



UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUIMICA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Estudo do impacto do nitrato de celulose obtido do bagaço de cana de açúcar na
melhoria da ignição de briquetes de serradura**

Autor:

Aurélio João Sacaeque

Supervisor:

Prof. Doutor Eng.º Alberto Júlio Tsamba

Maputo, Dezembro de 2025

UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Estudo do impacto do nitrato de celulose obtido do bagaço de cana de açúcar na
melhoria da ignição de briquetes de serradura**

Autor:

Aurélio João Sacaeque

Supervisor:

Prof. Doutor Eng^o Alberto Júlio Tsamba

Maputo, Dezembro de 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
M O N D L A N E

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUIMICA

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

TERMO DE ENTREGA DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante finalista **Aurélio João Sacaeque** entregou no dia ___/___/2025 as _____ cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com referência _____ e intitulado: **Estudo do impacto do nitrato de celulose obtido do bagaço de cana de açúcar na melhoria da ignição de briquetes de serradura.**

Maputo, _____ de _____ de 2025

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **Aurélio João Sacaeque**, declaro por minha honra que o conteúdo do presente trabalho, com o tema “**Estudo do impacto do nitrato de celulose obtido do bagaço de cana de açúcar na melhoria da ignição de briquetes de serradura**” foi por mim realizado sob a supervisão do Prof. Doutor Eng.º Alberto Júlio Tsamba, não tendo sido submetido, no todo ou em parte, a qualquer outra instituição ou apresentado por qualquer outro autor para a obtenção de grau académico ou título equivalente.

Maputo, _____ de 2025

O Autor

Aurélio João Sacaeque

DEDICATÓRIAS

À TI MÃE,

*Não foi difícil escrever esta dedicatória,
Embora fosse, à priori, uma difícil missão.*

*Confiei a decisão à minha memória,
De escolher verdadeiramente, e não fazer apenas menção.*

*Que não fosse uma mera dedicatória,
Daquelas que simplesmente atravessaram a minha história,
mas ela, o meu predicado,
alguém que justificasse o esforço e sustentasse a vitória.*

*Escolhi além da vontade do meu coração
Aquela que me fez ser
E segurou, afincadamente, o meu chão.*

*Não me traiu a minha memória:
Claramente, seu nome foi persistente.
Clara, a vejo em mim, sem ser vidente.*

*A minha luta não é maior do que tem sido a tua,
A minha importância, tão pouco se equipara à tua.*

*Digo mais:
A tua preocupação se superioriza,
O teu amor, a cada dia, se eterniza.*

*A Deus eu agradeço,
Dedico o meu apreço,
E bendigo, para todo o sempre, a minha mãe,*

Clara Maria Aurélio

Aurélio João Sacaeque

AGRADECIMENTOS

A minha eterna gratidão é dirigida à minha mãe, **Clara Maria Aurélio**. Esta conquista, mais do que minha, é fruto do seu incansável esforço, sacrifício e amor incondicionais. Em si reside a base sólida sobre a qual construí cada etapa deste percurso.

Agradeço, com carinho, ao meu pai **João Sacaeque** e aos meus irmãos **Malaquias, Morgado, Dulce, Alcina e Lembrança**, pelo apoio e presença constante, mesmo nos momentos mais desafiantes.

Expresso também o meu mais sincero reconhecimento ao meu supervisor, Prof. **Alberto Júlio Tsamba**, pelo acompanhamento atento, orientação firme e contributo intelectual imprescindível para o desenvolvimento deste trabalho.

À comunidade científica da Faculdade de Engenharia, com particular destaque para os, engenheiros, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Química, a minha mais profunda admiração. A vossa dedicação, rigor e compromisso com a formação de excelência moldaram, não só os meus conhecimentos, mas também o meu carácter profissional.

Aos amigos de todas as horas — **António Chirico Júnior, Luís Muchanga e Nilto Valentim** — que partilharam comigo noites em claro, desafios e conquistas, o meu apreço fraterno. Aos colegas do curso de Engenharia Química, e em especial à turma de 2019, à **Francia Pinto, Carla Lichive e Joyce Camilo**, o meu reconhecimento pelo companheirismo e espírito de entreajuda.

Reconheço, com gratidão, os meus companheiros da RUE, particularmente **Raul Raposo, Manuel Curima, Edson Bobone, Adriano Chibamo e Chaul Atibo**. A vossa presença e solidariedade tornou a minha estadia mais leve, alegre e memorável.

Não posso deixar de agradecer aos meus tios, tias, primos e a toda a minha família extensa, pelo suporte emocional, pelas palavras de encorajamento e pela fé permanente nas minhas capacidades.

A todos que, de forma directa ou indirecta, contribuíram para a realização deste trabalho e para a minha formação académica e pessoal, expresso a minha mais profunda gratidão.

Por fim, a si, caro leitor, que dedica o seu tempo e atenção a este trabalho, o meu sincero obrigado. A sua presença aqui é, por si só, um motivo de honra.

Koxukuro, Asante Sana!

Aurélio Sacaeque

RESUMO

O estudo analisou o impacto do nitrato de celulose (NC), sintetizado a partir do bagaço de cana-de-açúcar e utilizado como revestimento para reduzir o tempo de atraso à ignição de bríquetes de serradura. A pesquisa procura responder ao desafio da baixa inflamabilidade dos bríquetes, que constitui um entrave à sua massificação como alternativa sustentável aos combustíveis tradicionais. O estudo baseou-se em ensaios laboratoriais com vista a aferir a viabilidade do NC enquanto agente indutor para bríquetes de serradura. Após a produção dos bríquetes, foram utilizadas duas variantes de NC sintetizada: a amostra residual (NCR) e a simples (NCS). O revestimento com NCR demonstrou-se eficaz na redução do tempo de ignição em bríquetes com massas de 35 g e 40 g, sem comprometer as propriedades térmicas ou estruturais dos mesmos. Em contraste, a aplicação de NCS comprometeu os resultados, apontando para a necessidade de ajustes na formulação e no método de aplicação do revestimento. As análises térmicas revelaram temperaturas máximas de combustão aproximadas entre os bríquetes, com variações não significativas: 602 °C para o simples e para os revestidos (589 °C para NCR e 552 °C para NCS). O consumo de massa processou-se de forma mais lenta nos bríquetes revestidos, sobretudo nos revestidos com NCS, devido ao efeito combinado da dupla camada estrutural NC + bríquete. No que diz respeito ao desempenho global (ICOM), o bríquete simples registou o menor valor (0,48), enquanto o NCR evidenciou melhor equilíbrio entre a ignição rápida e a combustão controlada. O NCS revelou limitações atribuídas ao processo de aplicação e à necessidade de aglutinante na sobreposição das camadas, o que reduziu a reatividade. Os resultados obtidos corroboram o potencial do NC como solução prática e eficiente para a otimização da inflamabilidade superficial dos bríquetes, permitindo a redução do tempo de ignição.

Palavras-chave: *bríquete de biomassa, nitrato de celulose, bagaço de cana-de-açúcar, tempo de ignição, inflamabilidade, serradura, agente de ignição.*

Abstract

This study looked at the effect of cellulose nitrate (NC), made from sugarcane bagasse, when used as a coating to reduce the ignition delay of sawdust briquettes. The research addresses the problem of low flammability in briquettes, which limits their use as a sustainable alternative to traditional fuels. Laboratory tests were carried out to check if NC can work as an ignition aid for sawdust briquettes. Two types of NC were tested: residual sample (NCR) and simple sample (NCS). The NCR coating was effective in reducing ignition time for briquettes weighing 35 g and 40 g, without changing their thermal or structural properties. In contrast, NCS gave poor results, showing the need for changes in its formula and application method. Thermal tests showed similar maximum combustion temperatures for all briquettes: 602 °C for uncoated, 589 °C for NCR-coated, and 552 °C for NCS-coated. Coated briquettes burned more slowly, especially those with NCS, because of the double layer (NC + briquette). For overall performance (ICOM), the uncoated briquette had the lowest value (0.48), while NCR showed the best balance between fast ignition and controlled burning. NCS had limitations due to the application process and the need for a binder, which reduced its reactivity. These results confirm that NC has strong potential as a practical and efficient way to improve briquette surface flammability and reduce ignition time.

Keywords: *biomass briquette, cellulose nitrate, sugarcane bagasse, ignition time, flammability, sawdust, ignition agent.*

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objectivos	2
1.2 Problema de Pesquisa	2
1.3 Hipóteses	3
1.4 Justificativa.....	3
1.5 Metodologia.....	4
1.5.1 Revisão Bibliográfica.....	5
1.5.2 Experiências Laboratoriais	5
CAPÍTULO II.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Biomassa	6
2.2 Bríquetes	7
2.3 Briquetagem	8
2.4 Ignição de Sólidos	9
2.4.1 Tempo de Ignição.....	11
2.4.2 Determinação do tempo de atraso a ignição.....	13
2.5 Bagaço de Cana-de-Açúcar	14
2.6 Serradura	16
2.7 Celulose	17
2.7.1 Nitrocelulose	17
2.7.2 Nitração da Celulose	19
2.7.3 Estabilização da Nitrocelulose	23
2.8 Teor de Matéria Volátil.....	23
CAPÍTULO III.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 Briquetagem.....	24

3.1.1	Materiais	24
3.1.2	Equipamentos	24
3.1.3	Métodos	30
3.2	Síntese da Nitrocelulose	36
3.2.1	Materiais	36
3.2.2	Equipamentos	38
3.2.3	Métodos	39
3.3	Cobertura dos bríquetes.....	43
3.4	Determinação do Tempo de Atraso a Ignição.....	46
CAPÍTULO IV		48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1	Granulometria da serradura	48
4.2	Análise Imediata.....	49
4.2.1	Humidade <i>in Natura</i>	50
4.2.2	Densidade a Granel	50
4.2.3	Teor de matéria volátil	51
4.2.4	Teor de cinzas	52
4.2.5	Teor de carbono fixo.....	53
4.3	Poder calorífico.....	53
4.4	Friabilidade.....	54
4.5	Estabilidade Dimensional	55
4.6	Densidade aparente e energética	56
4.7	Síntese de Nitrocelulose	58
4.8	Determinação do Índice de Combustão	60
4.8.1	Índice de Combustão de Bríquetes	60
4.9	Determinação do teor de matéria volátil das amostras de nitrocelulose	62
4.10	Determinação do tempo de ignição.....	63
4.10.1	Análise comparativa.....	64

CAPÍTULO V & VI	66
5. CONCLUSÕES	66
6. RECOMENDAÇÕES	68
CAPÍTULO VII	69
7. BIBLIOGRAFIA	69
7.1 Referencias bibliográficas	69
7.2 Bibliografia Consultada	74

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ASTM: American Society for Testing and Materials

BC: Bagaço de cana-de-açúcar

GN: Grau de Nitração (DoN em inglês)

GS: Grau de Substituição (DS em inglês)

H: Teor de Hidrogénio

ICOM: Índice de Combustão

IIAM: Instituto de Investigação Agrária de Moçambique

NC: Nitrato de Celulose/Nitrocelulose

NCR: Nitrocelulose Residual

NCR: Nitrocelulose Simples

PCI: Poder calorífico Inferior

PCS: Poder calorífico Superior

PCU: Poder calorífico Útil

TC: Teor de Cinzas

TCF: Teor de Carbono Fixo

TH: Teor de Humidade

TMV: Teor de Matéria Volátil

g: Gramas

FIAT: Flame Image Analyzer Tool

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes fontes de biomassa	6
Figura 2: Ilustração de Bríquetes de madeira	8
Figura 3: Bagaço de Cana-de-açúcar após extração	14
Figura 4: Troncos de umbila (à esquerda) e chanfuta (à direita)	17
Figura 5: : Estrutura do monómero de trinitrocelulose	18
Figura 6: Estrutura da celulose (à esquerda) e do trinitrato de celulose (à direita).....	19
Figura 7: Esquema do mecanismo da reacção de Nitração	22
Figura 8: Serradura recolhida na Carpintaria da Faculdade de Engenharia – UEM antes da moagem.....	24
Figura 9: Prensa Hidráulica	25
Figura 10: Analisador de Humidade (Sartorius MA 100).....	25
Figura 11: Moinho de bolas usado para realizar o ensaio de friabilidade	26
Figura 12: Paquímetro digital (marca: Mitutoyo; modelo: CD-6”CSX)	26
Figura 13: Combustor	27
Figura 14: Dessecador	27
Figura 15: Cadinhos metálicos retirados da mufla após o teste de voláteis	28
Figura 16: Estufa	28
Figura 17: Mufla.....	29
Figura 18: Moinho ultracentrifugo	29
Figura 19: Ventilador	30
Figura 20: Parte dos briquetes de serradura produzidos.....	32

Figura 21: Recipiente contendo o ácido nítrico usado	36
Figura 22: Recipiente contendo o ácido sulfúrico usado	37
Figura 23: Cana-de-açúcar (à esquerda)	38
Figura 24: Bagaço (à direita) - recolhidos em locais de venda ambulante de sumo de extracto de cana-de-açúcar, nas ruas da Cidade de Maputo)	38
Figura 25: Moinho de facas	38
Figura 26: Erlenmeyer	39
Figura 26: Mistura Sulfonítrica preparada no balão de 10L	40
Figura 27: Processo de estabilização e lavagem da biomassa	41
Figura 28: Nitrocelulose simples (à esquerda) e residual (à direita) após a secagem...42	
Figura 29: fluxograma do processo de nitrção do Bagaço de cana-de-açúcar.....43	
Figura: 30: Bríquete desfeito após tentativa de cobertura por briquetagem a frio	44
Figura 31: Tesoura de poda utilizada para redução do diâmetro dos briquetes	44
Figura 32: Bríquete produzido com dimensões-padrão (à esquerda) do molde e bríquete com diâmetro reduzido manualmente (à direita)	45
Figura 33: Briquetes com camada de cobertura adicionada nitrato de celulose simples (a esquerda) e nitrato de celulose residual (a direita).....45	
Figura 34 e: Suporte de ignição adaptado para o teste de ignição.....46	
Figura 35: (à esquerda) Teste de ignição em um bríquete simples de 40 gramas	47
Figura 36: (à direita) Isqueiro BIC Megalighter	47

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Curva granulométrica da serradura antes e pós moagem	48
Gráfico 2: Análise Imediata da Biomassa em base seca	49
Gráfico 3: Poderes Calorífico da serradura	53
Gráfico 4: Perdas de massa dos briquetes em relação à massa inicial no teste de friabilidade	55
Gráfico 5: Percentagem de alongação dos briquetes analisados.....	56
Gráfico 6: Ilustração gráfica das densidades a granel ou aparente e densidade energética	58
Gráfico 7: Variação temporal da Temperatura no ensaio de índice de combustão	60
Gráfico 8: Variação temporal da massa dos briquetes	60
Gráfico 9: Tempo médio de atraso a ignição dos briquetes	63

Lista de tabelas

Tabela 1: Variações de composição Química do Bagaço de Cana-de-açúcar	15
Tabela 2: Classificação da celulose de acordo com o número de grupos substituídos baseado na percentagem de Nitrogénio da Nitrocelulose	21
Tabela 3: Humidade in <i>Natura</i>	50
Tabela 4: Resultados da Determinação da densidade a granel.....	50
Tabela 5: Dados relativos à variação de massa para a determinação do TMV	52
Tabela 6: Peso da amostra antes de colocar na estufa	52
Tabela 7: Teores analíticos médios de Nitrogénio resultantes das análises do IIAM	59
Tabela 8: Determinação do índice de combustão dos briquetes produzidos	61
Tabela 9: Determinação do teor de matéria volátil das amostras de nitrocelulose	62
Tabela 10: Percentagem de redução do tempo de ignição.....	64

O briquete biomássico comum é um sólido combustível de biomassa bastante compacto e mais denso que o seu material primário, que apresenta vantagens significativas de desempenho energético. Para além de melhorar as propriedades térmicas, a briquetização de biomassa tem como foco atender aos problemas ambientais relacionados aos combustíveis de fontes não renováveis, ao encarecimento e escassez gradual dos combustíveis fósseis, promovendo simultaneamente o reaproveitamento eficiente de resíduos sólidos.

Esta abordagem assenta-se no conceito de Ciclo de Carbono neutro. Quando os briquetes são produzidos a partir de biomassa sustentável, o dióxido de carbono (CO₂) emitido durante a sua combustão é considerado equivalente ao que foi absorvido pelas plantas durante o seu crescimento. (Martos, 2022).

Diferentemente dos combustíveis fósseis cuja disponibilidade depende de reservas naturais limitadas, a biomassa possibilita uma produção quantificada e programada, pois pode ser cultivada com antecedência. Além disso, os resíduos resultantes podem ser armazenados por longos períodos prevenindo a sua escassez (Dantas Rodrigues et al., s.d.).

O briquete biocombustível apresenta-se como uma alternativa eficiente ao carvão vegetal e à lenha. A sua produção baseia-se no reaproveitamento de resíduos orgânicos selecionados, tais como bagaço de cana-de-açúcar, cascas de arroz, casca de algodão, casca de café, resíduos de coco, restolhos madeireiros, palha de milho, sabugo, serradura, entre outras biomassas (Dantas, 2012).

O briquete, enquanto produto disponível no mercado, tem as seguintes vantagens:

- Poder calorífico maior do que o da lenha comum;
- Maior densidade energética;
- Regularidade térmica;
- Maior temperatura da chama;
- Geometria definida e regular;
- Dimensões padronizadas;
- Propriedades mais uniformizadas; e

- Fácil transporte e armazenamento.

O bríquete, enquanto combustível utilizado na combustão, carece ainda de melhorias nas suas propriedades e características para tornar-se mais atractivo e eficiente. Entre os aspectos a melhorar destaca-se o tempo de atraso na ignição ou simplesmente magnitude do tempo de ignição. O tempo de ignição afecta operacional e comercialmente os bríquetes, a sua magnitude interfere directamente nas condições de manuseamento e no início da combustão, resultando em implicações significativas no consumo de energia e tempo durante a fase de inicial do processo de combustão.

Do ponto de vista teórico, o atraso na ignição é definido com base num equilíbrio entre a geração de calor resultante das reacções termoquímicas e a perda de calor para o ambiente. Trata-se, neste caso, do intervalo de tempo necessário para que o material atinja a temperatura de ignição e, conseqüentemente, se inicie o processo de combustão (McAlevy III, 1961).

O presente trabalho propõe-se a melhorar o tempo de atraso na ignição dos bríquetes, através da aplicação de cobertura com nitrato de celulose como agente ou vector que permita uma redução considerável deste tempo em bríquetes de serradura, sem alterar negativamente as propriedades que tornam o bríquete uma aposta energética.

1.1 Objectivos

O objectivo geral desta pesquisa é identificar um agente de ignição de bríquetes de biomassa que não prejudique as suas propriedades térmicas.

Como objectivos específicos, foram definidos os seguintes:

- Avaliar os factores determinantes para a escolha de um agente de ignição de bríquetes de biomassa;
- Identificar potenciais vectores de ignição tecnicamente apropriados para a aplicação em bríquetes de biomassa com base nos factores determinantes.;
- Avaliar a viabilidade e disponibilidade do agente de ignição para a aplicação massiva em bríquetes de biomassa; e,
- Verificar o impacto da aplicação do vector no tempo de ignição e nas propriedades térmicas dos bríquetes.

1.2 Problema de Pesquisa

O problema de pesquisa colocado nesta pesquisa é o seguinte:

Que agentes poderiam ser usados com sucesso para reduzir o tempo de atraso à ignição dos briquetes sem comprometer as suas propriedades combustíveis?

