GIACOMEL, C. L. (2019). *Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos.* Paraná-Brasil.

HEMPE, C., & NOGUERA, J. O. (2012). *A educação ambiental e os resíduos sólidos urbanos.*

IndustriaPedia.net. (s.d.). Acesso em 28 de 08 de 2023, disponível em <http://industriapedia.net/o-que-e-densidade-aparente-pb/amp/>

KUCHEN, E., FISCH, M. N., LEÃO, M., LEÃO, T. B., & FERNANDA, É. (2008). *Stop monitoring. Avaliação da qualidade do ar em edifícios de escritório.*

LOBATO, C. C., REIS, M. P., DA SILVA, L. F., PENISCH, D. C., & NAGAISHI, T. Y. (2017). *Aproveitamento de biomassa de coco para uso energético.*

MAGALHÃES, H. C. (2022). *Avaliação dos parâmetros físico-químicos no controle de qualidade dos comprimidos de paracetamol : uma revisão da literatura.* Porto Alegre.

MANICO, J., LEONIDO, L., & COUVEIA, L. B. (2020). *Projeto de carvão sustentável- um projeto de gestão ambiental com uso dos briquetes nas comunidades urbanas e periurbanas em Angola-Huambo.*

MATOS, J. P. (2021). *Estudo e caracterização das cascas de coco verde e coco seco para produção de briquetes e utilização em equipamentos de combustão de combustíveis sólidos.* Maputo.

MIOLA, B., FROTA, M. M., UCHÔA, K. M., OLIVEIRA, A. G., & DE ASSIS LEONARDO FILHO, F. (2020). *Aproveitamento energético dos resíduos de cascas de coco verde para produção de briquetes.* Fortaleza.

MORAIS, D. M. (2007). *Briquetes de resíduos lignocelulósicos como potencial energético para a queima de blocos cerâmios: aplicação em uma indústria de cerâmica vermelha que abastece o distrito federal.* Brasília.

MUZEL, S. D., DE OLIVEIRA, K. A., HANSTEAD, F. A., PRATES, G. A., & GOVEIA, D. (2014). *Poder calorífico da madeira de Eucalyptus grandis e da Hevea brasiliensis.* São Paulo.

- NAKASHIMA, G. T., AKIYAMA, W. H., SANTOS, L. R., PADILLA, E. R., BELINF, G. B., VARANDA, L., . . . YUMAJI, F. M. (2016). *Briquetes produzidos a partir do aproveitamento de resíduos provenientes do aterro de residuos inertes da cidade de sorocaba*. Sorocaba- São Paulo.
- OHANA, C. C. (2012). *Utilização dos resíduos do processamento da teca (tectona grandis L.F) da produção de briquetes*. Seropédica, RJ.
- OLIVEIRA, L. H., BARBOSA, P. V., LIMA, P. A., YAMAJI, F. M., & JUNIOR, C. R. (2017). *Aproveitamento de resíduos madeireiros de pinus sp, com diferentes granulometrias para a produção de briquetes*. Goiânia.
- ONUEGBU, T. U., EKPUHOBI, U. E., OGBU, I. M., OKEOMA, M. O., & OBUMSELU, F. O. (2011). *Comparative studies of ignition time and watter bolling test of coal and biomass briquettes blend*. Ahambra State.
- PADILLA, E. R., PIRES, I. C., YAMAJI, F. M., & FANDINO, J. M. (2016). *Produção e caracterização físico-mecânica de briquetes de fibra de coco e palha de cana-de-açucar*. Colômbia.
- PAULA, L. E., TRUGILHO, P. F., REZENDLE, R. N., DE ASSIS, C. O., & BALIZA, A. E. (2011). *Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos*. Colombo.
- PEREIRA, M. P., COSTA, E. V., PEREIRA, B. L., CARVALHO, A. M., CARNELIO, A. D., & OLIVEIRA, A. C. (2016). *Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos*. colombo.
- PEREIRA, T. V., & SEYE, O. (2011). *Caracterização física termica de biomassa local*.
- PROTA, L. (2014). *Gerenciamento dos resíduos sólidos da construção civil*.
- QUIRINO, W. F., & BRITO, J. O. (1991). *Características e índice de cobustão de briquetes e carvão vegetal*. Brasília.
- RECH, J., CAPELARI , R., BERNARDO, J. L., & DE MOLINER, C. E. (2017). *A moagem e análise granlométrica*. Caxias do sul.
- República de Moçambque, Conselho de Ministros. (2006). *Decreto nº 13/2006 de 16 de junho*.
- ROCHA, P. M., BONDI, D. P., LEITE, R. L., & PINHEIRO, B. C. (2015). *geração de energia a partir de briquetes produzidos de pó de serragem de MDF (Medium Density Fiberboard) proveniente de uma fábrica de moveis*.