1.3 Hipóteses

- A aplicação da cobertura superficial em briquetes de serradura, aumenta a inflamabilidade sem alterar negativamente o poder calorífico e a integridade física do combustível;
- O diâmetro dos briquetes influencia directamente a eficácia da redução do tempo de ignição;
- A reutilização da mistura sulfonítrica na nitração do bagaço de cana-de-açúcar pode constituir uma alternativa viável, mantendo a eficiência do processo de obtenção do nitrato de celulose;
- A adição de aglutinantes durante o revestimento dos briquetes compromete a eficácia do agente de ignição;

1.4 Justificativa

Apesar das diversas vantagens dos briquetes, o seu uso é ainda muito inferior ao esperado, mesmo tratando-se de um combustível resultante do reaproveitamento de matéria orgânica residual.

A baixa utilização de briquetes, em países de baixa renda como Moçambique, deve-se, para além da baixa produção e disseminação, às dificuldades de utilização que apresentam. Entre estes factores, realça-se o elevado tempo de ignição após contacto directo com a fonte de calor que impacta negativamente o uso dos briquetes, comparado com outros combustíveis. O acto de acender o briquete é, na maioria das vezes, um exercício extremamente desgastante e exigente. De facto, não basta aproximar a fonte de calor ao briquete: tem de haver um fluído altamente inflamável que cubra os briquetes e assim, permitir atear o fogo. De outro modo, há que recorrer a aceleradores de combustão (acendalhas) ou mesmo garantir uma ventilação contínua, de forma manual ou mecânica, na direcção do briquete, de modo a sustentar a ignição, etc.

A ausência de material inflamável ou biomassa de composição favorável à ignição na superfície dos briquetes, pode ser melhorada através da manipulação dos factores que afectam o tempo de ignição dos briquetes. Entre estes factores destacam-se:

- Variações de pressão de compactação;
- Variação do teor de voláteis;

- Porosidade dos bríquetes;
- Formato e dimensões dos bríquetes;
- Tamanho das partículas constituintes do bríquete;
- Quantidade e qualidade do ligante; e,
- Grau de rugosidade ou rigidez superficial dos briquetes.

De entre os factores condicionantes, o mais determinante para a o tempo de ignição é o teor de matéria volátil. O tempo de ignição é uma função do conteúdo em termos de matéria volátil, sendo inversamente proporcional a este e directamente proporcional ao comprimento da chama (Adams et al., 2011).

A produção de briquetes com recurso a matérias-primas que contenham grande teor de voláteis impacta negativamente no desempenho e na eficiência do briquete, pois briquetes com elevado teor de matéria volátil são rapidamente consumidos, e tendem a alcançar temperaturas reactivamente baixas em combustão.

Sabe-se que, a matéria volátil influencia directamente as características dos bríquetes, elevando a sua inflamabilidade, e consequentemente, conferindo ao bríquete uma ignição rápida. Assim sendo, pode-se reduzir o tempo de atraso a ignição dos bríquetes elevando a inflamabilidade dos mesmos e não necessariamente aumentando o teor de matéria volátil na composição da biomassa.

O aumento da inflamabilidade pode ser feito com recurso a um material altamente inflamável, que não constitua perigo e nem altere as propriedades dos bríquetes. Este material não deve ser adicionado directamente à matéria-prima para a produção do bríquete, pois, a ignição ocorre a nível da superfície do bríquete. Além de que adicioná-lo directamente ao material biomássico a briquetar, poderia alterar as propriedades dos bríquetes prejudicando suas propriedades.

1.5 Metodologia

O desenvolvimento do presente trabalho teve como alicerces a incontornável revisão bibliográfica e experiências práticas laboratoriais. A combinação destas duas modalidades visou garantir uma análise abrangente e a obtenção de resultados consistentes e fundamentados com base no estado da arte científica e nos testes realizados.

1.5.1 Revisão Bibliográfica

A primeira etapa deste estudo foi a revisão da literatura que resume o estado da arte em briquetagem, nos factores que determinam e influenciam a qualidade dos briquetes e ignição de sólidos. Durante esta fase, foram analisadas as fontes bibliográficas disponíveis, quer fisicamente quer online.

A Revisão Bibliográfica permitiu o levantamento de conceitos teóricos, metodologias empregadas em estudos anteriores, e principais méritos conseguidos pela Comunidade Científica sobre a matéria.

1.5.2 Experiências Laboratoriais

Para validar as hipóteses levantadas na revisão de literatura, foram realizadas experiências laboratoriais, no Departamento de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane.

A metodologia experimental foi realizada de acordo com padrões científicos e normas internacionais incluindo normas ASTM como o protocolo E-872-82 e D-1102, assim como a definição de métodos, controlo e repetição dos ensaios em triplicado, para garantir a precisão dos resultados. Os dados obtidos foram analisados de forma quantitativa e qualitativa, utilizando métodos estatísticos descritivos, assim como a interpretação, análise e discussão dos fenómenos observados.

2.1 Biomassa

Biomassa é toda a matéria orgânica de origem vegetal ou animal que, pela natureza, bioquímica, apresenta um determinado potencial energético. A ISO 16559 define biomassa como sendo qualquer material de origem biológica, excluindo os incorporados em formações geológicas e/ou fossilizados. A biomassa ocorre na natureza de forma natural ou mesmo como resultado de actividades humanas. (Kpalo et al., 2020).

Entre a biomassa combustível mais comum destacam-se as culturas e resíduos agrícolas, espécies lenhosas, resíduos de alimentos, rações, resíduos de plantas aquáticas, algas, esterco animal, resíduos urbanos, florestais, madeireiros, pecuários, industriais, etc. (Tursi, 2019; Kalak, 2023). A figura 1 ilustra algumas destas fontes de biomassa.

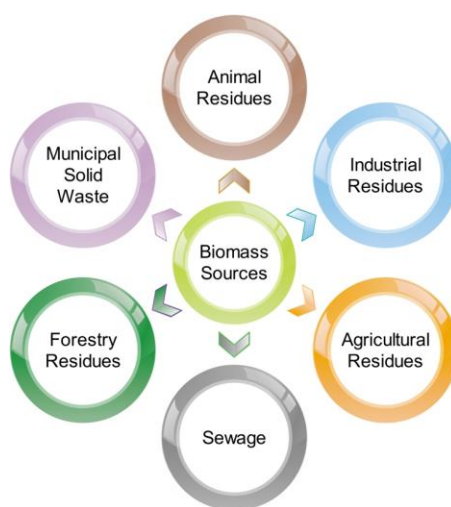


Figura 1: Diferentes fontes de biomassa

(fonte: Tursi, 2019)

A composição e estrutura da biomassa é diversa, sendo que as diferentes estruturas químicas que a biomassa apresenta determinam diferentes propriedades químicas que diversificam o seu potencial energético. A biomassa de origem vegetal é composta principalmente por celulose, hemicelulose e lignina com percentagens variáveis, enquanto a de origem animal é rica em proteínas e os cereais são compostos principalmente por amido (Tursi, 2019).

O potencial energético da biomassa, enquanto combustível, depende de vários factores, destacando-se o estado físico do combustível, o tipo de material, o teor de humidade, a composição química e o poder calorífico. A aplicação da biomassa, assim como a respectiva tecnologia de termoconversão depende da quantidade e da sua disponibilidade (Kalak, 2023).

De todas as fontes de energia, a biomassa é o terceiro maior recurso energético do Mundo. Ela é a fonte de energia mais dominante para a confecção de alimentos e aquecimento, sendo usada por cerca de 75% da população dos países em desenvolvimento. Actualmente, a biomassa é responsável por cerca de 14% do consumo total de energia global (Kpalo et al., 2020).

Em 2016 estimou-se que a biomassa total no mundo tivesse o potencial de contribuir para a produção de cerca de 33.000 EJ (exa-joules) de energia, o que é cerca de 80 vezes mais energia do que o consumo anual de energia no mundo (Kalak, 2023).

2.2 Bríquetes

O bríquete biomássico comum é um combustível sólido densificado constituído por material de biomassa relativamente seca. Esta biomassa é triturada e prensada em diferentes formatos, oferecendo grandes vantagens ao consumidor, comparado com a biomassa no seu estado bruto ou original.

A briquetagem da biomassa tem como objectivo aumentar a sua densidade mássica e energética. A sua qualidade é caracterizada em termos das suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas, dependendo dos parâmetros medidos e do tipo de biomassa. Entre estas propriedades, destacam-se, entre outros (Kpalo et al., 2020):

- Humidade;
- Teores de cinzas, voláteis e de carbono fixo;
- Composição elementar;
- Densidade energética;
- Poder calorífico;
- Estabilidade dimensional;
- Friabilidade;
- Resistência à compressão;
- Índice de combustão;

A produção e utilização de briquetes de biomassa, são consideradas ambientalmente sustentáveis se a prática atender a determinados indicadores de sustentabilidade ambiental, que são classificados em categorias relacionadas ao uso da terra, qualidade do ar e da água, conservação do solo e da biodiversidade e preservação do ciclo de carbono. Tratando-se de produtos derivados, em geral, do reaproveitamento de resíduos, os briquetes são ambientalmente sustentáveis, otimizando a quantidade de resíduos sólidos descartados e contribuindo para o Ciclo de Carbono (Kpalo et al., 2020).

De acordo com Chen (Chen, 2015) as propriedades de combustão aumentam 20% quando a biomassa é moldada em briquetes sólidos e as emissões de gases de efeito estufa, NOx e SO₂ são de apenas 1:9, 1:5 e 1:10 das do carvão.

Embora as perspectivas para a utilização de briquetes de carvão sejam muito boas, os aquecedores e fogões à base de briquetes ainda apresentam pontos fracos na ignição. Acender um fogão à briquetes de carvão leva um tempo relativamente mais longo (cerca de 30 minutos), por isso os briquetes são menos populares entre o público, tornando esta uma grande desvantagem para a sua comercialização. (Komalasari & Wulandari, 2022)



Figura 2: Ilustração de Briquetes de madeira

(Fonte: <https://www.electrocholo.com/espana-ya-suma-433-redes-de-calor-conbiomasa/>)

2.3 Briquetagem

Existem várias tecnologias de densificação usadas na produção de um material uniforme para fins de concentração de energia. Entre estas, a peletização e a briquetagem são as mais amplamente utilizadas. A briquetagem é um método de aglomeração de biomassa para produzir um sólido compacto com propriedades e características padronizadas designados, briquetes. A briquetagem transforma a biomassa de baixa densidade *bulk*

em blocos de alta densidade energética. Ela permite a concentração de biomassa aumentando a massa e a densidade energética, reduzindo assim o custo de transporte até ao ponto de uso e garantindo o reaproveitamento, nos casos em que a massa precursora é residual (Kpalo et al., 2020).

Para que a biomassa seja eficientemente convertida em biocombustível sólido pela briquetagem, ela passa por alguns processos de pré-tratamento, que podem variar de acordo com as características naturais da biomassa e a disponibilidade da tecnologia. O processo de pré-tratamento pode incluir, entre outros a:

- Remoção de impurezas;
- Secagem;
- Redução de tamanho;
- Classificação;
- Pulverização;
- Torrefação; e,
- Carbonização

A briquetagem pode ser feita à escala industrial, por meio de máquinas automatizadas que permitem um maior controlo das condições do processo, ou mesmo manualmente, usando prensas hidráulicas ou dispositivos mecânicos manuais (prensas de rolo, de parafuso, de pistão, etc.), sendo os briquetadores manuais geralmente mais simples de operar. (Marreiro et al., 2021).

2.4 Ignição de Sólidos

Para (Coelho & Costa, 2012) a ignição é o processo não-estacionário em que numa mistura de reagentes, inicialmente não-reactiva, dado o ganho de energia térmica, formam-se radicais que se multiplicam com rápido aumento da temperatura e libertação de calor. Vários factores ambientais podem afectar a ignição, que inclui, a concentração do oxigénio, concentração ou densidade do combustível, temperatura, pressão e a sua humidade.

A ignição ocorre quando o combustível, na presença de um comburente, é aquecido até atingir a sua temperatura de ignição, que é a temperatura mínima necessária para que se inicie o processo de combustão. A ignição pode ser espontânea ou forçada, dependendo da existência ou não de um factor externo de fornecimento de calor. A

ignição espontânea é induzida por uma reacção exotérmica de auto aquecimento que produz uma chama sustentada.

Antes da ignição propriamente dita, ou seja, antes da detecção visual da reacção química global, ocorre o período de indução que é o tempo necessário para que os radicais e cadeias moleculares instáveis atinjam a fase de agrupamento degenerativo. Esta fase ocorre a nível microscópico e caracteriza-se pela acumulação de radicais livres e cadeias moleculares instáveis resultando numa condição explosiva.

Durante a ignição ocorre a combinação de reacções termoquímicas vulgarmente chamada de *ignição em dois estágios*. Do ponto de vista térmico, a ignição ocorre quando a taxa de energia absorvida durante a reacção é superior à taxa de dissipação térmica. Do ponto de vista químico, a ignição ocorre quando a formação de espécies altamente reactivas, conhecidas como radicais livres ou portadores de cadeia, ultrapassa os mecanismos que tendem a interromper a reacção, denominados processos de terminação da cadeia. Ou seja, a ignição ocorre quando a taxa de geração dos radicais é maior que a taxa da sua neutralização, permitindo assim o início e a propagação de uma reacção em cadeia de combustão. A geração de transportadores (portadores) de cadeia é a dissociação de uma molécula para formar radicais e iniciar uma reacção em cadeia contínua (Keivens, 2019).

A geração de portadores ocorre quando devido ao aquecimento, as ligações químicas das moléculas do combustível quebram-se formando radicais livres, altamente reactivos. Estes radicais livres reagem com o oxigénio, exotermicamente, formando novos compostos. O calor gerado na reacção, aquece o material combustível adjacente até à ignição formando mais radicais livres, garantindo a manutenção do ciclo da reacção e propagação da chama formada.

Os radicais livres são designados portadores de cadeia, pois transportam a reacção de uma etapa para a outra, assegurando a continuidade do processo de combustão até à sua conclusão. A velocidade de formação destes portadores de cadeia durante a combustão é denominada taxa de geração de portadores de cadeia.

Para além dos portadores de cadeia e da taxa de geração, outro conceito importante na ignição é o de terminação da cadeia. A terminação de cadeia culmina na interrupção da combustão. Esta é a combinação de radicais, ou reacção de um radical com uma molécula que dá uma espécie de um radical com menor actividade que não consegue

propagar a cadeia de forma independente, isto é, uma terminação da cadeia que não propaga continuamente a reacção em etapas. Exemplos de terminação de cadeia:

1. Combinação de Radicais: $\text{CH}_3^* + \text{CH}_3^* \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6$
2. Radical + Radical que resulta em molécula estável: $\text{CH}_3\text{O}^* + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
3. Radical + Molécula que resulta em radical menos reactivo: $\text{CH}_3^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2^*$

Nas reacções de terminação ocorre a neutralização dos radicais livres, devido à formação de um produto mais estável, quebrando a cadeia de reacções e impedindo a propagação da combustão. Se a taxa das reacções de terminação for elevada, ocorre a neutralização dos radicais livres, levando à extinção da chama. Assim, para que haja ignição e a combustão se mantenha, as reacções de terminação devem ocorrer a uma velocidade inferior à da geração de portadores de cadeia.

2.4.1 Tempo de Ignição

O tempo de ignição de bríquetes ou tempo de atraso a ignição é o tempo médio decorrido desde o contacto do combustível com a fonte de calor até ao momento em que um fogo brilhante constante é observado na superfície do sólido (Rotich, 1998). Isto é visualmente identificado pela brasa vermelha na superfície do sólido combustível.

Para todo o tipo de combustível é importante que o tempo de atraso a ignição seja o menor possível. Por isso, estudos têm sido desenvolvidos procurando reduzir este parâmetro para facilitar o uso dos combustíveis e aumentar a eficiência dos processos associados ao uso deste, principalmente para combustíveis sólidos.

(Komalasari & e Wulandari, 2022) desenvolveram um estudo para acelerar a ignição de bríquetes e, conseqüentemente, reduzir o tempo de atraso a ignição através da adição à composição do bríquete do clorato de potássio como estimulante, e da variação de pressões no processo de briquetagem, tendo obtido resultado positivos. O clorato de potássio apresenta boas propriedades para a redução do tempo de atraso à ignição, por ser um oxidante forte, sendo também usado na fabricação de explosivos. Embora seja boa, esta solução é cara por se tratar de um composto com custos de aquisição elevados.

Como avançado anteriormente, o fenómeno de atraso à ignição de bríquetes assim como de todos os combustíveis sólidos ocorre a nível da superfície do bríquete, sendo o mais indicado, solucionar esta problemática implementando soluções a nível da superfície.

A adição de revestimento à superfície do briquete por um agente de ignição, seja na briquetagem ou mesmo posteriormente à produção, é uma solução que pode melhorar o tempo de ignição deste biocombustível. Esta cobertura deve ser feita por um material responsável por receber a energia da fonte de calor, queimar inicialmente produzindo chama e, em seguida, conduzir a sua energia para a ignição do briquete envolvido no menor tempo possível. O material para este efeito deve possuir as seguintes propriedades:

- Alta inflamabilidade (elevada volatilidade);
- Inodoro;
- Não tóxico;
- Menor índice de fumaça na combustão;
- Leve;
- Seguro e ecológico;
- Acessível; e
- Tempo de ignição relativamente baixo quando submetido à combustão.

Alguns dos materiais pré-identificados com características possíveis para desempenhar esta função são: a) a nitrocelulose, b) os óleos vegetais, c) as ceras, d) álcoois e e) clorato de potássio.

Os óleos, sendo líquidos, podem afectar negativamente o briquete, pois, são susceptíveis de penetrar o briquete através dos poros e influenciar a ligação das partículas da biomassa, além da susceptibilidade de promoverem a emissão de fumos durante a queima.

Os álcoois, são altamente inflamáveis e extremamente voláteis, passariam para a fase gasosa imediatamente após banhar o briquete, e, por isso, não seriam uma solução duradoira.

As ceras tendem a fundir-se com o aumento da temperatura, o que pode potencialmente, prejudicar a ignição do briquete. Em situações onde há contacto entre camadas de revestimento de briquetes adjacentes à base cera ao aquecer, esta pode formar um filme líquido que impede o contacto adequado entre o oxigénio e o material, consequentemente a chama seria rapidamente extinta pelo filme líquido.

Por si só, as ceras não apresentam um bom desempenho como agente de ignição. Para que sejam eficazes, é necessário associá-las a outros materiais que ajudem a promover

a sua combustão, como a serradura, papel ou tecido, exigindo esforço dobrado para a sua produção. Para além disso, durante a queima, algumas ceras principalmente as de origem petroquímica, como a parafina — podem libertar substâncias nocivas à saúde humana, como o benzeno.

O clorato de potássio é um oxidante muito caro, e todos os componentes para a sua síntese são sintéticos.

A nitrocelulose (NC) é sólida, altamente inflamável e de fácil obtenção apresentando-se como uma das mais indicadas para aplicação como agente de ignição dos bríquetes.

A cobertura do bríquete pela nitrocelulose pode ser feita por briquetagem de segunda camada a frio (para evitar a decomposição térmica da NC), pela aglutinação ao bríquete a partir de um aglutinante natural, ou por aglutinante artificial (cola de madeira no caso de bríquete de serradura de madeira).

2.4.2 Determinação do tempo de atraso a ignição

A determinação do tempo de início de ignição depende muito da técnica de medição usada e da precisão experimental (Mularski & Li, 2023). O tempo de ignição é medido principalmente através da quimiluminescência de radicais CH^* . No entanto, imagens de alta velocidade do obturador das cameras, que permitem filmar eventos que ocorrem muito rapidamente, também são investigadas em algumas publicações, onde o uso da fração da luz visível máxima serviu como indicador de ignição (Rotich, 1998).

Os estudos realizados por (Carmignani et al., 2019) apontam duas novas abordagens para a determinação do tempo de ignição, nomeadamente, o método da câmara de vídeo e o método da câmara infravermelha. No método da câmara de vídeo, a mesma é montada perpendicularmente à amostra a queimar, iniciando-se a gravação antes da activação da fonte de ignição. Após a filmagem, a gravação é processada por um FIAT (Flame Image Analyzer Tool) que permite a devida análise de detecção de ignição e de chamas. O método da câmara infravermelha permite determinar, em tempo real, o instante de ignição com base no registo gráfico das temperaturas. Após o devido processamento, esses registos possibilitam a visualização clara do ponto de ignição, que ocorre após o aquecimento da biomassa.

(Vershina et al., 2023) determinaram o tempo de ignição em um forno com amostras de combustível pré-aquecidas, a uma temperatura constante. As temperaturas foram

determinadas através de termopares de alta precisão de tipo não especificado, e as imagens obtidas com recurso a uma câmara de alta velocidade (1000 fps) e um termovisor acoplado.

(Komalasari & Wulandari, 2022) nos seus estudos para a melhoria de ignição de bríquetes determinaram o tempo de ignição de um bríquete a partir da aproximação de um bríquete (em estudo) a um outro já em combustão. O tempo decorrido desde o momento da aproximação física até à visibilidade das brasas constituiu o tempo de ignição.

A determinação do atraso do tempo de ignição é, nos estudos mais recentes, realizada por intermédio de uma câmara de alta velocidade que permite de forma minuciosa visualizar a ignição do sólido. Após a filmagem, as imagens são analisadas por meio de *softwares* ou programas de detecção de chamas, acopladas directamente às cameras como FLIR E40 ou através de recursos externos como Flame Image Analyzer ferramenta desenvolvida no MATLAB.

2.5 Bagaço de Cana-de-Açúcar

Após a colheita e devidas aplicações, a cana-de-açúcar não é consumida na sua totalidade. Da cana-de-açúcar extrai-se a parte líquida e gera-se um resíduo sólido que é descartado ou utilizado para a combustão em centrais térmicas. Este resíduo designa-se bagaço da cana-de-açúcar.



Figura 3: Bagaço de Cana-de-açúcar após extração

O bagaço de cana-de-açúcar é um material residual sólido fibroso, resíduo da planta cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). A sua aplicação é diferenciada, podendo ser em indústrias de papel, combustão, para extracção de fibras celulósicas, de celulose pura, nano fibras de celulose e nano-cristais de celulose (Mahmud & Anannya, 2021).

Para (Mahmud & Anannya, 2021), a principal vantagem da utilização do bagaço reside no facto de tratar-se de um resíduo de origem pura, o que lhe confere um elevado potencial de reaproveitamento. O bagaço permite a obtenção de produtos de elevado valor com um baixo custo de produção. Para além disso, esses produtos apresentam, com elevada probabilidade, propriedades de biodegradabilidade.

O bagaço de cana-de-açúcar é uma grande fonte de celulose. A sua composição é naturalmente determinada pela planta-mãe. Para (Canilha et al., 2011), a composição química desigual do bagaço depende de múltiplos factores, incluindo a variedade de cultura, condições climáticas, localização geográfica, modo de crescimento, uso de fertilizantes, composição física e a natureza química do solo.

A tabela abaixo ilustra os componentes do bagaço de cana-de-açúcar e os respectivos intervalos de variação. Evidentemente, independentemente da composição, a celulose é o maior componente de qualquer tipo de bagaço e as cinzas estão em menor percentagem.

Tabela 1: Variações de composição Química do Bagaço de Cana-de-açúcar

Componente	Percentagem (%)
Celulose	26 – 47
Hemicelulose	19 – 33
Lignina	14 – 23
Cinzas	1 – 5

(fonte:(Mahmud & Anannya, 2021))

Em média, cada tonelada de cana-de-açúcar produz cerca de 250kg de bagaço, na base húmida, e 140 kg na base seca. Significa isto, que, em média, a cana-de-açúcar possui 14% de fibras de bagaço (Tavares & Do Amaral, 2014).

De acordo com o Inquérito Agrário Integrado de 2023 (MADER, 2024), Moçambique produziu cana-de-açúcar numa área de 71.023 ha em 2020 e 30.661 ha em 2023. A produção anual foi de aproximadamente 3 e 2 milhões de toneladas, respectivamente. Estes números permitem estimar aproximadamente 280 a 500 mil toneladas/ano de bagaço de cana-de-açúcar gerada como resíduo em Moçambique. Este volume de bagaço apresenta potencial para revestimento anual de 2 a 5 mil milhões de briquetes, cada um contendo uma camada secundária de 100 gramas de Nitrato de Celulose, quantidade suficiente para satisfazer a procura nacional de combustíveis sólidos.

Segundo dados do relatório de Indicadores Básicos de Agricultura e Alimentação de 2023 (INE, 2024), Moçambique reportou oficialmente uma produção de 43.424 toneladas de carvão vegetal. O volume de bagaço disponível pode gerar NC suficiente para a aplicação como agente de ignição no carvão vegetal produzido, analogamente geraria agente de ignição suficiente para o revestimento em briquetes, caso todo o carvão oficialmente produzido fosse substituído por briquetes de 100 gramas cada, de mesma ou diferentes biomassas.

2.6 Serradura

A serradura é a aparada de madeira que forma-se quando a madeira é serrada, planificada, cortada, perfurada, polida ou rebitada. Por outras palavras, a serradura é o resíduo de madeira de pequenas partículas disponíveis nas carpintarias, indústrias de serração, fábricas de pasta de papel e indústrias de papel. Após formada, a serradura tem características físicas e químicas variáveis que dependem da árvore madeireira da qual provém. Ela é capaz de produzir bríquetes com uma densidade superior a 100 kg/m³ (Rominiyi et al., 2017; Olaiya et al., 2023; Urbanski, 1965).

A serradura é geralmente considerada um resíduo que polui o ambiente, mas pode tornar-se uma mercadoria valiosa, quando usada como matéria-prima nas indústrias de fabrico de placas de madeira, materiais de construção leves, como prateleiras, quadros, revestimentos de paredes, telhados para casas, isolante no sistema de refrigeração e conservação, combustível para queima, na produção de gás, de bríquete, peletes, entre outras aplicações (Rominiyi et al., 2017)

A fonte de serradura deste estudo, é uma mistura de chanfuta (*Azelia Quanzensis*) e umbila (*Pterocarpus Angolensis*). A chanfuta e a umbila são árvores madeireiras nativas da África Austral, de países como Angola, Tanzânia, Zâmbia, Moçambique, entre outros. A Chanfuta é caracterizada por apresentar um caule recto e casca lisa podendo alcançar até 15m de altura. Já a umbila apresenta folha caduca, com um caule rijo, pesado e avermelhado-escuro, em geral, podendo também atingir 15 metros de altura. Estas duas espécies, o jambirre, o pau-preto e o pinho são as principais fontes de madeira em Moçambique e em África. As imagens abaixo ilustram os troncos das 2 árvores.



Figura 4: Troncos de umbila (à esquerda) e chanfuta (à direita)

Fonte: (<https://mega.ibxk.com.br/2019/02/27/27032558747134.jpg?ims=fit-in/800x500>)

2.7 Celulose

A celulose é um polissacarídeo linear composto por unidades individuais de anidro-glicose (também chamadas unidades de glucopirranose) ligadas nas posições 1 e 4 por meio de ligações glicosídicas com a configuração β .

Conforme observado na fórmula química da figura 6 (a), a molécula de celulose é composta por carbono, hidrogénio e oxigénio, com uma composição elementar de 44,4%, 6,2% e 49,4%, respectivamente. Ao longo da cadeia do polímero de celulose, cada unidade de glicose contém três grupos hidroxilo que estão prontos para esterificação (Mattar et al., 2020).

A estabilidade e reactividade da celulose, bem como a cor, a clareza, a filtrabilidade em solução e a estabilidade dos seus derivados dependem fortemente do tipo e da quantidade de impurezas a si associadas. A celulose é o mais abundante de todos os compostos orgânicos naturais e presume-se que compõe pelo menos um terço de toda a matéria vegetal.

A madeira é o mais amplamente utilizado de todos os materiais celulósicos. Em números aproximados, em uma base seca, ela contém 40 a 50% de celulose, 20 a 30% de lignina e 10 a 30% de hemiceluloses e polissacarídeos diferentes de celulose. Resinas, gomas, proteínas e compostos minerais também estão presentes na composição da madeira.

2.7.1 Nitrocelulose

A Nitrocelulose ou Nitrato de celulose é um éster, polímero com massa molecular variável composto por unidades de d-glucopirranose ligadas por ligações glicosídicas com uma

conformação β -(1-4). Sendo um derivado da celulose, as diferenças estruturais com esta última espécie orgânica consistem na substituição dos grupos hidroxilo (-OH) por grupos nitro (-ONO₂), pelo processo de nitração (Louro & Neves, 2023).

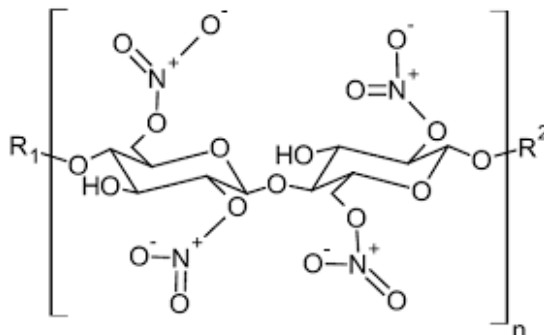


Figura 5: Estrutura do monómero de trinitrocelulose

Fonte: (Reis et al., 2019)

A nitrocelulose é um polímero sólido inodor e insípido, com uma aparência branca semelhante à do algodão (quando a celulose é proveniente do algodão), no entanto, tem uma densidade superior que o algodão (Mattar et al., 2020).

Entre as vantagens da NC destacam-se as baixas emissões de gases prejudiciais aos equipamentos e a baixa produção de fumaça durante a combustão. A NC é altamente inflamável, o que propicia o seu uso como agente de ignição de bríquetes.

De acordo com (Calmbacher, 2020) e (Mattar et al., 2020), as propriedades da NC variam de acordo com a fonte de celulose, o método de nitração, a força do ácido reagente, a temperatura, o tempo de reacção e a proporção ácido/celulose. Variações no teor de Nitrogénio da nitrocelulose conferem características diferentes a cada formulação. A nitrocelulose com teor de nitrogénio abaixo de 12,3% é usada para lacas, revestimentos e tintas, enquanto a de teor de nitrogénio acima de 12,6% é considerada explosiva.

A instabilidade térmica da nitrocelulose aumenta à medida que o teor de nitrogénio na sua estrutura também aumenta. Esta característica confere à nitrocelulose uma alta taxa de geração de portadores de cadeia (radicais livres) durante o processo de aquecimento, ou seja, geração de moléculas reactivas que participam da reacção de decomposição. Isto favorece a ignição, iniciando uma reacção de combustão que pode propagar-se rapidamente (Calmbacher, 2020; Keivens, 2019; Mattar et al., 2020; Ott et al., 1954).

2.7.2 Nitração da Celulose

A nitração de celulose é uma reacção de substituição de H^+ dos grupos OH^- na celulose (imagem abaixo), pelo grupo NO_2^+ do ácido nítrico (HNO_3) (imagem b) (Saragi et al., 2014).

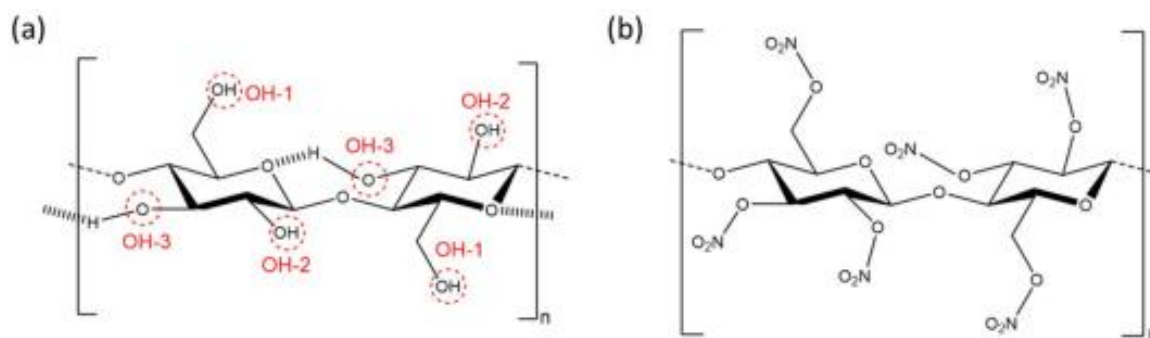
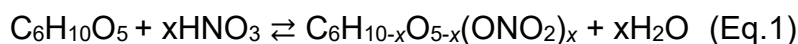


Figura 6: Estrutura da celulose (à esquerda) e do trinitrato de celulose (à direita)
(Fonte: Cheung, 2014)

De forma genérica, a celulose reage com o ácido nítrico formando nitrato de celulose e água. A reacção é uma substituição electrofílica catalisada, em que o electrófilo NO_2^+ substitui um ou mais hidrogénios do grupo OH^- . De acordo com (Urbanski, 1965), esta reacção pode ser resumida na seguinte equação química:



Em geral, os métodos de nitração usam uma combinação de ácido nítrico e um agente secundário, que é tipicamente um ácido (ácido sulfúrico ou fosfórico), que actua como um agente desidratante, para aumentar a concentração de NO_2^+ . O papel do agente de nitração secundário é de conferir três importantes características de controlo, nomeadamente:

- (i) Dilatação das fibras de celulose, para promover a penetração profunda de NO_2^+ na estrutura da celulose;
- (ii) Reacções laterais concorrentes, para remover impurezas;
- (iii) Hidrólise, que reduz o comprimento da cadeia do polímero;

Outras funções do agente secundário são a protonação do HNO_3 , a desidratação do meio, reduzindo a diluição da solução e manutenção do pH do meio. Sem a presença de um ácido mais forte, propõe-se que a formação de NO_2^+ pela desproporção de duas moléculas de HNO_3 produziria o ácido nítrico protonado e um anião NO_3^- , seguido pela geração do NO_2^+ , por meio da eliminação de água, mas em uma quantidade muito

menor comparativamente à nitração com ácido misto (Morris et al., 2023 e Cheung, 2014).

A reacção entre a celulose e a solução sulfonítrica composta de ácido nítrico (HNO_3) e sulfúrico (H_2SO_4) é o método de nitração mais comum e usado em processos comerciais. O ácido sulfúrico concentrado pode actuar como um solvente para a celulose, formando fortes interacções com os grupos OH^- e permitindo a quebra das interacções de ligação de hidrogénio na celulose. Pelo facto da celulose ser um material fibroso, as suas fibras devem ser embebidas pelo solvente para evitar que ocorra apenas uma nitração superficial. A proporção entre o ácido nítrico e sulfúrico constitui um parâmetro crítico a considerar no processo de nitração. De modo geral, o aumento da proporção de ácido sulfúrico tende a elevar o grau de nitração (GN) do produto final, influenciando directamente o rendimento da reacção.

Dependendo da formulação, existem diversas proporções de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ para a composição da mistura sulfonítrica. (Faria, 1994) no seu estudo sobre a preparação de nitrato de celulose à base de bagaço de cana-de-açúcar, concluiu após várias formulações, que a composição óptima da mistura é de 63% de H_2SO_4 , 21% de HNO_3 e 16% de H_2O . Isto é, a proporção de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$ deve ser de 1:3. A mesma proporção é defendida por (Morris et al., 2023), que reitera que em processos de nitração da celulose, com proporções maiores que três equivalentes estequiométricos de ácido sulfúrico para ácido nítrico, o grau de nitração resultante começa a diminuir.

Para a proporção celulose/mistura sulfonítrica, (Faria, 1994), concluiu que a proporção óptima é de 1:60, na base mássica. No mesmo estudo, o teor final de nitrogénio obtido no processo de nitração de bagaço de cana-de-açúcar branqueado foi de 11,80% para a mistura inicial e de 11,88% para a mistura residual, com o tempo óptimo de reacção de 90 minutos.

A substituição da celulose constitui um parâmetro de grande relevância na reacção de nitração. Durante este processo, os grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) presentes na molécula de celulose são parcialmente ou totalmente substituídos por grupos *nitro* ($-\text{NO}_2$). Consoante o número de grupos $-\text{OH}$ substituídos, o grau de substituição do nitrato de celulose pode classificar-se como mono-, di- ou tri-substituído. Assim, se apenas um grupo hidroxilo for substituído, obtém-se a mono-nitrocelulose; dois grupos, forma-se a di-nitrocelulose; e se todos os três grupos hidroxilo forem substituídos, resulta a tri-nitrocelulose.

Segundo (Urbanski, 1965), a percentagem de nitrogénio incorporada na estrutura da molécula permite determinar o tipo de nitrocelulose formada, conforme os intervalos apresentados na tabela abaixo.

Tabela 2: Classificação da celulose de acordo com o número de grupos substituídos baseado na percentagem de Nitrogénio da Nitrocelulose
(fonte: Urbanski, 1965)

Grau de Substituição	Fórmula molecular	Percentagem de Nitrogénio (%)
trinitrato de Celulose	$C_6H_7O_2(ONO_2)_3$	14,15
dinitrato de Celulose	$C_6H_7O_3(ONO_2)_2$	11,11
mononitrato de Celulose	$C_6H_7O_4(ONO_2)$	6,76

Outro factor importante que afecta as propriedades e aplicações da nitrocelulose é o grau de nitração. Isto é, a quantidade de nitrogénio disponível no produto final. Quando a nitrocelulose tem um baixo grau de nitração, ela é usada em aplicações médicas e industriais, como tintas. No entanto, quando a nitrocelulose tem um alto grau de nitração, superior a 12,5%, ela é aplicada em explosivos e torna-se termicamente instável. (Mattar et al., 2020)

O grau de nitração é a percentagem que refere-se ao número de grupos *nitro* ($-NO_2$) que foram introduzidos nas unidades de anidroglicose da celulose durante o processo de nitração. Este parâmetro é essencial para definir as propriedades químicas e físicas do produto final, como a solubilidade, reactividade e principalmente a sua explosividade (Mattar et al., 2020).

Com base no teor de nitrogénio, do nitrato de celulose produzido, pode se determinar o Grau de Nitração pela seguinte fórmula:

$$GN(\%) = \frac{14 \cdot N - 100}{162 + 45 \cdot N} \quad (\text{Eq. 2})$$

(Fonte: (Faria, 1994))

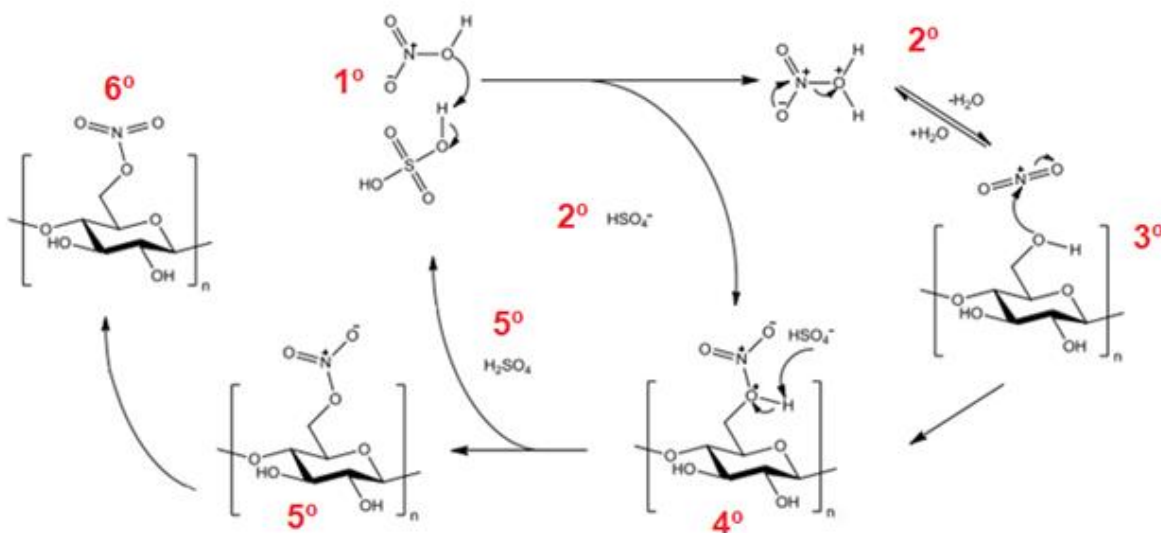
Onde GN é o grau de nitração e N é a percentagem de nitrogénio no nitrato de celulose;

2.7.2.1 Mecanismo da Nitração da Celulose

A reacção de nitração da celulose segue o mecanismo de uma reacção de substituição electrofílica. Ela inicia quando mistura-se a fonte da celulose à mistura sulfonítrica. O mecanismo desta reacção está ilustrado nos passos mais abaixo e no esquema a seguir, que ilustra a reacção em etapas, adaptado do mecanismo descrito por (Cheung, (2014):

- 1º No sistema reaccional, o H_2SO_4 que é um ácido forte, ataca e faz a protonação do HNO_3 , doando um protão e o HNO_3 dissocia-se;
- 2º A espécie resultante da protonação – H_2NO_3^+ , que é semelhante ao hidrónio, elimina uma molécula de H_2O e o anião HSO_4^- liberta-se;
- 3º Da dissociação forma-se um ião nitrónio (NO_2^+), que é o agente da nitração, ou seja, o electrófilo que vai promover a nitração e ocorre o ataque a um grupo OH.
- 4º O agente nitrante promove a substituição electrofílica do ião H^+ e o NO_2^+ liga-se ao oxigénio;
- 5º Após este ataque forma-se um composto instável, que se estabiliza quando o H^+ do grupo OH atacado, liga-se ao HSO_4^- regenerando o catalisador H_2SO_4 .
- 6º O Nitrato estabiliza-se e a reacção prossegue em tal medida que, mais grupos *hidroxilo* na celulose são substituídos por grupos *nitro*, formando a nitrocelulose.