- RODRIGUES, C. F., & MOURA, J. H. (2023). *Resíduos de espécies nativas da amazônia para produção de carvão vegetal*. Paragominas.
- SCHUTZ, F. C., ANAMI, M. H., & TRAVESSINI, R. (2010). *Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos lignocelulósicos da agroindústria*. Paraná.
- SILVA, D., PÁDUA, F., BOTARO, V. R., TOMELERI, J., SANTOS, L. R., & ALESI, L. S. (2017). *Densidade a granel e caracterização química do línter de algodão *Gossypium hirsutum* L.* Florianópolis.
- SILVEIRA, M. G. (2001). *Avaliação da qualidade do ar em um grande aeroporto na cidade de rio de janeiro*. Rio de Janeiro.
- SPADIM, E. R., EUFRATE JUNIOR, H. D., ARRUDA, N. L., GUERRA, S. P., & LEONELLO, E. C. (2020). *Determinação do índice de combustão e da taxa de queima de briquetes de resíduos lignocelulósicos por meio de um aplicativo de computador com coleta de dados automatizado*. São Paulo.
- TELEKEN, J. G., BONASSA, G., SCHNEIDER, L. T., PARISSOTO, E. I., & DE OLIVEIRA, A. F. (2015). *Potencial dendroenergéticos de combustíveis sólidos de *eucalyptus grandis**. Florianópolis.
- TOVARES, S. R., & SANTOS, T. (2013). *Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para produção de biocombustíveis sólidos*.
- VAZ, L. H. (2013). *Estudo comparativo de equivalência farmacéutica e perfil de dissolução in vitro do paracetamol fabricado no Brasil e na Holanda*. Criciúma.

ANEXOS

ANEXO 1 - Teste de fervura, procedimentos preliminares para iniciar o teste de fervura e índice

Procedimentos preliminares para iniciar o teste de fervura e emissões

- i. Ligar o computador;
- ii. Conectar a caixa do sensor à fonte de alimentação e certificar-se de que esteja devidamente aterrada;
- iii. Conectar a caixa do sensor à porta correcta;
- iv. Abrir o programa de emissões *Logger*, e seguir as instruções. Em seguida, inserir o nome do arquivo específico e activar a reinicialização da caixa do sensor, conforme o necessário;
- v. Abrir o programa gráfico ao vivo (livegraph) do csv file criado por cada teste;
- vi. Nivelar e zerar o medidor magnético;
- vii. Ligar o exaustor entre 1 a 4 minutos após o início do registro de dados;
- viii. Registrar a leitura do medidor magnético de fluxo completo na folha de dados;
- ix. Deixar o sistema funcionar por pelo menos 10 minutos para fazer uma leitura em segundo plano;
- x. Acender o fogo no biocombustível e iniciar o teste;
- xi. Concluído o teste deve-se fechar todos os programas.