Figura 7: E



esquema do mecanismo da reacção de Nitração

(Fonte:(Cheung, 2014) adaptado)

2.7.3 Estabilização da Nitrocelulose

Após o processo de nitratação, para além da humidade, a nitrocelulose pode conter traços de ácidos residuais, como o ácido sulfúrico e o ácido nítrico. Esses ácidos podem permanecer adsorvidos à superfície ou no interior das fibras de nitrocelulose. Os ácidos residuais podem reagir lentamente com a nitrocelulose ao longo do tempo, degradando-o e produzindo gases e compostos instáveis. Esse processo pode levar ao auto-aquecimento e elevar a susceptibilidade de combustão espontânea ou de explosão.

Para prevenir acidentes durante a manuseamento e armazenamento, a NC deve ser estabilizada e secada adequadamente. A estabilização reduz o risco de decomposição espontânea ou explosão. O processo consiste em ferver o material nitrado em água ou metanol diversas vezes, após cada ciclo de filtração/centrifugação para remover os ácidos residuais adsorvidos. A adição de bicarbonato de sódio, NaHCO_3 , actua para neutralizar o ácido desorvido e acelerar o processo (Cheung, 2014).

2.8 Teor de Matéria Volátil

A matéria volátil é definida como os produtos que são libertados na forma de gás ou vapor por um material após o aquecimento, excluindo a humidade. Estes componentes voláteis tendem a desprender-se do material combustível a temperaturas relativamente baixas, à medida que este aquece, dependendo de material para material estas temperaturas variam entre 100° à 500° C (Vilas-Boas et al., 2023).

A matéria volátil constitui a maior fracção de qualquer biomassa, sendo composta por espécies como hidrogénio, hidrocarbonetos leves, alcatrão, água, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2), que são libertados durante o aquecimento. Apesar da presença destes voláteis ser um factor promotor da ignição, uma elevada concentração destes pode impedir o alcance de temperaturas altas durante a queima. Pois quanto maior for o TMV maior é a energia consumida para a sua vaporização e decomposição, originando instabilidade na sustentação da chama, baixas temperaturas globais da chama e reduzindo a eficiência térmica do processo (Silva et al., 2021).

Para (Nakashima et al., 2014), quanto maior for o teor de matérias voláteis, mais fácil será a ignição do combustível e mais rápida, a sua queima. Por outro lado, materiais baixos teores de voláteis resultam em combustão lenta (que pode ser considerada de elevada susceptibilidade de ser incompleta), e mais prolongada é a liberação de fumaça e gases tóxicos.

3.1 Briquetagem

3.1.1 Materiais

Para a briquetagem o material usado foi a serradura, que constitui a matéria-prima dos briquetes.

1. Serradura

A serradura utilizada foi colectada na carpintaria da Universidade Eduardo Mondlane (UEM), a partir do resíduo acumulado no seu interior antes do descarte. Esta serradura constitui uma mistura proveniente da serração das madeiras de Chanfuta e de Umbila, em proporções não especificadas.



Figura 8: Serradura recolhida na Carpintaria da Faculdade de Engenharia – UEM antes da moagem

3.1.2 Equipamentos

A seguir são listados os equipamentos utilizados no processo de produção e caracterização dos briquetes de serradura.

1. Prensa hidráulica

Equipamento destinado à compactação da biomassa em moldes de geometria cilíndrica. A prensa é constituída por duas placas (superior e inferior) e uma camisa de aquecimento, as quais permitem fornecer calor ao molde e controlar a sua temperatura durante o processo de briquetagem.



Figura 9: Prensa Hidráulica

2. Analisador de Humidade

Instrumento utilizado para a determinação do teor de humidade em amostras líquidas, pastosas ou sólidas, mediante o princípio da secagem controlada. O equipamento integra uma balança analítica interna de elevada sensibilidade e um sistema de aquecimento, permitindo a quantificação do teor de humidade.



Figura 10: Analisador de Humidade (Sartorius MA 100)

(Fonte: (Matos, 2021))

3. Moinho de Bolas

Equipamento cilíndrico, com movimento rotativo, destinado à redução do tamanho de partículas por meio do atrito e impacto promovido por bolas móveis no seu interior. No presente estudo, o moinho foi adaptado para a realização do ensaio de friabilidade de briquetes, sendo operado sem a utilização das bolas. Durante o teste, o tambor em rotação submete os briquetes a condições de impacto e abrasão, permitindo avaliar a sua resistência mecânica e a consequente geração de partículas finas.

CAPÍTULO III



Figura 11: Moinho de bolas usado para realizar o ensaio de friabilidade
(Fonte: (Matos, 2021))

4. Balão volumétrico plástico de 100ml

Recipiente utilizado para a determinação da densidade a granel da serradura. O material é introduzido no balão até ao completo enchimento, procedendo-se, em seguida, à pesagem da massa para o cálculo da densidade a granel.

5. Peneiros

Instrumentos com malhas de diferentes aberturas utilizados para a separação da biomassa em frações granulométricas. No presente estudo, foi empregue uma série de peneiros com as seguintes aberturas em mm: 4,75, 2, 1,18, 1 e 0,5.

6. Paquímetro digital

Instrumento de medição utilizado para a determinação da altura e do diâmetro dos briquetes. As dimensões obtidas servem de base para as análises de estabilidade dimensional ao longo do tempo, bem como para o cálculo da densidade aparente.



Figura 12: Paquímetro digital (marca: Mitutoyo; modelo: CD-6" CSX)

7. Combustor

É um fogão metálico utilizado para a realização de ensaios de combustão de briquetes. Possui geometria adequada para acomodar os briquetes, garantindo ventilação eficiente

CAPÍTULO III

e sustentação da queima. Durante o ensaio, a temperatura é registada por um termopar, o tempo de combustão é monitorado por um cronómetro, e a massa consumida é determinada por uma balança posicionada sob o combustor.



Figura 13: Combustor

Fonte: (Matos, 2021)

8. Dessecador

Recipiente hermético contendo adsorvente (sílica gel), usado para acomodar os cadinhos durante o seu arrefecimento após a retirada da mufla, evitando absorção de humidade do ambiente antes da pesagem.



Figura 14: Dessecador

CAPÍTULO III

9. Cadinhos

Recipientes pequenos de material refractário (níquel para os metálicos e porcelana para os cerâmicos). Utilizados para conter amostras no interior da mufla durante os ensaios em altas temperaturas (matéria volátil e cinzas). Evitando a perda de material e assegurando a precisão da análise.



Figura 15: Cadinhos metálicos retirados da mufla após o teste de voláteis

Fonte: Matos, 2021

10. Estufa de secagem

Forno de baixa temperatura, utilizado para a remoção da humidade das amostras antes da realização de ensaios de determinação de matéria volátil e de cinzas.



Figura 16: Estufa

CAPÍTULO III

11. Mufla

Forno da marca Termolab – Fornos Elétricos; modelo: MLM. Equipamento capaz de atingir temperaturas superiores a 1000 °C, utilizado para o aquecimento da biomassa nos ensaios de determinação de matéria volátil (950 °C durante 7 min) e de cinzas (600 °C durante 15 h).



Figura 17: Mufla

12. Moinho ultracentrifugo

Equipamento da marca Retsch, modelo ZM 200 utilizado para a redução rápida do tamanho de partículas, apresentando elevadas velocidades de rotação que permitem a moagem até dimensões na ordem de 40 µm de diâmetro. No presente estudo, foi empregado para a moagem da serradura após a sua colecta.



Figura 18: Moinho ultracentrifugo

CAPÍTULO III

13. Ventilador

Equipamento utilizado para reduzir a temperatura do molde após a compactação. Por convecção forçada, permite que o molde atinja valores operacionalmente seguros de forma rápida (<70 °C) para o manuseio e a remoção do briquete produzido.

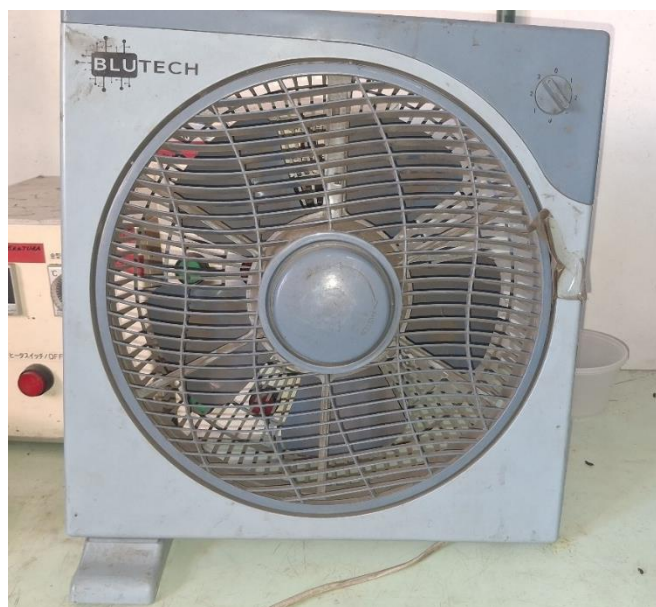


Figura 19: Ventilador

3.1.3 Métodos

3.1.3.1 Análise granulométrica

A peneiração é um método clássico para realização da análise granulométrica que permite obter fracções classificadas da amostra com especificações de tamanhos máximo, médio e mínimo das partículas. Para a classificação da amostra, pesou-se 300 g de amostra de serradura usando a balança analítica de precisão 0,0001g, que foram colocados em uma série de peneiros (de mesh 4, 10, 16, 80, 170), para realizar a peneiração por 10 minutos com vibração manual.

Depois da peneiração, as massas retidas nos peneiros foram pesadas e as fracções calculadas.

$$x_i = \frac{\text{massa retida no peneiro } i}{\text{massa total}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: x_i – fracção retida no peneiro i ;

CAPÍTULO III

3.1.3.2 Determinação do teor de Humidade *in natura*

Humidade *in natura* é a quantidade de água que a serradura apresenta após a recolha. Para a sua determinação foi usado um analisador de humidade de marca *Sartorius*, modelo MA 100. O procedimento consistiu em pesar 1 g de amostra por vez, utilizando a balança integrada ao analisador de humidade. Colocada a amostra, o equipamento foi iniciado para dar início ao processo de análise. No final de cada uma das 3 análises, os resultados foram lidos directamente no visor digital do analisador.

3.1.3.3 Determinação da Densidade a granel

Refere-se à densidade da biomassa moída antes da briquetagem e permite conhecer o grau de compactação da biomassa *in natura*. Para a obtenção deste valor, pesaram-se balões volumétricos vazios, em seguida com auxílio de uma espátula, as amostras foram introduzidas no balão volumétrico de modo a preenchê-lo até ao limite de 100 cm³. Os balões contendo as amostras foram novamente pesados para determinar as massas que couberam no volume de 100 cm³. Obtidas as massas, a densidade a granel foi determinada através da equação abaixo:

$$\rho_{\text{granel}} = \frac{\text{massa total} - \text{massa do balão vazio}}{100 \text{ cm}^3} \quad (\text{Eq. 4})$$

3.1.3.4 Produção de briquetes

Os briquetes produzidos tiveram massas variáveis de 30,40 e 50 gramas da amostra. Para a compactação, a amostra após pesada é inserida em um molde cilíndrico de aço inoxidável e é compactada por uma prensa laboratorial. À volta do molde são colocadas uma camisa (em volta) e placas (por cima e baixo) que permitem o fornecimento de calor para o aquecimento do molde e através, de condução, para a biomassa. A compactação é realizada a uma pressão constante de 10MPa e temperatura de 120°C que é monitorada através de termopares do tipo K. Atingida a temperatura de 120°C o aquecimento cessa, e liga-se o ventilador para arrefecer o molde até que a temperatura atinja um valor que permita o manuseamento e a retirada do briquete, geralmente entre 70 à 50° C. Atingida a temperatura, o briquete é removido do molde, pesado, medido e armazenado.



Figura 20: Parte dos briquetes de serradura produzidos

3.1.3.5 Estabilidade dimensional dos briquetes

Para verificar a estabilidade dimensional, mede-se a altura do briquete com auxílio de um paquímetro após a sua produção, num intervalo de 0, 1, 24 48, 72 e 96 horas, a fim de acompanhar a sua expansão longitudinal, até que não se verifiquem alterações significativas das suas dimensões. Para determinar a expansão longitudinal do briquete no tempo (t), utiliza-se a expressão:

$$\text{Elongação} = \frac{h_{t=t} - h_{t=0}}{h_{t=0}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

Elongação [%]

h_t – altura do briquete em um determinado tempo [mm] após a sua produção; t – tempo [horas]

3.1.3.6 Determinação da Densidade Aparente

A determinação da densidade aparente é feita tirando as dimensões e pesando o briquete formado após atingir a estabilidade dimensional, ou seja, após o briquete revelar constância das suas dimensões com o tempo. As medições da altura e do diâmetro do briquete foram efectuadas por meio de um paquímetro. Com base na massa e no volume obtidos do briquete, calculou-se a sua densidade, conforme a equação abaixo:

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{m_{\text{final}}}{V_{\text{final}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

m_{final} é a massa final do briquete após atingir a estabilidade [kg]

V_{final} o volume nas condições indicadas anteriormente [m³].

CAPÍTULO III

3.1.3.7 Ensaio de Friabilidade

O teste de friabilidade é realizado com base na determinação da resistência dos briquetes à acção combinada entre a abrasão, o impacto e a queda. Este teste resulta na produção de partículas finas, que simulam o manuseamento, transporte e armazenamento. O cálculo da quantidade de finos perdidos (%) é feito através da seguinte expressão matemática:

$$\text{friabilidade} = \frac{\text{massa}_{\text{inicial}} - \text{massa}_{\text{final}}}{\text{massa}_{\text{inicial}}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 7})$$

onde: $\text{massa}_{\text{inicial}}$ e $\text{massa}_{\text{final}}$ são massas [g] do briquete antes e após o ensaio.

O ensaio foi realizado pesando inicialmente 3 briquetes que, em seguida, foram introduzidos em um tambor rotativo com velocidade constante durante 5 minutos. Após este processo, os briquetes foram retirados do tambor e pesados novamente, permitindo assim calcular a percentagem de finos gerados durante o teste de *tamboramento*. O tambor usado foi o do moinho de bolas vazio (marca: Anand A.C Induction Motor), com 40 rpm (rotações por minuto) totalizando 200 rotações em 5 minutos.

3.1.3.8 Determinação do Teor de Matéria Volátil

Para a determinação do conteúdo em voláteis, foi usado o Protocolo E-872-82 da NORMA ASTM. O procedimento consistiu em pesar 1g da biomassa com uma granulometria menor que 0.475mm, secada por 24 horas na estufa à 105°C. A amostra foi colocada em um cadinho de Níquel, com tampa para evitar contacto com o ar durante a devolatilização (perda de voláteis). O cadinho coberto foi colocado na mufla a uma temperatura de 950°C e mantido por 7 minutos. Em seguida, as amostras foram removidas, arrefecidas num dessecador e pesadas para determinar a perda de massa devido à devolatilização. O teor de voláteis foi determinado pela fórmula:

$$\text{TMV} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{amostra}}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

TMV – teor de voláteis [%];

m_{inicial} = massa do cadinho + amostra [g];

m_{final} = massa final após a devolatilização [g];

m_{amostra} : massa da amostra inicial [g].

CAPÍTULO III

3.1.3.9 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas corresponde aos elementos inorgânicos (Cálcio, Potássio, Ferro, entre outros minerais) que participam da composição da biomassa, mas não sofrem combustão, sendo responsáveis pela formação das cinzas residuais (Chen, 2015). Para o efeito, foi usado o Protocolo D-1102 da NORMA ASTM. O procedimento consistiu em pesar o cadinho de porcelana vazio, introduzir 2g da biomassa (partículas menores que 0.475 mm) secadas por 24 horas na estufa à 105°C, e colocar as amostras no cadinho (com a tampa removida) na mufla (marca: Termolab – Fornos Eléctricos; modelo: MLM), permanecendo a 600°C por um período de 15 horas por forma a garantir que toda a matéria orgânica fosse calcinada. Os cadinhos foram removidos da mufla, o arrefecimento das amostras foi continuado num dessecador até à temperatura do ambiente. Os cadinhos contendo as cinzas foram pesados e os dados obtidos foram usados para a determinação do teor de cinzas. Este procedimento foi realizado em *triplicata* para cada amostra. O teor de cinzas foi determinado pela fórmula:

$$TC = \frac{\text{massa final} - \text{massa do cadinho}}{\text{massa da amostra inicial}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

TC: teor de cinzas [%];

massa final = massa do cadinho + cinzas [g]

3.1.3.10 Determinação do Poder Calorífico:

O poder calorífico é a quantidade de energia desprendida por unidade de massa ou de volume na combustão completa de um material combustível. Esta grandeza depende basicamente da composição química de cada combustível sendo comumente expressa em J/kg ou cal/kg.

O poder calorífico superior (PCS) foi estimado por meio de correlação empírica, desenvolvida por (Parikh et al., 2004) através de resultados experimentais da análise imediata. O poder calorífico inferior (PCI,) foi calculado de acordo com a fórmula usada por (Gomide, 1984) e o poder calorífico útil (PCU) por meio da correlação recomendada por (Brito, 1993). As correlações para a determinação de PCI e PCU exigem o valor do teor de Hidrogénio da biomassa. Neste estudo, para o Hidrogénio foi usada a correlação desenvolvida também por (Parikh et al., 2007) em seu estudo sobre correlações para a análise elementar de biomassa. As equações que permitiram determinar estes parâmetros foram:

CAPÍTULO III

$$PCS = 0,3536 \cdot (TCF) + 0,1559 \cdot (TMV) - 0,0078 \cdot (TC) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$PCI = PCS - \frac{600 \times 9 \cdot H}{100} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$PCU = PCI \cdot (1 - TH) - 600 \cdot (TH) \quad (\text{Eq. 12})$$

$$H = 0,052 \cdot (TCF) + 0,062 \cdot (TMV) \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

PCS – poder calorífico superior [J/kg];

PCI – poder calorífico inferior [J/kg];

PCU – poder calorífico útil [kcal/kg]; TC – teor de cinzas [%];

TMV – teor de voláteis [%]; TCF – teor de carbono fixo [%];

TH – teor de humidade [%]

3.1.3.11 Índice de combustão

O índice de combustão (ICOM) é um parâmetro adimensional que integra em um só valor, o tempo de combustão, a temperatura gerada durante a combustão e a massa consumida para gerá-la. Para realizar o teste e avaliar o comportamento dos briquetes na combustão, construiu-se um sistema semelhante ao desenvolvido por (Quirino & Brito, 1991).

A experiência é realizada em um combustor, com recurso a outros equipamentos como balança, uma placa de madeira, cronómetro e termopares. Matematicamente, o índice é determinado da seguinte forma:

$$ICOM = \frac{(A \times B)}{(C \times 100)} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

A: percentagem do tempo de teste no qual a temperatura permaneceu acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total [%];

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 [%]

3.1.3.12 Densidade Energética

A densidade energética ou quantidade de calor por unidade de volume é uma propriedade que avalia o desempenho da biomassa como combustível, pois resume às

CAPÍTULO III

características físicas, químicas e térmicas (densidades, composição química e poder calorífico) e é determinada através do produto matemático entre o poder calorífico e a densidade (aparente para o bríquete e a granel para o resíduo).

$$\rho_{\text{energética}} = \rho_{\text{granel/aparente}} \cdot \text{PCU} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

$\rho_{\text{energética}}$, ρ_{granel} , ρ_{aparente} – densidades energética, a granel e aparente [J/m^3];

PCU – poder calorífico útil [J/kg].

3.2 Síntese da Nitrocelulose

A síntese do nitrato de celulose a partir do bagaço de cana-de-açúcar exige a utilização de reagentes de elevada pureza e de materiais auxiliares cuidadosamente selecionados, de forma a assegurar a eficiência da reação e a estabilidade do produto final. A seguir são descritos os principais materiais, equipamentos e a matéria-prima de base, bem como o seu papel específico no processo de nitração.

3.2.1 Materiais

1. Ácido nítrico fumegante a 100%

Agente nitrante altamente oxidante, responsável pela introdução dos grupos nitro ($-\text{NO}_2$) na estrutura da celulose.

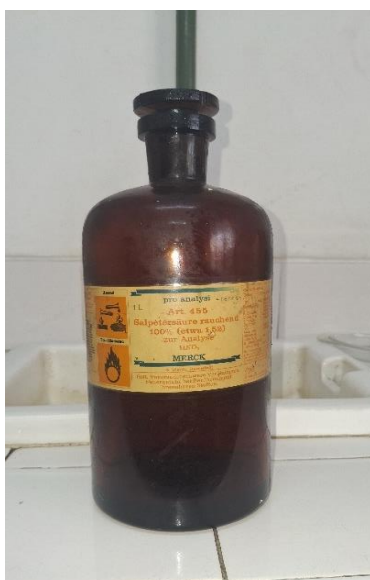


Figura 21: Recipiente contendo o ácido nítrico usado

CAPÍTULO III

2. Acido sulfúrico a 98%

Actua como agente desidratante e catalisador da reação de nitração, estabilizando o sistema reacional.

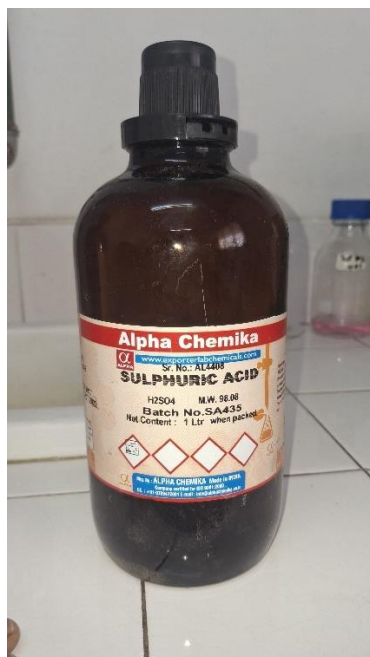


Figura 22: Recipiente contendo o ácido sulfúrico usado

3. Água destilada

Necessária para a preparação da mistura sulfonítrica e para a lavagem da nitrocelulose, removendo impurezas e excesso de ácidos

4. Bicarbonato de Sódio

Utilizado na neutralização da nitrocelulose durante a estabilização, eliminando acidez residual e promovendo a estabilização do produto.

5. Gelo

Utilizado em banho de água líquida para envolver o balão volumétrico durante a preparação da mistura sulfonítrica, com o objectivo de absorver o calor gerado pela reação exotérmica. Mantendo a temperatura baixa e controlada, assim como garante a segurança do processo e a estabilidade dos reagentes.

6. Bagaço de cana-de-açúcar

Matéria-prima proveniente da cana sacarina rica em celulose, utilizada para a síntese do nitrato de celulose. O bagaço de cana-de-açúcar foi obtido do comércio ambulante na baixa da cidade de Maputo.



Figura 23: Cana-de-açúcar (à esquerda)

Figura 24: Bagaço (à direita) - recolhidos em locais de venda ambulante de sumo de extracto de cana-de-açúcar, nas ruas da Cidade de Maputo)

3.2.2 Equipamentos

A seguir são listados os equipamentos utilizados no processo de síntese de nitrato de celulose:

1. Moinho de facas

Equipamento utilizado para uma primeira fragmentação e redução do bagaço de cana-de-açúcar até diâmetro de partículas menores antes da moagem no moinho ultracentrifugo.



Figura 25: Moinho de facas

2. Moinho ultracentrifugo

Após a fragmentação no moinho de facas bagaço foi moído novamente com o objectivo de obter partículas de granulometria menor que 1mm.

CAPÍTULO III

3. Balança:

Instrumento de 5 g de precisão (marca: ADAM; modelo: SA 1422) utilizado para a pesagem de reagentes;

4. Estufa

No presente processo, foi empregada para a remoção gradual da humidade residual da nitrocelulose após a fase de lavagem e estabilização. A secagem foi feita a uma temperatura de 50 °C durante 24 horas, evitando a decomposição térmica e carbonização do produto.

5. Balão volumétrico de 10L

Recipiente utilizado para a preparação da mistura sulfonítrica e para a realização da reacção de nitração, suportando a adição de ácidos e do bagaço.

6. Erlenmeyer de 1L

Recipiente de vidro com base larga e topo estreito utilizado para o transporte e manuseio dos reagentes.

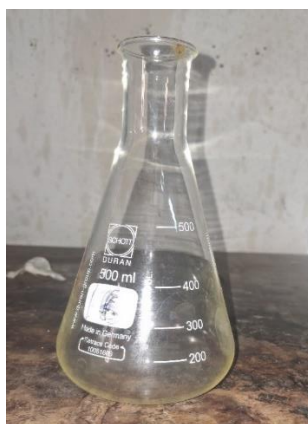


Figura 26: Erlenmeyer

3.2.3 Métodos

A nitração da celulose foi realizada em 6 etapas distintas, nomeadamente: preparação do bagaço de cana-de-açúcar, preparação da mistura sulfonítrica; reacção, estabilização, lavagem e secagem. Por fim, obtido o nitrato de celulose, procedeu-se à determinação do teor de matéria volátil.

3.2.3.1 Preparação do bagaço de cana-de-açúcar

A preparação do bagaço consistiu na sua moagem. A amostra colectada foi inicialmente fragmentada e moída no moinho de facas e posteriormente, submetida a uma segunda

CAPÍTULO III

moagem no moinho ultracentrifugo que permite obter de forma rápida, partículas com diâmetro inferior a 1mm, considerado adequado para a briquetagem.

3.2.3.2 Preparação da mistura sulfonítrica

A mistura sulfonítrica preparada é constituída por uma solução de HNO_3 e H_2SO_4 . O volume total foi de 2 litros, baseou-se na proporção 1/3 em volume de $\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$; as percentagens dos volumes de cada um dos componentes foram 63% de H_2SO_4 , 21% de HNO_3 e 16% de H_2O , correspondendo a $V_{\text{H}_2\text{SO}_4}=1,26\text{L}$, $V_{\text{HNO}_3} = 0,42\text{L}$ e $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,32\text{L}$.

Com base nas densidades dos ácidos: $\rho_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1,83 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{HNO}_3} = 1,51 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ g/cm}^3$. foi determinada a massa de cada componente da solução tendo sido obtidos os seguintes valores: $m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1265 \text{ g}$, $m_{\text{HNO}_3} = 634,2 \text{ g}$ e $m_{\text{H}_2\text{O}} = 320 \text{ g}$, e a massa total de 2219,2 g.

A preparação da mistura seguiu as seguintes etapas:

1. Foram pesados 320g de água destilada em uma balança, através de um Erlenmeyer e colocados em um balão volumétrico inicialmente vazio de 10L;
2. Em seguida, foram adicionados 1265g de H_2SO_4 , lentamente à água contida no balão de 10L e agitou-se a solução resultante;
3. Finalmente, foram lentamente adicionados à solução anterior, 634,2g de HNO_3 fumegante a 98%;
4. A solução resultante foi homogeneizada por agitação;
5. O balão contendo a solução foi colocado por 30 minutos, em um recipiente contendo água líquida e gelo para absorver o calor produzido pela reacção.



Figura 27: Mistura Sulfonítrica preparada no balão de 10L

CAPÍTULO III

3.2.3.3 Reação de Nitração

Após a preparação da mistura sulfonítrica, esta foi mantida no balão volumétrico. Em seguida pesou-se 210g de bagaço de cana-de-açúcar e adicionou-se ao balão contendo a mistura. A proporção ideal entre Bagaço/Mistura Sulfonítrica é de 1:60, no entanto devido a indisponibilidade de reagentes ajustou-se a proporção para cerca de 1:10, isto é 210:2219.

O tempo de reacção entre o bagaço e a mistura nitrante foi de cerca de 90 minutos, com agitação manual do balão em intervalos de 3 minutos. Após os 90 minutos de reacção, o sistema reacional foi retirado do balão e filtrado para a separação da mistura sulfonítrica residual do bagaço nitrado, e seguiu-se a estabilização.

3.2.3.4 Estabilização e Lavagem

A estabilização ou neutralização foi feita por meio de lavagem com água destilada e bicarbonato de sódio. O nitrato de celulose foi adicionado à água e, em seguida, adicionou-se lentamente o bicarbonato de sódio à solução. A neutralização foi repetida várias vezes até que a solução deixasse de borbulhar ao adicionar-se o bicarbonato de sódio. Após a neutralização, procedeu-se com a lavagem final da nitrocelulose com água e de seguida removeu-se o líquido remanescente.



Figura 28: Processo de estabilização e lavagem da biomassa

CAPÍTULO III

3.2.3.5 Secagem

A secagem foi realizada em duas etapas, a primeira no interior de uma estufa regulada a temperatura de 50° C durante 24 horas (temperaturas superiores carbonizaram a NC). A segunda etapa, foi a secagem à temperatura ambiente por 3 dias, tendo-se seguido o armazenamento da NC.

Após a síntese, a nitrocelulose foi submetida a análises de teor de matérias voláteis seguindo os mesmos procedimentos descritos em 3.1.2.

Para a síntese da nitrocelulose residual (NCR) procedeu-se à repetição do processo de nitração, utilizando-se a mistura residual. Esta foi reintroduzida no balão de 10 litros, ao qual se introduziu uma nova amostra de bagaço de cana-de-açúcar. Seguidamente, repetiram-se os passos subsequentes do processo de nitração até à obtenção da nitrocelulose residual.

A nitração foi repetida para a mistura residual, adicionou-se a mistura residual novamente ao balão de 10L, e uma nova amostra de bagaço de cana-de-açúcar foi nitrada seguindo os mesmos passos, até a obtenção de nitrocelulose residual.



Figura 29: Nitrocelulose simples (à esquerda) e residual (à direita) após a secagem

CAPÍTULO III

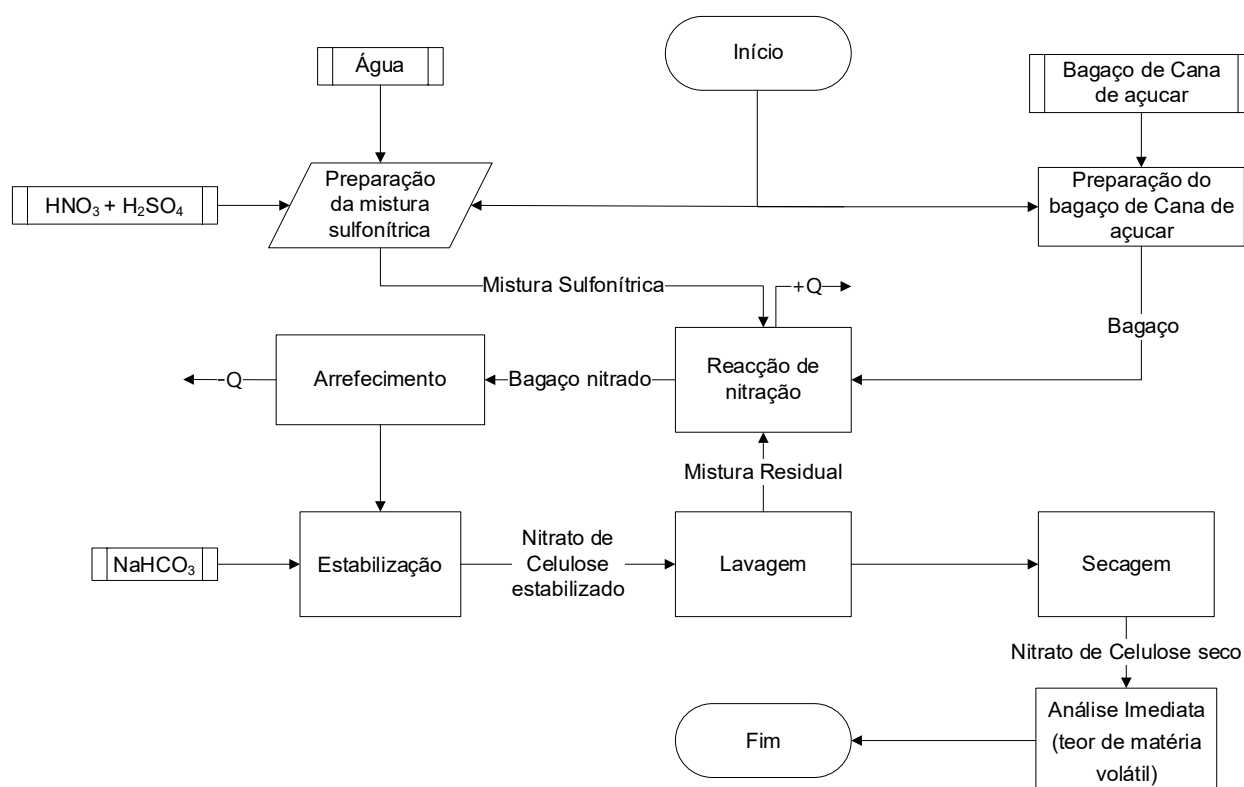


Figura 30: fluxograma do processo de nitração do Bagaço de cana-de-açúcar

3.3 Cobertura dos briquetes

Após a produção inicial dos briquetes e da NC, procedeu-se à aplicação manual da segunda camada de revestimento contendo o agente de ignição. Esta camada foi agregada utilizando cola de madeira como agente aglutinante.

A utilização de cola de madeira como aglutinante na aplicação da segunda camada, composta por nitrocelulose (NC), deveu-se a diversos factores técnicos e operacionais. Entre os principais, destaca-se a impossibilidade de realizar a briquetagem simultânea da serradura com o NC, devido à elevada sensibilidade térmica deste último, além de que o NC apresenta comportamento instável sob aquecimento, o que inviabiliza sua incorporação directa ao processo de briquetagem a quente.

Adicionalmente, a briquetagem a frio mostrou-se igualmente ineficaz, uma vez que não ocorreu a aglutinação desejada entre as partículas. Observou-se que, a temperaturas baixas, a camada contendo NC não aderiu de forma satisfatória à matriz do briquete, comprometendo a integridade estrutural do produto final. Em situações onde a temperatura foi gradualmente elevada durante o processo, verificou-se a carbonização da camada contendo NC, o que resultou em alterações indesejadas na composição e comportamento do material.

CAPÍTULO III

As imagens abaixo ilustram o resultado de um briquete submetido à briquetagem a frio com cobertura de NC. É possível observar a desintegração parcial do briquete, evidenciando a ausência de ligação eficiente entre as partículas. As fissuras e descontinuidades visíveis confirmam a falha no processo de aglutinação, reforçando a necessidade do uso de um aglutinante auxiliar, como a cola de madeira, para garantir a coesão da camada superficial.



Figura: 31: Briquete desfeito após tentativa de cobertura por briquetagem a frio

O molde utilizado para a briquetagem apresenta um diâmetro fixo de 5 cm, o que impossibilitou a fabricação directa de briquetes com diâmetros menores. Como alternativa metodológica, optou-se por produzir briquetes com o diâmetro disponível (5 cm) e, posteriormente, reduzir o seu diâmetro manualmente removendo a biomassa externa até alcançar o diâmetro desejado por meio de uma tesoura de poda.



Figura 32: Tesoura de poda utilizada para redução do diâmetro dos briquetes

Os briquetes foram reduzidos em 5 g, 10 g ou 20 g, resultando em massa final de 30 g, para estudos comparativos pois os briquetes de serradura produzidos possuem massas equivalentes. A massa inicial dos briquetes antes do revestimento foi de 30g, tendo se

CAPÍTULO III

adicionado o revestimento de 5 gramas para o briquete com massa final de 35 gramas, 10 para 40 g e 20 para briquetes de 50 gramas. A remoção da massa consistiu inicialmente, na demarcação de uma circunferência concêntrica de diâmetro desejado, e a parte externa a essa demarcação era removida de forma progressiva. Durante o processo, foram realizadas pesagens intermédias para garantir o controlo da massa. Após atingir a massa desejada, o processo de redução era considerado concluído, dando início à fase de cobertura com o agente de ignição.



Figura 33: Briquete produzido com dimensões-padrão (à esquerda) do molde e briquete com diâmetro reduzido manualmente (à direita)

O revestimento também foi aplicado manualmente. Primeiramente, a superfície do briquete reduzido foi revestida com uma camada uniforme de cola de madeira. Em seguida, a NC, previamente pesada na quantidade necessária para alcançar a massa final desejada, foi aplicada manualmente sobre a superfície do briquete. Com o uso de luvas de protecção, a NC foi pressionada manualmente contra o briquete, assegurando a sua aderência. Após a cobertura, os briquete finais constituídos por serradura + NC, foram de 3 grupos de massas distintas: 35, 40g e 50 gramas.



Figura 34: Briquetes com camada de cobertura adicionada nitrato de celulose simples (a esquerda) e nitrato de celulose residual (a direita)

CAPÍTULO III

3.4 Determinação do Tempo de Atraso a Ignição

A determinação do tempo de atraso à ignição foi realizada por meio de uma adaptação do método da câmara de vídeo proposto por Carmignani et al. 2019, conforme referido. Este método utiliza um aparelho de ignição, que constitui o suporte do combustível e a ele é acoplada uma câmera de vídeo para o registo visual do processo de ignição. A ignição é promovida por radiação através do fornecimento de energia térmica proveniente de um fio de aquecimento por resistência do tipo Kanthal.

A necessidade de adaptação do método deveu-se a limitações na montagem do aparelho de ignição originalmente utilizado. A adaptação consistiu na montagem de uma estrutura composta por um fogão doméstico, um colector de cinzas e um tripé com base superior circular, sobre o qual os bríquetes foram posicionados. O fogão funcionou como base da estrutura, enquanto o colector de cinzas e o tripé permitiram a elevação do bríquete até à altura de trabalho e proporcionaram o suporte necessário.