Processamento de dados do teste de fervura e emissões

- i. Abrir o arquivo Excel (.xls) de processamento WBT ou CCT apropriado;
- ii. Inserir o nome do arquivo de dados na caixa de entrada na planilha de importação de dados e clicar em “P Data”;
- iii. Inserir dados da planilha WBT ou CCT;
- iv. Verificar se o período de fundo está preciso;
- v. Verificar se há erros nos dados;

Copiar a coluna de resultados em um resumo na série de teste.



Figura A1.1 - panela suja pelos briquetes 1; fumaça do briquete- 2, panela suja pela lenha - 3

ANEXO 2 – Determinação da humidade e teor de humidade da amostra

Tabela A.2.1 – Determinação da humidade da amostra (antes da moagem)

	Nº de teste	Massa (gramas)	Humidade (%L)	Tempo de leitura (min)
Briquete não carbonizado	1	1.024	8.9	3.4
	2	1.01	7.43	5
	3	1.006	7.16	4.6

Tabela A.2.2 – Determinação da humidade da amostra

	Nº de testes	Massa (gramas)	Humidade (%L)	Tempo de leitura (min)
Briquete não carbonizado	1	1.016	7.28	5.8
	2	1.018	6.78	5.7
	3	1.006	7.16	5.8
Briquete Carbonizado	1	1.003	3.11	4.1
	2	1.014	4.17	3.9
	3	1.001	3.9	4.4

Tabela A.2.3 - Determinação do teor de humidade (após a secagem para os briquetes não carbonizados e os briquetes não carbonizados após serem humedecidos)

	Nº de testes	Massa (gramas)	Tempo de leitura (min)	Teor Humidade (%L)	Teor de Humidade média (%L)
Briquete não carbonizado	1	1.016	5	5.27	5.74
	2	1.018	4.6	5.9	
	3	1.006	5	6.05	
Briquete Carbonizado	1	1.003	5.1	10.32	10.2
	2	1.014	4.9	10.18	
	3	1.001	5.3	10.1	

Tabela A.2.4 - Distribuição granulométrica da amostra vindo da fábrica, antes da moagem

Massa total (g)	Abertura (mm)	Massa (g)	Fracção	Percentagem
275	4	5.24	0.018997897	1.90%
	2.5	9.674	0.035073599	3.51%
	1.18	24.707	0.089576535	8.96%
	1	13.458	0.048792691	4.88%
	0.761	47.75	0.173120151	17.31%
	0.6	21.046	0.076303386	7.63%
	0.5	28.166	0.102117323	10.21%
	0.075	119.786	0.434290479	43.43%
	<<0.075	3.91	0.014175912	1.42%
	Total		273.737	0.992447973

Tabela A.8 - Distribuição granulométrica da biomassa depois da moagem

Massa total (g)	Abertura (mm)	Massa (g)	Fracção	Percentagem
150	1	0.52	0.003466667	0.35%
	0.761	0.967	0.006446667	0.64%
	0.6	9.26	0.061733333	6.17%
	0.5	9.503	0.063353333	6.34%
	0.075	98.837	0.658913333	65.89%
	<<0.075	30.837	0.20558	20.56%
	Total		149.924	0.999493333

ANEXO 3 – Características físicas, químicas e térmicas das amostras

Tabela 9 - Densidade a granel das amostras (carbonizado e não carbonizado)

		Massa do recipiente (g)	Massa do recipiente com a amostra (g)	Massa da amostra (g)	Volume do recipiente (ml)	Densidade a granel kg/m^3	Densidade Média (kg/m^3)
Briquete não carbonizado	1	6.475	22.677	16.202	25	648.08	639.22
	2	6.792	22.551	15.759	25	630.36	
Briquete carbonizado	1	6.474	20.362	13.888	25	555.52	557.54
	2	6.798	20.787	13.989	25	559.56	

Tabela A.3.2 – Teores de cinza da biomassa carbonizados de acordo com o tempo de residência

Ref. do cadinho	Massa do cadinho vazio (g)	Massa Da amostra (g)	Massa do cadinho + amostra	Tempo de residência (horas)	Massa após carbonização (g)	Massa restante (g)	Teor de Cinzas %	Média (%)
OA1	134.903	10.110	145.013	1	138.672	6.341	37.279920	38.865
OA1-2	132.603	10.070	142.673	1	136.619	6.054	39.880834	
OA3	117.528	10.108	127.636	1	121.514	6.122	39.434111	
OA2	123.390	10.035	133.425	2	126.662	6.763	32.605879	32.3366
OA2-2	128.383	10.052	138.435	2	131.635	6.800	32.351770	
OA3-2	123.271	10.043	133.314	2	126.490	6.824	32.052175	
14	159.971	10.089	170.060	3	163.799	6.261	37.942313	37.1171
15	139.828	10.055	149.883	3	143.475	6.408	36.270512	
	166.980	10.092	177.072	3	170.728	6.344	37.138327	

Tabela A.3.3 - Teor de cinza da biomassa não carbonizada

Ref. do cadinho	Massa do cadinho vazio (g)	Massa Da amostra (g)	Massa do cadinho + amostra (g)	Massa restante (g)	Teor de Cinzas %	TC Médio (%)
M1	279.287	20.000	299.287	285.759	32.36	32.504841
M2	274.062	20.019	294.081	280.573	32.5241	
M3	276.342	20.012	296.354	282.872	32.63042	

Tabela A.3.4 - Teor de voláteis da biomassa não carbonizada

Ref	Massa do cadinho vazio (g)	Massa Da amostra (g)	Massa do cadinho + amostra	Massa final cadinho + amostra (g)	Massa restante (g)	Teor de Voláteis %	Média
5	486.769	10.037	496.806	491.418	5.388	53.6813789	54.6
2	484.910	10.018	494.928	489.493	5.435	54.2523458	
6	482.852	10.038	492.890	487.273	5.617	55.957362	

Tabela A.3.5 - Teor de voláteis da biomassa carbonizada

Ref	Massa do cadinho vazio (g)	Massa Da amostra (g)	Massa do cadinho + amostra	Massa final cadinho + amostra (g)	Massa restante (g)	Teor de Voláteis %	Tempo de residência (h)	Média Teor de voláteis (%)
2	484.980	10.025	495.005	491.449	3.556	35.4713217	1	36.12
5	486.645	10.035	496.680	493.014	3.666	36.5321375	1	
6	483.241	10.048	493.289	489.635	3.654	36.3654459	1	
1	490.229	10.084	500.313	495.482	4.831	47.9075764	2	48.02
1	489.864	10.080	499.944	495.020	4.924	48.8492063	2	
3	483.157	10.104	493.261	488.481	4.780	47.3079968	2	
2	485.620	10.053	495.673	492.116	3.557	35.3824729	3	34.88
3	483.190	10.077	493.267	489.818	3.449	34.2264563	3	
5	486.762	10.057	496.819	493.297	3.522	35.0203838	3	

Tabela A.3.6 – Teores de cinza, voláteis, carbono fixo e poder calorífico (superior, inferior e útil)

Material	TC (%)	TV (%)	TCF (%)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCU (MJ/kg)
Não carbonizada	32.50484	54.63036	12.86479	12.8123278	10.62206	9.254064
Carbonizada 1 hora	38.86495	36.12297	25.01208	14.1726942	12.260958	10.75808
Carbonizada 2 horas	32.33660	48.02159	19.64179	14.1796807	12.020376	10.5373
Carbonizada 3 horas	37.11705	34.87644	28.00651	15.0508261	13.09674	11.52508

ANEXO 4 – Características físicas, mecânicas e térmicas dos briquetes e índice de combustão