As imagens abaixo ilustram a estrutura adaptada montada para os testes:



Figura 35 e: Suporte de ignição adaptado para o teste de ignição

Igualmente foi utilizada uma câmara de vídeo de 50MP do telefone SAMSUNG A35 5G para a captação de imagens e um isqueiro multiusos da marca BIC Megalighter como fonte de energia térmica. A escolha deste isqueiro deve-se à sua capacidade de produzir uma chama contínua e de longa duração.

CAPÍTULO III



Figura 36: (à esquerda) Teste de ignição em um bríquete simples de 40 gramas

Figura 37: (à direita) Isqueiro BIC Megalighter

Após a montagem da estrutura, o bríquete foi colocado na base superior do tripé. De seguida, ligou-se a câmara, acionou-se um cronómetro para iniciar a contagem do tempo e acendeu-se o isqueiro multi-usos, cuja chama foi direccionada à superfície do bríquete.

No decorrer do teste, procedeu-se a um ligeiro afastamento do isqueiro a cada 10 segundos, com o intuito de observar o início da ignição do bríquete. Esta interrupção momentânea foi necessária, dado que a fonte de calor utilizada transmite energia por convecção, ao contrário do método original que é baseado na radiação, no qual a primeira chama pode ser detectada visualmente ou por técnicas de imagem por fluorescência induzida – FIAT.

Uma vez confirmada visualmente a ignição e a queima sustentada do bríquete, o fornecimento de calor é interrompido e a gravação de vídeo finalizada.

A partir da análise visual do vídeo, foi possível determinar o tempo decorrido desde o início do aquecimento até à confirmação da ignição, definido neste estudo como tempo de atraso à ignição.

Este procedimento foi realizado com uma única partícula por ensaio, tendo sido repetido três vezes para cada diâmetro de bríquete analisado, ou seja, foram testados três bríquetes distintos por dimensão em estudo.

4.1 Granulometria da serradura

Após a classificação da amostra e pesagem das frações retidas em cada peneiro, foram registadas as respectivas massas retidas. O gráfico abaixo apresenta os dados relativos à classificação após a sua recolha na carpintaria, assim como após sua moagem. Verifica-se que na amostra colectada há diversificação de tamanhos da serradura distribuída ao longo da série composta por crivos de diâmetro: 4,75 mm, 2 mm, 1,18 mm, 1 mm, 0,5 mm e base. A base da série apresentou a maior fração de serradura, correspondendo a 27% das 300 g classificadas. Mais de metade da amostra inicial, cerca de 74%, possui um diâmetro menor ou igual a 2 mm, o que significa que apenas 1/4 da amostra inicial necessita de moagem para adequação ao diâmetro para a briquetagem, que é de no máximo 2 mm segundo (Mitchual et al., 2013). Este resultado é expectável, uma vez que a matéria-prima recolhida na carpintaria apresenta finos de serradura, o que é comum em resíduos resultantes de processos de usinagem de madeira.

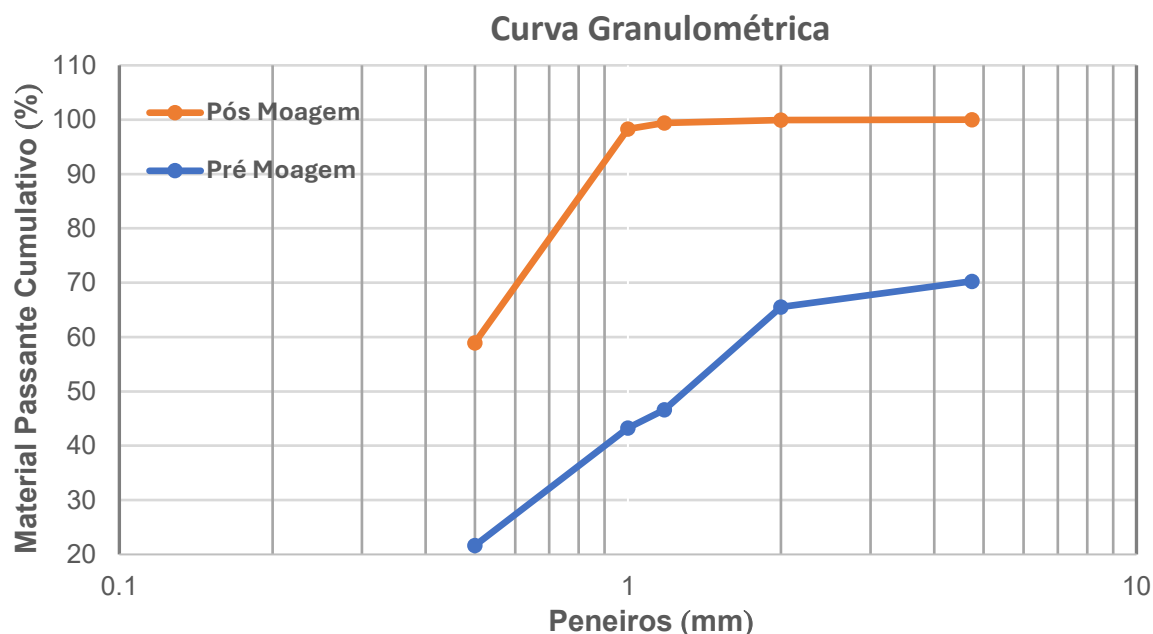


Gráfico 1: Curva granulométrica da serradura antes e pós moagem

Após a classificação da amostra colhida, verificou-se a necessidade de moagem, sendo realizada a redução do tamanho das partículas para obter serradura com o diâmetro ideal para briquetagem. A redução foi realizada no moinho ultracentrifugo ZM 200, de onde a

CAPÍTULO IV

amostra triturada seguiu para a classificação na mesma série usada para classificar a amostra inicial.

Na distribuição granulométrica pós-moagem, observa-se que a maior parte das 300 g, cerca de 180 g (60%), depositou-se na base da série de crivos, atravessando todos os peneiros, inclusive o menor, de 0,5 mm. Em comparação com os 21% anteriores, a massa acumulada na base praticamente triplicou. Embora 1,7% da serradura tenha ficado retida nos crivos acima de 1 mm, não era esperado que houvesse material retido acima do peneiro de 1 mm, dado que o moinho utilizado tem um crivo de 1 mm de diâmetro. A redução do tamanho das partículas só é considerada completa quando a granulometria igual ou inferior a 1 mm é alcançada, permitindo a passagem para o colector envolvente e posterior colecta. Esta retenção em peneiros superiores deve-se principalmente à vibração imperfeita durante a agitação dos crivos, resultando numa classificação incompleta. Ainda assim a granulometria é adequada para a produção de briquetes.(Ndindeng et al., 2015) reitera que quanto menores forem as partículas da biomassa, menor é a porosidade, e maior é a densidade do combustível.

4.2 Análise Imediata

A análise imediata compreende a determinação da composição da biomassa em termos de teores de humidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo. O gráfico circular abaixo ilustra os percentuais destes componentes na base seca, determinados a partir da norma ASTM. O mesmo não inclui a humidade que é de 9,42%. À priori, observa-se um elevado teor de matéria volátil presente na serradura. No entanto, estes valores são discutidos com mais detalhes em seguida, análise por análise.

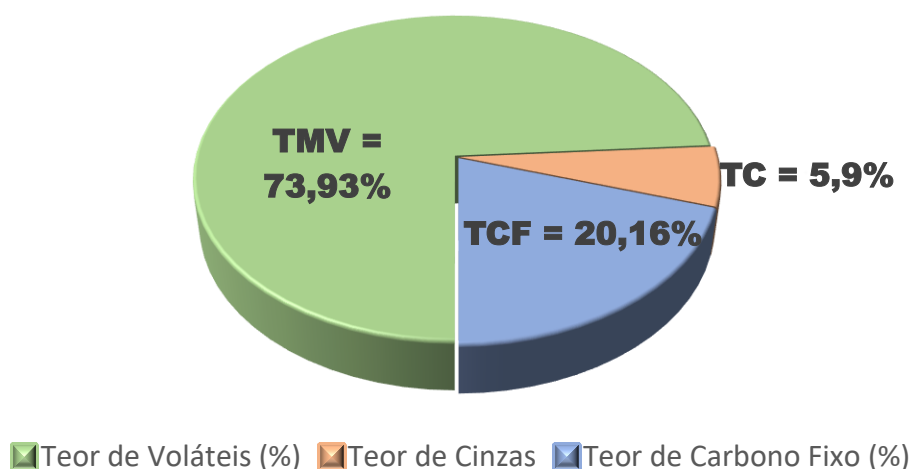


Gráfico 2: Análise Imediata da Biomassa em base seca

CAPÍTULO IV

4.2.1 Humidade *in Natura*

A humidade *in natura* foi determinada pelo analisador de humidade *Sartorius*. A análise foi realizada em triplicado, tendo sido registado os valores na tabela abaixo. Calculada a média dos resultados dos 3 ensaios obteve-se um teor de humidade de 9,42% para a amostra de serradura. Este valor encontra-se dentro dos padrões admissíveis, visto que, segundo (Dias et al., 2012), a quantidade ideal de humidade para a briquetagem deve situar-se entre 5 e 10%. Assim, a amostra de serradura não necessita de secagem adicional, como tem sido necessário para outras biomassas.

O teor de humidade da serradura, está em concordância com os valores obtidos por outros estudos para o mesmo tipo de biomassa. (Sánchez et al., 2014) obtiveram em seu estudo de briquetagem de serradura um teor de 10%, (Aguko Kabok et al., 2018) também obtiveram o mesmo valor de 10%. Estes estudos foram realizados com serraduras originárias de regiões com climas semelhantes, Peru e Quênia.

Tabela 3: Humidade *in Natura*

Ensaio	Massa (g)	H (%)
1	1,01	9,21
2	1,001	9,35
3	1,005	9,7

$$TH(\%) = \frac{9,21+9,35+9,7}{3}$$

$$TH (\%) = 9,420 \pm 0,252$$

4.2.2 Densidade a Granel

A determinação da densidade a granel foi feita em *triplicata*. Após pesar os balões cheios e compactados, os seguintes valores foram obtidos:

Tabela 4: Resultados da Determinação da densidade a granel

Ensaio	Volume V(ml)	Massa (g)	Densidade (g/ml)
1	100	45.6055	0.456
2	100	43.9919	0.439
3	100	43.3329	0.433

CAPÍTULO IV

$$\rho = \frac{0,456 + 0,439 + 0,433}{3} = 0,443 \text{ g/ml}$$

$$\rho = 443 \pm 0,112 \text{ kg/m}^3$$

A densidade a granel da mistura de serradura com tamanho menor a 1 mm foi de cerca de 443 kg/m³. Este valor favorece o teor energético da serradura, pois uma maior quantidade de biomassa pode ser concentrada em um menor volume, conseqüentemente, obtém-se uma elevada densidade aparente do bríquete produzido. Este factor constitui uma vantagem para o bríquete, pois melhora a combustão e aumenta o tempo de queima, tornando a serradura mais competitiva no mercado de energias renováveis, especialmente em regiões onde a madeira é abundantemente processada.

A densidade a granel da serradura de cerca de 443 kg/m³ é reactivamente maior que a das outras biomassas, quando comparada a outros tipos de madeira. Nos seus estudos (Da Silva et al., 2015) obtiveram, para a serradura de eucalipto, a densidade a granel de 120 kg/m³ e 180 kg/m³ para a serradura de pinheiro, respectivamente. Enquanto (Sánchez et al., 2014) obtiveram cerca de 220 kg/m³ para serradura de pinheiro.

4.2.3 Teor de matéria volátil

Após a análise, constatou-se que a serradura apresenta um teor de matéria volátil (TMV) de 73,93%. Embora este valor seja inferior aos encontrados por outros autores abaixo mencionados, com um desvio de 9,63%, ele continua adequado para a produção de bríquetes, pois não compromete significativamente o seu desempenho. (Sánchez et al., 2014) obtiveram 83,41% enquanto (Da Silva et al., 2015) encontraram teores de 80,54% para a serradura de pinheiro e 81,16% para a de eucalipto.

Essa variação nos resultados deve-se às diferenças entre as espécies de madeira (as usadas para a comparação) com a serradura do presente estudo, além de que são originárias de regiões distintas. Embora o valor obtido de 73,93% seja relativamente baixo, não prejudica o desempenho ou a produção do bríquete. O único impacto previsível pode ser um ligeiro aumento no tempo de ignição quando comparado a outras biomassas com maior TMV.

Em comparação com biomassas que possuem maior teor de matéria volátil, a serradura em estudo tende a ser menos poluente. Isso ocorre porque bríquetes com uma menor

CAPÍTULO IV

percentagem de matéria volátil emitem menos fumaça durante a queima, o que representa uma vantagem ambiental significativa (Mengist et al. 2021).

Tabela 5: Dados relativos à variação de massa para a determinação do TMV

Cadinho	Peso do Cadinho (g)	Peso da Amostra (g)	Peso do Cadinho + Amostra final	TMV	TMV médio
2	48,9396	1,0018	49,200	0,7400	0,7393 ± 0,0009
6	48,6871	1,0004	48,9486	0,7386	

Determinando a média para as duas amostras e achando a percentagem tem-se:

$$\text{TMV}(\%) = 73,93 \pm 0,09 \%$$

4.2.4 Teor de cinzas

A serradura em estudo apresenta um teor de cinzas de aproximadamente 5,9%, um valor relativamente superior ao encontrado em outras serraduras. (Da Silva et al., 2015) obtiveram 1,57% de cinzas para serradura de eucalipto e 0,23% para serradura de pinheiro, enquanto (Sánchez et al., 2014) relataram 1,3% de cinzas em suas análises de serradura de Congona.

Um elevado teor de cinzas na biomassa é geralmente indesejável, pois afecta a eficiência da combustão e reduz o teor de carbono fixo. No entanto, o valor de 5,9% ainda é considerado aceitável quando comparado com briquetes de outras biomassas com um bom desempenho, como o sabugo de milho e o caule de sagu, que apresentam teores de cinzas entre 6,58% a 7,52%, conforme (Lestari et al., 2017). Analogamente, o bagaço de cana-de-açúcar, analisado por (Nalevaiko et al., 2021), registou um teor de cinzas de 5,06%.

Tabela 6: Peso da amostra antes de colocar na estufa

Número de cadinho	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra	Massa (g) Total no final	Teor de cinzas	Teor de cinzas Médio
3	12,32	1,04	12,37	4,8%	5,90 ± 0,85
19	25,09	1,00	25,15	6%	

Calculando a média aritmética obtém-se o valor de TC = 5,9 ± 0,85%.

CAPÍTULO IV

4.2.5 Teor de carbono fixo

Com base nos valores de teor de cinzas e de matéria volátil obtidos nas análises anteriores, e sabendo que o remanescente da composição percentual da biomassa na análise imediata é o carbono fixo, de acordo com a norma ASTM E870-82, é possível determinar a diferença em base percentual na base seca.

$$\text{TCF} = 100 - \text{TC} - \text{TCV} \quad (\text{Eq.16})$$

$$\text{TCF} = 100 - 5,9 - 73,9$$

$$\text{TCF} = 20,16\%$$

Altos teores de carbono fixo indicam maior quantidade de energia concentrada e maior geração de calor em combustão, pois, maior é o poder calorífico da biomassa nestas condições.

O teor de carbono fixo da serradura em estudo é superior ao obtido por (Sánchez et al., 2014) que teve 15,29% para serradura de Congona e aos obtidos por (Da Silva et al., 2015) de 17,90% e 18,61% para serradura de eucalipto e de pinheiro, respectivamente. Este elevado teor de carbono fixo confere à serradura um elevado potencial para o uso como combustível, pois o TCF é um factor determinante para a densidade energética.

4.3 Poder calorífico

Os resultados do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) obtidos neste estudo estão apresentados no gráfico abaixo.

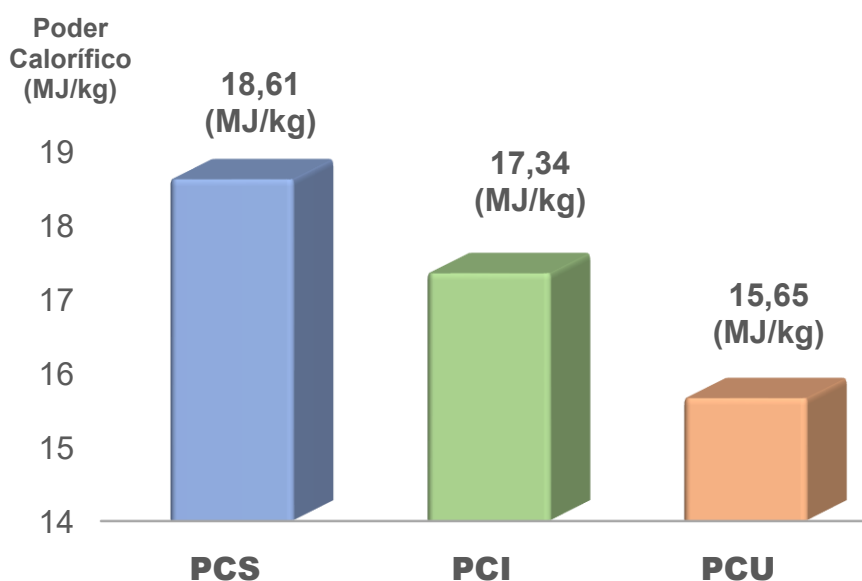


Gráfico 3: Poderes Calorífico da serradura

CAPÍTULO IV

O poder calorífico é um parâmetro crucial na avaliação da qualidade e viabilidade de diferentes combustíveis para a geração de energia térmica. Quanto maior o valor do poder calorífico do material, melhor é considerado o seu uso para a produção de energia, pois maior é o calor gerado durante a queima do combustível (Quirino & Brito, 1991).

No presente estudo a mistura de Serradura (Umbila + Chanfuta) apresenta valores de PCS, PCI e PCU consideráveis e aceitáveis, encontrando-se dentro dos limites admissíveis para a biomassa de natureza lignocelulósica que varia entre 12,94 MJ/kg – 22,26 MJ/kg (Quirino & Brito, 1991).

A serradura analisada apresenta um PCS de 18,61MJ/kg, valor próximo ao reportado por (Sánchez et al., 2014), no seu estudo sobre briquetes de serradura de congona, que foi de 18,90 MJ/kg. Já (Da Silva et al., 2015) obtiveram valores ligeiramente superiores, de 19,18 MJ/kg para a serradura de eucalipto e de 20,31 MJ/kg para a de pinheiro.

A homogeneidade dos resultados dos poderes caloríficos é também verificada na comparação com os valores de (Souza & Vale, 2017), que nos seus estudos para diferentes biomassas obtiveram um PCS mínimo de 14,41 MJ/kg e máximo de 20,07 MJ/kg. No mesmo estudo, o PCI variou entre 13,10 MJ/kg e 17,86 MJ/kg, enquanto o PCU teve resultados no intervalo entre 11,70 MJ/kg a 16,26.

Do ponto de vista energético, o poder calorífico da serradura é um parâmetro que agrega valor ao resíduo, especialmente considerando sua magnitude. Isso indica que a serradura acumula uma quantidade significativa de energia, tornando-se uma boa opção para processos de termoconversão.

4.4 Friabilidade

Os briquetes produzidos neste estudo apresentaram índices de friabilidade de 2% cada, significando que o seu nível de friabilidade é baixo. A maior perda de massa registada entre os briquetes foi de 0,64g. Evidenciando uma boa compactação da biomassa e consequente elevada resistência à queda, à abrasão e ao impacto, o que possibilita o seu transporte, armazenamento e empilhamento sem perdas significativas de massa e de qualidade. Quirino & Brito, 1991 no seu estudo, ao realizar o teste de tamboreamento para briquetes de carvão vegetal, produziu índices de friabilidade variados entre 2,48% a 56,44%, superior ao da serradura deste estudo.