Tabela A.4.1 - Densidade aparente dos briquetes

Material	Massa do briquete (g)	Volume (m ³)	Densidade aparente (Kg/m ³)	Densidade aparente média (Kg/m ³)
1 Briquete não carbonizado	59.88	42917.4118	1395.237911	1384.11
2 Briquete não carbonizado	59.398	43248.8283	1373.401369	
3 Briquete não carbonizado	59.384	42917.4118	1383.68083	
1 Briquete Carbonizado	62.656	53699.0816	1166.798355	1177.57
2 Briquete Carbonizado	62.767	53575.7075	1171.557091	
3 Briquete Carbonizado	62.58	52396.568	1194.353035	

Tabela A.4.2 - Teste de friabilidade dos briquetes não carbonizados e carbonizados

	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa perdida (%)	Media (%)
Briquete não carbonizado	59.976	59.477	0.83%	0.82%
	59.512	58.983	0.89%	
	60.187	59.739	0.74%	
Briquete carbonizado	62.296	59.961	3.75%	3.18%
	63.347	61.587	2.78%	
	63.305	61.389	3.03%	

Tabela A.4.3 - Índice de combustão dos briquetes, carvão vegetal e lenha

	tempo (Tacima de 150°C) em min	Tmax (°C)	Massa inicial (g)	Massa final(g)	A	B	C	ICOM	ICOM Médio
Briquete não carbonizado Teste 1	84	624.1	724	234	0.700	0.2403	0.3232044	0.5205	0.4629
Briquete não carbonizado Teste 2	75	747.1	660	221	0.625	0.2008	0.3348485	0.3748	
Briquete não carbonizado Não os tornando inviáveis para fins energéti-	78	647.5	760	232	0.650	0.2317	0.3052632	0.4933	

cos carbonizado Teste 3									
Briquete Carbonizado	97	811.7	714	223	0.808	0.1848	0.3123249	0.4783	
Briquete Carbonizado	95	805.5	853	250	0.792	0.1862	0.2930832	0.5030	
Briquete Carbonizado	91	809.5	650	205	0.758	0.1853	0.3153846	0.4455	0.4756
Carvão Teste 1	85	885	492	150	0.708	0.1695	0.304878	0.3938	0.5793
Carvão Teste 2	82	756	460	90	0.683	0.1984	0.1956522	0.6930	
Carvão Teste 3	84	829.5	432	84	0.700	0.1808	0.1944444	0.6510	
Lenha Teste 1	68	653.1	790	179	0.567	0.2297	0.2265823	0.5744	0.4786
Lenha Teste 2	74	745.5	806	242	0.617	0.2012	0.3002481	0.4133	
Lenha Teste 3	71	607.8	1074	350	0.592	0.2468	0.3258845	0.4481	

ANEXO 5 – Dados completos dos testes de fervura e emissões

As tabelas abaixo mostram os dados completos do teste de fervura dos três combustíveis (Carvão, Brique e lenha), tendo tudo detalhado para um estudo mais aprofundado do leitor, os quais muitos destes resultados não foram discutidos nesse trabalho pois não são objectivos específicos deste trabalho mas podem interessar o leitor e por meio destes fazer comparações mais detalhadas quanto a eficiência dos combustíveis.

Tabela A.5.1 - Teste de fervura do carvão vegetal, dados completos

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3	TEST # 23C03/007
All cells are linked to data worksheets, no entries are required	
Stove type/model	jikokoa burn
Location	BECT-CPE
Fuel description	Carvão
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;
Ambient temperature	24.3°C; 23.1°C; 28.3°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C; °C

1. HIGH POWER TEST (COLD START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	Min	25	26	25	25	0.6	2.3%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	Min	23	25	24	24	0.6	2.3%
Burning rate	g/min	8	8	8	8	0.2	2.2%
Thermal efficiency	%	15%	15%	17%	15.6	0.87%	0.06%
Specific fuel consumption	g/liter	82	86	80	83	3.4	4.1%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	77	82	76	78	3.1	4.0%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,160	2,302	2,140	2,201	88.4	4.0%
Firepower	Watts	3,804	3,862	3,697	3,788	83.8	2.2%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	Min	11	10	10	10	0.6	5.6%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	Min	10	9	10	10	0.6	5.6%
Burning rate	g/min	5	5	5	5	0.3	5.7%
Thermal efficiency	%	56%	67%	61%	0.6095225	0.1	8.9%

Specific fuel consumption	g/liter	23	19	21	21	1.7	8.3%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	21	18	20	20	1.7	8.4%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	603	511	577	564	47.5	8.4%
Firepower	Watts	2,383	2,222	2,488	2,365	134.4	5.7%

3. LOW POWER (SIMMER)	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	0	1	2	1	0.9	70.0%
Thermal efficiency	%	71%	25%	62%	52.3	24.45%	0.47%
Specific fuel consumption	g/liter	7	25	56	29	24.7	84.2%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	206	696	1,581	828	697.0	84.2%
Firepower	Watts	178	592	1,007	592	414.7	70.0%
Turn down ratio	--	21.40	6.52	3.67	11	9.5	90.4%

BENCHMARK VALUES (for 5L)		Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	G	282	373	521	392	121.0	30.9%
Energy Use Benchmark Value	kJ	7,939	10,511	14,698	11,049	3,411.3	30.9%

IWA PERFORMANCE METRICS	Units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	35.5%	40.7%	38.6%	38.3%	2.60%	6.79%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min·L)	0.005	0.015	0.035	0.018	1.55%	84.22%
High Power CO	g/MJ	12.1	16.8	11.3	13.4	2.99	22.26%
Low Power CO	g/(min·L)	0.050	0.057	0.192	0.100	0.08	80.17%
High Power PM	mg/MJ	5	3	1	3	1.97	70.27%
Low Power PM	mg/(min·L)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.04	94.04%
Indoor CO Emissions	g/min	0.582	0.846	0.555	0.661	0.16	24.29%
Indoor PM Emissions	mg/min	0.2	0.1	0.0	0.1	0.09	88.05%

Tabela A.5.2 – Resultados do teste de fervura do briquete carbonizado, dados completos

**WATER BOILING TEST -
VERSION 4.2.3**

TEST # 23B03/007

All cells are linked to data worksheets, no entries are required

Stove type/model jikokoa burn

Location BECT-CPE

Fuel description	Briquete	Carbonizado					
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;						
Ambient temperature	23.4°C; 23.4°C; 21.2°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C						

1. HIGH POWER TEST (COLD START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	24	19	11	18	6.6	36.4%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	22	18	10	17	6.0	35.6%
Burning rate	g/min	11	9	19	13	5.1	39.3%
Thermal efficiency	%	12%	18%	15%	14.8	2.83%	0.19%
Specific fuel consumption	g/liter	104	71	83	86	16.5	19.2%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	97	67	79	81	14.9	18.4%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	2,734	1,903	2,221	2,286	419.7	18.4%
Firepower	watts	5,055	4,373	8,806	6,078	2,387.1	39.3%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	10	10	9	10	0.6	6.0%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	9	9	9	9	0.5	5.4%
Burning rate	g/min	12	10	12	12	1.2	10.4%
Thermal efficiency	%	25%	30%	28%	0.2781958	0.0	10.5%
Specific fuel consumption	g/liter	50	41	44	45	4.4	9.7%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	47	39	42	43	3.9	9.1%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,319	1,101	1,188	1,203	110.0	9.1%
Firepower	watts	5,821	4,799	5,727	5,449	564.9	10.4%

3. LOW POWER (SIM-MER)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	1	1	1	1	0.1	7.7%
Thermal efficiency	%	34%	30%	32%	32.1	2.25%	0.07%
Specific fuel consumption	g/liter	18	21	20	19	1.5	8.0%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	495	579	558	544	43.6	8.0%
Firepower	watts	425	494	474	464	35.6	7.7%
Turn down ratio	--	11.90	8.86	18.58	13	5.0	37.9%