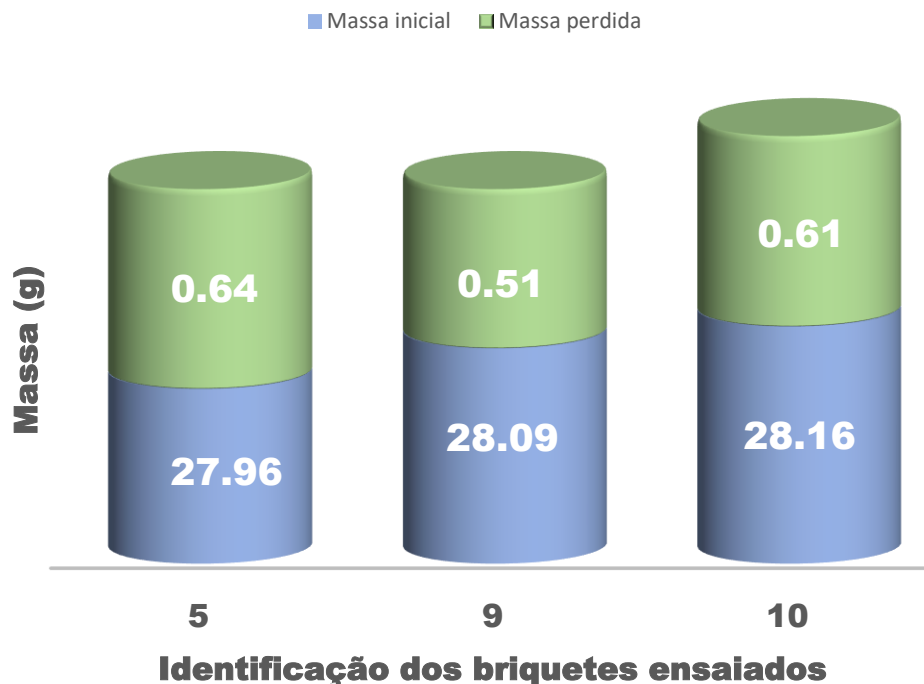


Gráfico 4: Perdas de massa dos briquetes em relação à massa inicial no teste de friabilidade

4.5 Estabilidade Dimensional

A alongação percentual é uma medida de deformação relativa e, neste caso, os briquetes deformam-se progressivamente com o tempo. Nas primeiras horas, a expansão longitudinal dos briquetes foi pouco perceptível, mas com o passar do tempo, as dimensões começaram a variar de forma mais significativa.

A partir do gráfico abaixo, observa-se que os briquetes 1 e 2 apresentaram os valores mais altos de alongação (3,94% e 4,30%) respectivamente, sugerindo que eles sofrem maior deformação em comparação com o briquete 3, que atingiu um máximo de 2,71% de alongação. A alongação entre os briquetes analisados é, no entanto, relativamente uniforme, estando dependente de factores como a granulometria, a adesão entre partículas, a taxa de arrefecimento — influenciada pela temperatura ambiente no momento da produção, entre outros.

Os três briquetes analisados expandiram e alongaram-se com o passar do tempo, o que está relacionado à absorção de humidade, ao relaxamento interno do material após a prensagem ou a outros factores tais como a radiação solar, variações de temperaturas, etc. Pois, de acordo com (Nakashima et al., 2014), após a prensagem, há uma tendência natural de expansão nos briquetes, que pode variar de acordo com o tipo de biomassa,

CAPÍTULO IV

granulometria, teor de humidade, adesão e ligação entre as partículas e condições do ambiente de armazenamento.

Os valores encontrados de alongação são aceitáveis, uma vez que são relativamente baixos em termos quantitativos, principalmente quando comparados a outros estudos. Por exemplo, (Fernandez et al., 2016.) obtiveram uma expansão longitudinal de 13,26% para serradura de pinheiro, e (Nakashima et al., 2014) relataram resultados entre 6% e 13% para a expansão longitudinal de diferentes tipos de biomassa.

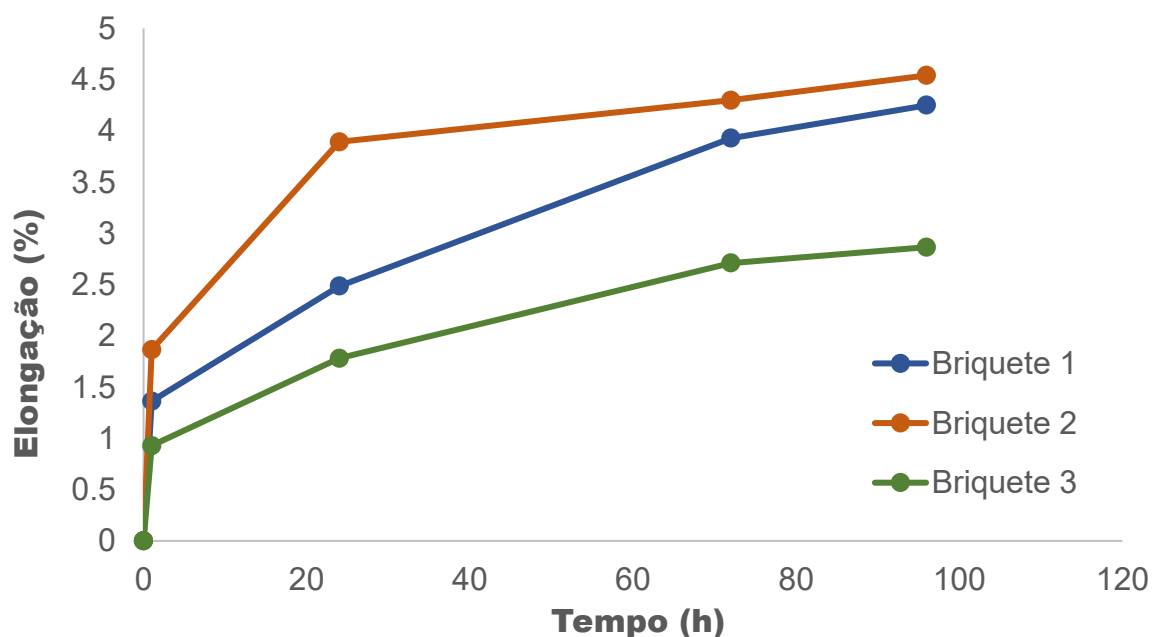


Gráfico 5: Percentagem de alongação dos briquetes analisados

4.6 Densidade aparente e energética

A densidade aparente foi calculada a partir da média aritmética das densidades dos 10 briquetes usados para o estudo, cujos dados encontram-se na tabela A2-3 dos anexos. O intervalo de variação da densidade aparente dos briquetes foi de 963,12 kg/m³ a 1155,53 kg/m³. Calculada a média verifica-se que a densidade aparente do briquete de serradura é de: $\rho_{\text{aparente}} = 1067,19 \text{ kg/m}^3$.

Este valor é considerado aceitável, pois está em consonância com resultados de outros estudos, que obtiveram valores inferiores ou próximos ao da presente serradura. (Sánchez et al., 2014), obtiveram 849 kg/m³ no seu estudo, enquanto (Fernandez et al., 2016.) relataram aproximadamente 860 kg/m³. (Da Silva et al., 2015) obtiveram 920 kg/m³ para serradura de eucalipto 1000 kg/m³ para a serradura de Pinheiro. Já (Souza & Vale, 2017) obteve nos seus estudos com briquetes de serradura de pinheiro em

CAPÍTULO IV

diferentes granulometrias e temperaturas de briquetagem, valores entre 1088 kg/m^3 e 1202 kg/m^3

A densidade aparente do bríquete de serradura da carpintaria, de $1067,19 \text{ kg/m}^3$ é superior quando comparada aos valores observados por outros autores que caracterizaram biomassas ou produziram bríquetes de madeira. Esta superioridade, ressalta o elevado valor energético da serradura como matéria-prima para a produção de bríquetes. Uma alta densidade aparente indica maior compactação do material, concentrando mais energia, que por sua vez garante uma eficiência energética elevada, o que resulta em uma maior libertação de calor durante a queima (Quirino & Brito, 1991).

Utilizando os dados obtidos da densidade a granel do resíduo e densidade aparente do bríquete, multiplicados ao poder calorífico útil, determinou-se as densidades energéticas, que foram de $6.999,40 \text{ MJ/m}^3$ para o resíduo e de $16.858,60 \text{ MJ/m}^3$ para o bríquete. Pode-se verificar, no gráfico abaixo, o aumento considerável da densidade energética da biomassa após a densificação. De facto, houve um incremento de aproximadamente 250% em relação à densidade inicial. O mesmo acontece com a densidade aparente do bríquete, comparada à densidade a granel.

A densidade energética obtida, vai de acordo com os dados registados por outros autores, que caracterizaram resíduos de madeira para a produção de bríquete. A tendência verificada com a densidade aparente, mantém-se quando se compara a densidade energética do bríquete de serradura com os resultados reportados por outros autores, ainda que a superioridade verificada não seja tão expressiva.

A título de exemplo, (Souza & Vale, 2017) obtiveram para diversos resíduos briquetados um mínimo de $13.012,24 \text{ MJ/m}^3$ e um máximo de $19.539,28 \text{ MJ/m}^3$, para a densidade energética, estando a serradura do presente estudo dentro do intervalo de variação obtido pelo autor.

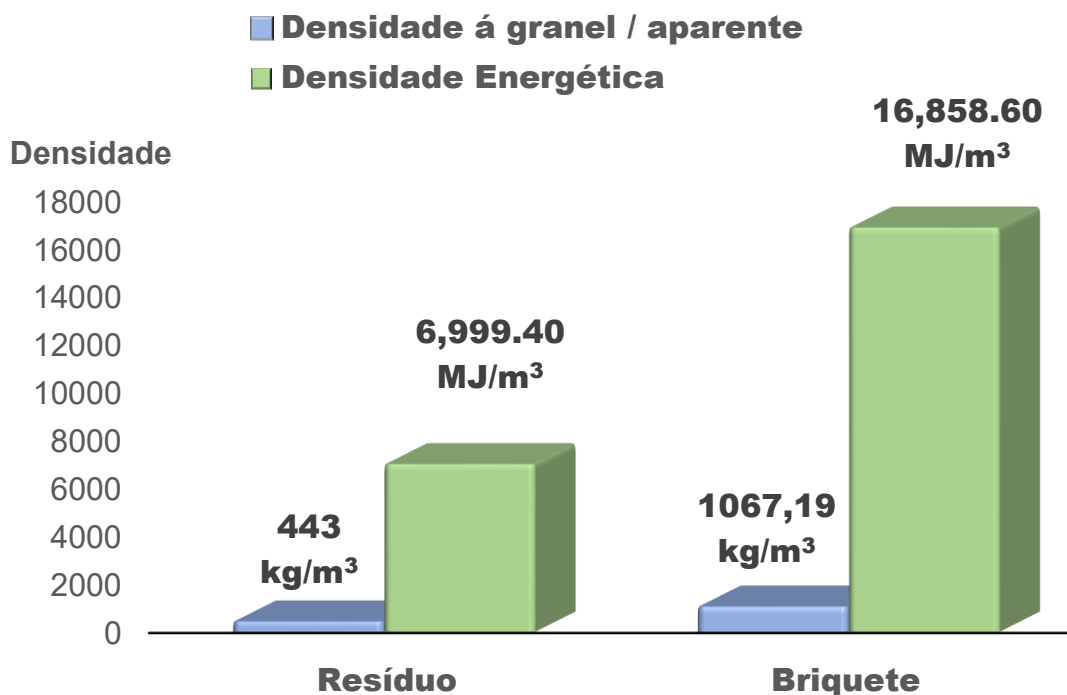


Gráfico 6: Ilustração gráfica das densidades a granel ou aparente e densidade energética

A serradura em estudo está ligeiramente abaixo da densidade energética da serradura de Pinheiro obtida por (Souza & Vale, 2017), que varia entre 16.861,52 MJ/m³ à 18.576,96 MJ/m³, dependendo da granulometria e outros tratamentos.

4.7 Síntese de Nitrocelulose

Após a síntese da nitrocelulose, foram determinados alguns parâmetros físico-químicos, nomeadamente a densidade, o teor de nitrogénio e a coloração. A coloração dos produtos sintetizados foi sensorialmente verificada, tendo-se observado que a nitrocelulose residual (NCR) apresentou uma tonalidade amarelada, enquanto a nitrocelulose simples (NCS) apresentou uma coloração acastanhada.

A densidade dos materiais foi determinada de acordo com o procedimento descrito na secção 3.1.2.3, tendo-se obtido os seguintes valores: 689 kg/m³ para a NCS e 335 kg/m³ para a NCR. Estes resultados indicam que a nitrocelulose simples possui uma densidade superior em comparação com a nitrocelulose residual.

O teor de nitrogénio constitui um indicador crucial, especialmente em processos que envolvem a nitração, como é o caso da produção de nitrato de celulose. A presente análise compara o teor de nitrogénio antes e depois da nitração, bem como as diferentes amostras, discutindo, igualmente, as implicações dos tratamentos realizados. A tabela abaixo contém os resultados obtidos das análises feitas:

CAPÍTULO IV

Tabela 7: Teores analíticos médios de Nitrogénio resultantes das análises do IIAM

Amostra	Nitrogénio (%)
Bagaço de Cana-de-açúcar (BC)	0,100 ± 0
Nitrato de Celulose simples (NCS)	0,573 ± 0,006
Nitrato de Celulose Residual (NCR)	0,597 ± 0,006

As amostras de bagaço de cana-de-açúcar natural (BC) apresentam um teor de nitrogénio reduzido, com um valor médio de 0,10%. Este resultado era expectável, uma vez que o bagaço é um resíduo lignocelulósico, naturalmente pobre em nitrogénio, uma característica comum em biomassas vegetais não tratadas.

Dos resultados obtidos do teor de nitrogénio, o nitrato de celulose sintetizado tanto a partir da mistura sulfonítrica inicial como com a mistura sulfonítrica residual, apresentou um teor de inferior a 6%. De acordo com (Urbanski, 1965) este teor obtido corresponde a mononitrato de celulose.

Teoricamente, a percentagem máxima de nitrogénio na nitrocelulose é de aproximadamente 15%. Os resultados baixos das análises realizadas pelo laboratório do IIAM, pode estar associada a vários factores, teor de humidade das amostras, retenção de nitrogénio na superfície e nos interstícios do bagaço de cana-de-açúcar, bem como a presença de nitrogénio ligado a subprodutos da reacção, como os derivados da hemicelulose.

A determinação dos graus de substituição e de nitração não são aplicáveis para este caso devido ao facto de o resultado sugerir a presença de nitrogénio ligado à macromoléculas diferentes da celulose.

As amostras de NCS (com teores entre 0,57% e 0,58% de nitrogénio) evidenciaram um aumento significativo no teor de nitrogénio, resultante do processo de nitração. Por sua vez, as amostras de NCR (com teores entre 0,59% e 0,60% de nitrogénio), obtidas a partir da mesma mistura sulfonítrica residual após a síntese de NCS, apresentaram um teor ligeiramente superior. Este resultado sugere que houve uma nitração adicional ou mais optimizada, culminando numa maior incorporação de nitrogénio.

CAPÍTULO IV

4.8 Determinação do Índice de Combustão

4.8.1 Índice de Combustão de Bríquetes

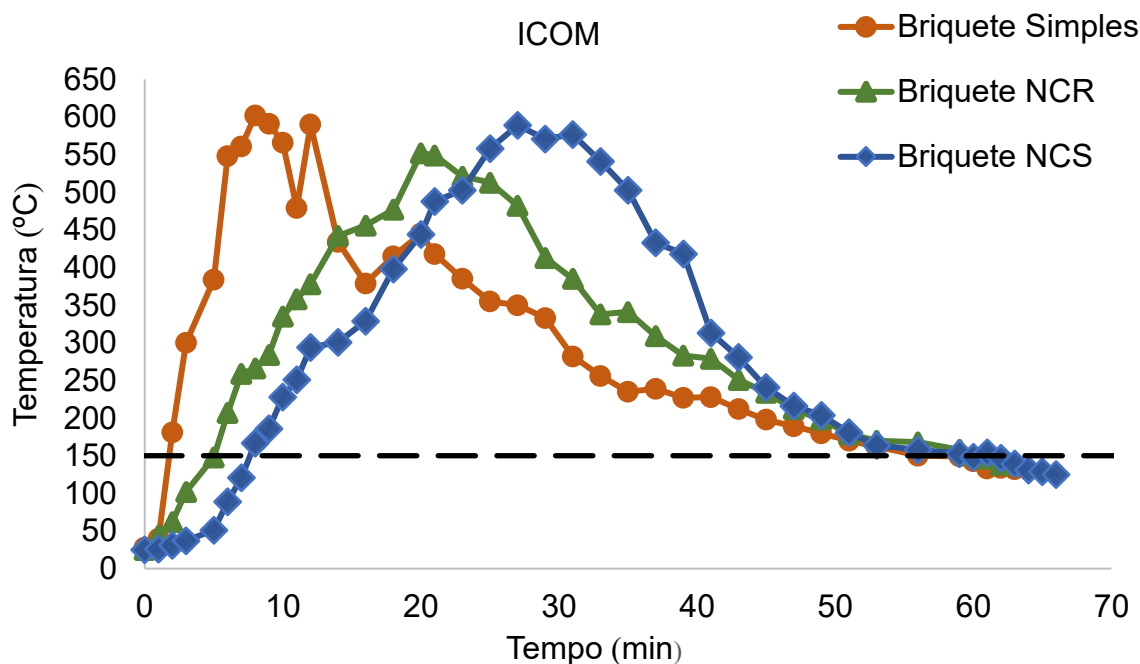


Gráfico 7: Variação temporal da Temperatura no ensaio de índice de combustão

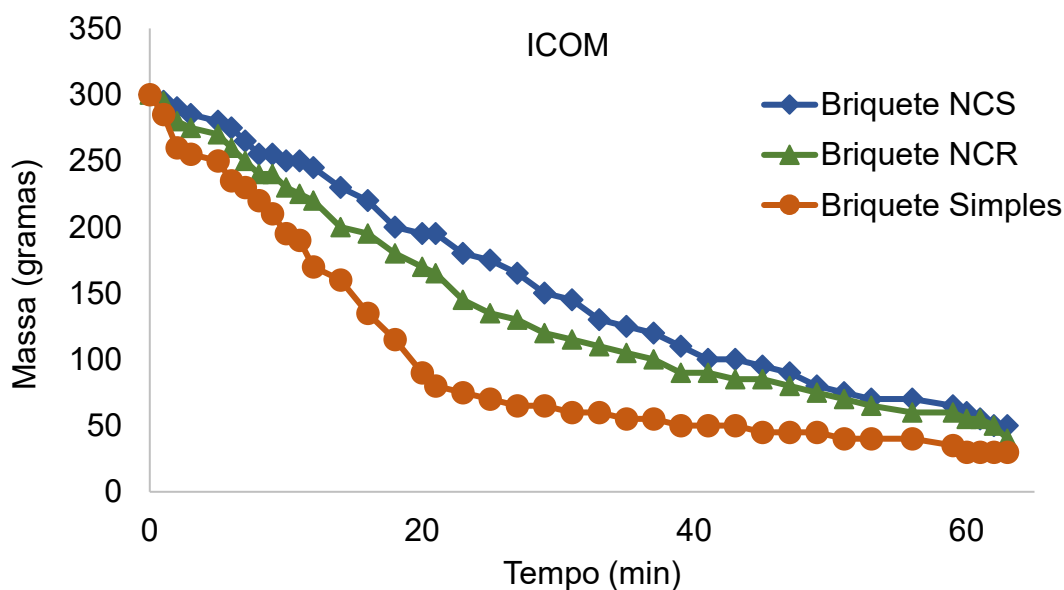


Gráfico 8: Variação temporal da massa dos briquetes durante a queima

Verifica-se que os briquetes simples alcançaram a maior temperatura no processo de combustão de cerca de 602°C . Os briquetes com cobertura NC apresentaram temperaturas máximas ligeiramente abaixo em relação ao briquete simples sem cobertura, mas não houve uma significativa diferença. Sendo de 589°C para NCR e 552°C para NCS, os erros são de 2,16% e 8,14% respectivamente. Estas diferenças verificadas não impactam a utilidade dos briquetes, pois os briquetes após revestimento

CAPÍTULO IV

continuam com a sua composição e seu teor energético original, significando que estas temperaturas poderão ser alcançadas em maiores concentrações de briquetes. Para os briquetes NCS e NCR verifica-se (no gráfico acima) que apresentaram um consumo de massa mais lento, a lentidão foi mais acentuada para os briquetes NCS. Este cenário é influenciado pela baixa taxa de aumento de temperatura nos primeiros minutos. Tendência igual foi verificada nos briquetes com cobertura NCR, embora estes tenham apresentado um consumo de massa moderado.