BENCHMARK VALUES (for 5L)							
		Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	g	447	369	401	406	39.3	9.7%
Energy Use Benchmark Value	kJ	12,611	10,404	11,311	11,442	1,108.9	9.7%

IWA PERFORMANCE METRICS							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	18.4%	24.1%	21.5%	21.3%	2.87%	13.46%

Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min·L)	0.011	0.013	0.012	0.012	0.10%	8.01%
High Power CO	g/MJ	10.0	5.7	5.8	7.2	2.45	34.25%
Low Power CO	g/(min·L)	0.079	0.062	0.059	0.067	0.01	15.98%
High Power PM	mg/MJ	2,740	884	2,272	1965	965.35	49.13%
Low Power PM	mg/(min·L)	0.1	0.3	0.1	0.2	0.13	68.99%
Indoor CO Emissions	g/min	0.575	0.375	0.520	0.490	0.10	21.04%
Indoor PM Emissions	mg/min	147.9	60.2	195.8	134.6	68.77	51.09%

Tabela A.5.3 – Resultados do teste de fervura do briquete não carbonizado, dados completos

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3	TEST #	23B03/007
<u>All cells are linked to data worksheets, no entries are required</u>		
Stove type/model		
Location	BECT-CPE	
Fuel description	Briquete Não carb	
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;	
Ambient temperature	24.9°C; 23.5°C; 25.2°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C; °C	

1. HIGH POWER TEST (COLD START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	23	16	16	18	4.0	22.0%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	21	15	15	17	3.6	20.6%
Burning rate	g/min	14	17	15	16	1.5	9.4%
Thermal efficiency	%	10%	12%	13%	11.8	1.76%	0.15%
Specific fuel consumption	g/liter	135	112	97	115	19.2	16.8%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	125	106	92	108	16.6	15.4%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	3,531	2,988	2,598	3,039	468.6	15.4%
Firepower	watts	6,801	8,082	7,026	7,303	683.8	9.4%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	12	12	11	12	0.6	4.9%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	11	11	10	11	0.6	5.3%
Burning rate	g/min	7	8	11	8	2.1	25.3%
Thermal efficiency	%	38%	33%	26%	0.3244282	0.1	18.1%
Specific fuel consumption	g/liter	32	38	48	39	8.0	20.3%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	31	36	46	37	7.4	19.8%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	873	1,012	1,284	1,056	209.0	19.8%
Firepower	watts	3,148	3,666	5,090	3,968	1,005.8	25.3%

3. LOW POWER (SIM-MER)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min	1	1	1	1	0.1	9.4%
Thermal efficiency	%	36%	36%	43%	38.2	3.99%	0.10%
Specific fuel consumption	g/liter	22	20	26	23	2.6	11.6%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	625	576	722	641	74.0	11.6%
Firepower	watts	523	484	583	530	49.7	9.4%
Turn down ratio	--	12.99	16.70	12.06	14	2.5	17.6%

BENCHMARK VALUES	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
-------------------------	--------	--------	--------	---------	--------	-----

(for 5L)							
Fuel Use Benchmark Value	g	501	457	472	477	22.6	4.7%
Energy Use Benchmark Value	kJ	14,136	12,879	13,312	13,442	638.2	4.7%

IWA PERFORMANCE METRICS							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%	23.8%	22.7%	19.8%	22.1%	2.10%	9.49%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min·L)	0.014	0.013	0.016	0.014	0.16%	11.55%
High Power CO	g/MJ	6.8	5.9	6.3	6.3	0.44	6.94%
Low Power CO	g/(min·L)	0.085	0.099	0.133	0.106	0.02	23.07%
High Power PM	mg/MJ	2,464	1,532	1,395	1797	581.53	32.36%
Low Power PM	mg/(min·L)	0.0	0.1	0.1	0.1	0.02	30.66%
Indoor CO Emissions	g/min	0.352	0.396	0.433	0.394	0.04	10.31%
Indoor PM Emissions	mg/min	104.0	93.7	89.2	95.6	7.56	7.90%

Tabela A.5.4 – Resultados do teste de fervura da lenha, dados completos

WATER BOILING TEST - VERSION 4.2.3		TEST #
<u>All cells are linked to data worksheets, no entries are required</u>		
Stove type/model	kuriokoa burn	
Location	BECT-CPE	
Fuel description	Lenha	
Wind conditions	No wind; No wind; No wind; No wind; No wind;	
Ambient temperature	27°C; 27°C; 22.2°C; °C; °C; °C; °C; °C; °C; °C	

1. HIGH POWER TEST (COLD START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	11	17	13	14	3.1	22.4%
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	10	16	12	13	2.9	22.9%
Burning rate	g/min	16	11	14	13	2.5	18.8%
Thermal efficiency	%	19%	18%	19%	18.4	0.68%	0.04%
Specific fuel consumption	g/liter	70	74	71	72	2.1	2.9%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	66	70	67	68	2.3	3.4%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,856	1,978	1,880	1,905	64.6	3.4%
Firepower	watts	7,433	5,071	6,358	6,287	1,182.6	18.8%

2. HIGH POWER TEST (HOT START)							
	units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Time to boil Pot # 1	min	10	10	10	10	-	
Temp-corrected time to boil Pot # 1	min	9	9	9	9	0.1	1.4%
Burning rate	g/min	13	15	14	14	0.7	4.9%

Thermal efficiency	%	25%	22%	24%	0.2398685	0.0	6.0%
Specific fuel consumption	g/liter	54	59	58	57	2.8	4.9%
Temp-corrected specific consumption	g/liter	50	56	53	53	2.9	5.5%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter	1,419	1,583	1,502	1,501	82.1	5.5%
Firepower	watts	6,221	6,843	6,665	6,577	320.4	4.9%

3. LOW POWER (SIM-MER)		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Burning rate	g/min		5	5	8	6	1.9	31.6%
Thermal efficiency	%		15%	22%	25%	20.7	5.20%	0.25%
Specific fuel consumption	g/liter		136	108	279	174	91.7	52.6%
Temp-corrected specific energy cons.	kJ/liter		3,836	3,054	7,872	4,921	2,586.1	52.6%
Firepower	watts		2,506	2,133	3,831	2,823	892.5	31.6%
Turn down ratio	--		2.97	2.38	1.66	2	0.7	28.0%

BENCHMARK VALUES (for 5L)			Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
Fuel Use Benchmark Value	g		970	857	1,696	1,174	455.0	38.7%
Energy Use Benchmark Value	kJ		27,367	24,170	47,819	33,119	12,830.6	38.7%

IWA PERFORMANCE METRICS		units	Test 1	Test 2	Test 3	Average	St Dev	COV
High Power Thermal Efficiency	%		22.0%	20.0%	21.5%	21.2%	1.03%	4.86%
Low Power Specific Fuel Consumption	MJ/(min·L)		0.077	0.068	0.175	0.107	5.94%	55.80%
High Power CO	g/MJ		0.7	0.6	0.7	0.7	0.05	7.30%
Low Power CO	g/(min·L)		0.036	0.021	0.052	0.036	0.02	41.74%
High Power PM	mg/MJ		54	18	49	40	19.64	49.02%
Low Power PM	mg/(min·L)		0.3	-0.6	1.1	0.7	0.83	115.82%
Indoor CO Emissions	g/min		0.071	0.043	0.068	0.061	0.02	25.47%
Indoor PM Emissions	mg/min		4.8	1.8	4.0	3.6	1.55	43.35%