Isto é explicado pelo facto da combustão inicialmente ocorrer na camada externa do briquete constituída pelo agente de ignição, as partículas inicialmente em combustão levam mais tempo para transmitir energia térmica à partícula adjacente e conseqüentemente, o consumo de massa foi mais lento. Quando esta camada é consumida é previsível que o comportamento seja o mesmo que do briquete sem revestimento, pois tanto o material quanto a composição são iguais.

O briquete NCR teve uma ignição rápida comparado ao briquete NCS, mas o processo de combustão não foi igualmente tão rápido. O consumo de massa até alcançar a temperatura máxima foi moderado, em seguida o processo de consumo de massa após alcançar foi semelhante ao da combustão do briquete simples em termos de velocidade até ao final do processo.

Tabela 8: Determinação do índice de combustão dos briquetes produzidos

Bríquetes	A	B	C	Índice de Combustão
Serradura	0,54	0,75	0,82	0,48 ± 0,11
Serradura + NC Simples	0,56	0,79	0,68	0,65 ± 0,12
Serradura + NC Residual	0,53	0,73	0,72	0,54 ± 0,14

O briquete simples apresentou o menor ICOM (0,48), significando que o mesmo apresenta o menor desempenho global. Este resultado pode ser explicado pelo facto destes briquetes apresentarem o factor C elevado

Embora os briquetes simples tenham apresentado um tempo de atraso à ignição mais elevado, durante a sua combustão atingiram rapidamente temperaturas superiores a 150 °C, menos de 2 minutos após a ignição. Além disso, comparativamente aos briquetes

CAPÍTULO IV

com NC os briquetes simples mantiveram-se por mais tempo queimando a temperaturas superiores a 150° C, como resultado, registaram um valor mais elevado do factor C, uma vez que o consumo de massa foi mais acentuado nessas temperaturas. Esta rápida ascensão de temperatura e a lentidão no consumo do bríquete, na fase final da combustão, originou uma duração de cerca de 55 minutos acima de 150° C, 48 minutos para NCS e 52 minutos para NCR.

Devido a este factor, o ICOM foi influenciado, pois o denominador depende exclusivamente do tempo no qual o combustível permaneceu a temperaturas superiores a 150° C. Para os outros factores A e B as diferenças não foram significativas.

Para o factor A, tanto NCS como NCR variaram menos de 4% em relação à serradura, para o factor B, o NCS apresentou um aumento de 5,3%, enquanto o NCR sofreu uma redução de 2,7%, ainda assim dentro de uma faixa estreita. Estes resultados indicam que o revestimento de nitrato de celulose, tanto na forma simples quanto residual, não exerceu impacto negativo sobre estes parâmetros.

4.9 Determinação do teor de matéria volátil das amostras de nitrocelulose

Os resultados obtidos (tabela abaixo) indicam que houve aumento do teor de matéria volátil no nitrato de celulose, com a incorporação do nitrogénio, sustentando a sua capacidade de facilitar a ignição de briquetes. O NCR apresenta o TMV mais alto comparado ao NCS, sugerindo maior presença de compostos voláteis

Tabela 9: Determinação do teor de matéria volátil das amostras de nitrocelulose

Amostra	Peso do Cadinho (g)	Peso da Amostra (g)	Peso do Cadinho + Amostra final	TMV	TMV	
	1	46,8501	1,0157	47,1108	0,7433	
BC	2	46,9174	1,0011	47,2104	0,7073	0,7272 ± 0,0183
	3	47,2122	1,0022	47,4817	0,7311	
	1	46,7870	1,0018	47,0435	0,7440	
NCS	2	47,0505	1,0020	47,2997	0,7513	0,7476 ± 0,0036
	3	46,9188	1,0019	47,1711	0,7477	
NCR	4	57,8983	1,0025	58,1078	0,7910	0,8003 ± 0,0091

5	58,2391	1,0081	58,4314	0,8092
6	58,4310	1,0031	58,6315	0,8005

Onde: BC: Serradura

NC simples: Nitrato de Celulose simples ou primário

NC Residual: Nitrato de Celulose Residual

4.10 Determinação do tempo de ignição

Os resultados obtidos neste estudo indicam que o briquete com cobertura de NCS é o que menos reagiu ao processo de melhoria e o briquete com cobertura de NCR é o que melhor resultados teve, registando o menor tempo de atraso a ignição relativo.

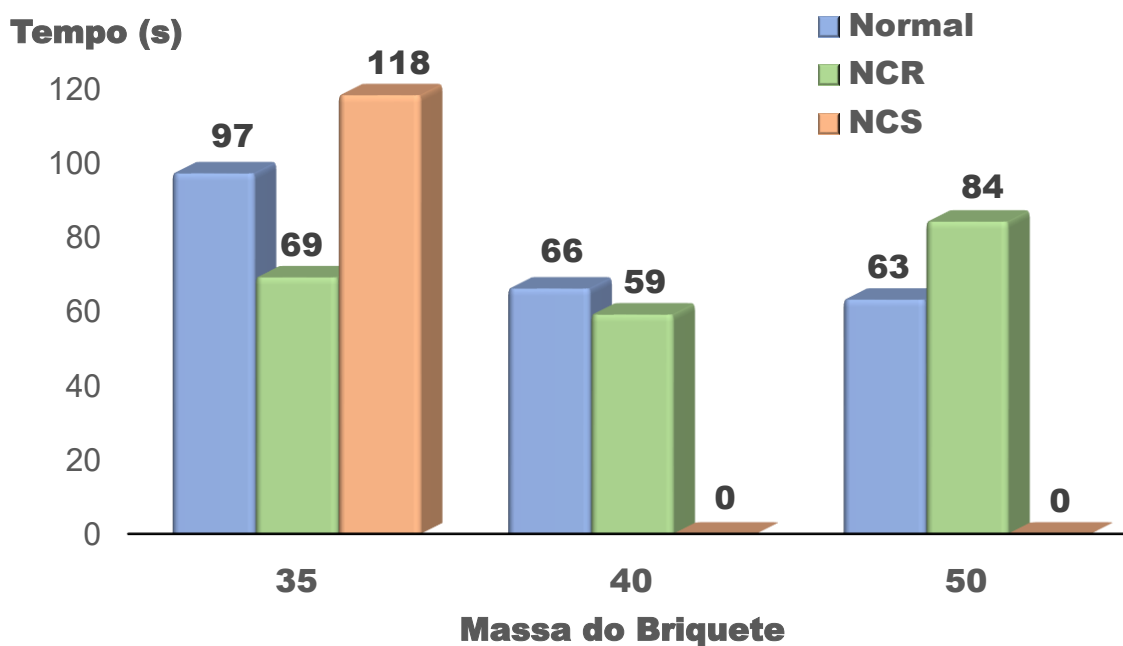


Gráfico 9: Tempo médio de ignição dos briquetes

Os briquetes cobertos com NCR demonstraram serem eficazes na redução do tempo de atraso à ignição para dimensões menores (correspondentes a 35 g e 40 g). Isto sugere que o nitrato de celulose, quando aplicado sob as condições do tratamento NCR, tem o potencial de melhorar a ignição. No entanto, a não redução observada para o briquete de 50 g no tratamento NCR, e a não ignição para cobertura com NCS na mesma massa, indicam que a aplicação do nitrato de celulose não foi eficaz para todas as dimensões dos briquetes testados. Esta tendência está directamente associada ao facto da NCS apresentar uma densidade maior e uma superfície pouco aderente em comparação com

CAPÍTULO IV

NCR, conseqüentemente foi necessário usar maior quantidade de aglutinante para garantir adesão das partículas ao briquete original. A não aderência da NCS deveu-se ao contacto directo com ácido nítrico fumegante puro (HNO_3). A combinação da cobertura NCS com o uso excessivo de cola comprometeu a inflamabilidade dos briquetes.

4.10.1 Análise comparativa

O briquete normal serve como base para a comparação. Seus tempos de atraso à ignição são 97 s, 66 s e 63 s para os briquetes com o peso de de 35 g, 40 g e 50 g, respectivamente. Observa-se que, para o briquete normal, o tempo de atraso à ignição diminui com o aumento da massa. Isto sugere que, para o material original, briquetes maiores podem ter uma ignição mais rápida, o que pode ser atribuído a uma maior capacidade de absorção e retenção de calor, ou a uma maior área de contacto com a chama, favorável para a propagação inicial da combustão.

Tabela 10: Percentagem de redução do tempo de ignição

Briquetes	Percentagem de redução em relação ao briquete normal		
	35 gramas	40 gramas	50 gramas
Serradura + NC Residual	-28,87%	-10,61%	33,33%
Serradura + NC Simples	21,65%	-	-

Ao comparar os briquetes NCR com os briquetes sem cobertura (Normais), observaram-se os seguintes resultados:

- Briquetes de 35 g: o briquete com cobertura NCR registou um tempo de ignição de 69 segundos, inferior ao do briquete normal, que foi de 97 segundos;
- Briquetes de 40 g: o tempo de ignição do briquete NCR foi de 59 segundos, também inferior ao do normal, que foi de 66 segundos;
- Briquetes de 50g: o briquete NCR apresentou um tempo de atraso de 84 segundos, maior que o do briquete normal de 63s. Nesta dimensão, o tratamento NCR não foi eficaz em reduzir o tempo de atraso;

Estes resultados indicam que a aplicação da cobertura NCR foi eficaz na redução do tempo de atraso à ignição, particularmente nas massas de 35 g e 40 g. Situação igual

CAPÍTULO IV

não foi verificada na massa de 50g, na verdade, o tempo de ignição foi superior neste caso. O que sugere que a eficácia do tratamento NCR pode ser dependente do diâmetro e da massa do briquete.

Como ilustrado no gráfico acima, os briquetes com cobertura NCS apresentaram resultados significativamente distintos:

- Briquete de 35 g: registou um tempo de atraso à ignição de 118 segundos;
- Briquete de 40 g e 50 g: os briquetes não ignizaram sob as condições experimentais aplicadas.

Isto indica que o tratamento NCS não só não foi eficaz em reduzir o tempo de atraso, como o agravou no caso em que registou-se ignição. Para 40 g e 50 g: os briquetes não ignizaram. A não ignição sugere que o tratamento NCS, nas condições aplicadas, pode ter inibido a ignição ou alterado as propriedades do briquete tendo tornado-o não inflamável sob as condições experimentais.

CONCLUSÕES

A serradura gerada na carpintaria da UEM apresenta um elevado potencial experimentalmente comprovado para ser utilizado como combustível, assim como para a produção de briquetes. Os ensaios realizados permitem afirmar com confiabilidade que a Chanfuta e a Umbila são realmente bons combustíveis e o seu reaproveitamento é uma aposta certa para a produção de briquete. Esta biomassa apresenta um baixo teor de humidade quando é gerada, cerca de 9,4%. Quanto ao tamanho, apresenta partículas com um máximo de granulometria de 4,75 mm que é constituída por 24% a cada 300g, sendo as remanescentes 76% dominadas por partículas muito finas, na sua maioria menor que 0,5 mm. Embora haja uma mistura desproporcional entre a Umbila e Chanfuta, a densidade a granel de 443 kg/m³ para serradura de tamanho inferior a 1 mm revela-se uma característica altamente benéfica para processos de conversão de biomassa em briquetes, oferecendo eficiência tanto no armazenamento quanto na produção de energia.

Os teores de matéria voláteis, de cinzas e de Carbono fixo encontram-se em conformidade e dentro dos parâmetros estabelecidos para este tipo de biomassa, sendo respectivamente: 73,93%, 5,9% e 20,16% o que confere maior potencial à Serradura, aliado à energia que é libertada durante a combustão completa de cerca de 18,61MJ/kg para o PCS, o PCI é de 17,34 MJ/kg e o PCU 15,65 MJ/kg. Estes valores são muito bons comparados com a lenha, principalmente, a densidade energética que é o principal parâmetro de comparação e de quantificação dos combustíveis. A densidade energética do briquete é de 16 858,6 MJ/m³ e a da Serradura in natura é de 6 999,4 MJ/m³, enquanto para a lenha de eucalipto é de 5.586 MJ/m³ de acordo com Nonnenmacher et al., 2011.

A friabilidade de 2% é óptima pois o briquete tem poucas possibilidades de se desfazer. Pode-se concluir que apresenta uma boa quantidade de ligantes, tendo efectivamente activado as propriedades retensoras da madeira.

A serradura em análise requer menos matéria-prima para a compactação dos briquetes, o que resulta numa redução significativa dos custos de produção e transporte, especialmente em situações de reaproveitamento de resíduos. Dessa forma, o uso de

CAPÍTULO V E VI

bríquetes a partir de serradura não só maximiza a utilização de resíduos de madeira, como também apresenta vantagens económicas e ambientais.

O bagaço de cana de açúcar, é um resíduo abundante em Moçambique capaz de atender a demanda para uma eventual produção de NC sendo usada como matéria-prima. Os tratamentos aplicados ao bagaço (síntese do NCS e nitração do NCR) foram eficazes em aumentar significativamente o teor de nitrogénio no bagaço de cana-de-açúcar em comparação com o bagaço natural, embora tenham alcançado valores superiores ao teórico.

A mistura residual demonstrou possuir capacidade nitrante suficiente para elevar de forma significativa, o teor de nitrogénio nos materiais tratados, equiparando-se a mistura original. Este resultado evidencia o potencial de reutilização da mistura sulfonitrica preparada para a nitração do Bagaço de cana-de-açúcar. O recurso a mistura constitui uma alternativa viável para o revestimento de bríquetes por nitrocelulose, contribuindo para a sustentabilidade do processo produtivo e reduzindo os custos.

Os ensaios térmicos demonstraram ligeiras alterações nas propriedades dos bríquetes, mas feitas as comparações no desempenho global dos bríquetes conclui-se que não está afectado negativamente, pois as propriedades da serradura mantiveram-se e ainda houve redução do tempo de ignição dos bríquetes.

O tempo de atraso foi significativamente reduzido com a cobertura NCR para massas de 35 g e 40 g. Para a cobertura com NCS, não houve redução; pelo contrário, houve um aumento no tempo de atraso a ignição, associado directamente a quantidade de cola de madeira adicionada como aglutinante.

Apesar da sua eficácia estar dependente do tipo de tratamento e da massa do bríquete, o nitrato de celulose obtido da nitração do bagaço de cana-de-açúcar, pode ser usado para melhorar o tempo de atraso à ignição de bríquetes de serradura. O tratamento com NCR demonstra maior potencial, enquanto o tratamento NCS por apresentar menor aderência exige reformulações na aplicação do agente de ignição. É fundamental otimizar a formulação e o processo de aplicação do Nitrato de celulose para garantir resultados consistentes e desejáveis em todas as dimensões do bríquete.

A aplicação para a redução do tempo de atraso a ignição de bríquetes de outras biomassas, embora se preveja a aplicabilidade carece de avaliação.

RECOMENDAÇÕES

Com base no estudo realizado e na análise crítica dos resultados obtidos, foram identificadas diversas oportunidades de aprofundamento e aperfeiçoamento dos procedimentos adotados. Este capítulo apresenta um conjunto de recomendações fundamentadas nas limitações observadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, nas lacunas de informação detectadas e nas possibilidades de melhoria na caracterização e na aplicação dos materiais em estudo. As recomendações têm como objectivo complementar os dados experimentais, validar as metodologias utilizadas e alargar o âmbito da pesquisa relacionada com a valorização de resíduos lignocelulósicos, com destaque para a serradura e o bagaço de cana-de-açúcar, no processo de briquetagem e da aplicação de nitrato de celulose enquanto agente de ignição.

- Determinação experimental do Poder calorífico (Utilização de bomba calorimétrica);
- Realizar os ensaios remanescentes: teste de fervura e de resistência à compressão;
- Melhorar o sistema de arrefecimento do molde de bríquetes;
- Estudar os efluentes produzidos pela combustão do bríquete da serradura;
- Realizar a análise elementar da Biomassa;
- Determinação do teor de celulose na amostra de bagaço de cana-de-açúcar;
- Deslignificar e avaliar a influência da remoção de lignina no bagaço de cana-de-açúcar para o processo de nitração;
- Estudar a influência do branqueamento do bagaço de cana-de-açúcar no processo de ignição de bríquetes;
- Avaliar a aplicação de Nitrato de Celulose em bríquetes de biomassa não celulósica;
- Estudar o tempo de ignição de bríquetes de diferentes biomassas;

7.1 Referencias bibliográficas

1. Adams, I. U., Yusuf, H., Birnin-Yauri, U. A., & Mbongo, A. (2011). *Blending coal char on the combustion profiles of fuel briquettes*. *Der Chemica Sinica*, vol. 2, 152–157
2. Aguko Kabok, P., Nyaanga, D. M., Mbugua, J. M., & Eppinga, R. (2018). *Effect of Shapes, Binders and Densities of Faecal Matter - Sawdust Briquettes on Ignition and Burning Times*. *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*, vol. 9, n. 2
3. Brito, J. O. (1993). *Expressao da producao florestal em unidades energéticas*, Anais.
4. Calmbacher, C. (2020). *The Properties Of Nitrocellulose* <https://Sciencing.Com/Properties-Nitrocellulose-5078853.Html>. 22 de Abril de 2024
5. Canilha, L., Santos, V. T. O., Rocha, G. J. M., Almeida E Silva, J. B., Giuliatti, M., Silva, S. S., Felipe, M. G. A., Ferraz, A., Milagres, A. M. F., & Carvalho, W. (2011). *A study on the pretreatment of a sugarcane bagasse sample with dilute sulfuric acid*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 38 n. 9, 1467–1475.
6. Carmignani, L., Bhattacharjee, S., Clay, R., & Keivens, K. (2019). *Ignition of Solid Fuels: A New Approach to Study the Time Delay*, Western States Section of the Combustion Institute
7. Chen, H. (2015). *Lignocellulose biorefinery product engineering*. In *Lignocellulose Biorefinery Engineering*, Woodhead Publishing, p. 125–165
8. Cheung, C. (2014). *STUDIES OF THE NITRATION OF CELLULOSE-APPLICATION IN NEW MEMBRANE MATERIALS*. THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA.
9. Coelho, P., & Costa, M. (2012). *Combustão* 2ª ed., Orion, Amadora
10. Da Silva, D. A., Yamaji, F. M., De Barros, J. L., Da Róz, A. L., & Nakashima, G. T. (2015). *Caracterização de biomassas para a briquetagem*, *Floresta*, vol. 45, n. 4, p. 713–722.

CAPÍTULO VII

11. Dantas Rodrigues, L., Ramati Pereira da Rocha, B., & Maria Oliveira da Silva, I. (s.d.). *USO DE BRIQUETES COMPOSTOS PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA NO ESTADO DO PARÁ*, disponível: <http://www.ceplac.gov.br/culturadocacau.htm>
12. Dantas, A. P. (2012). *O BRÍQUETE COMO COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA*, III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiania
13. Dias, J. M. C. de S., Tatiane De Souza, D., Braga, M., Onoyama, M. M., Miranda, C. H. B., Barbosa, P. F. D., & Rocha, J. D. (2012). *Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais*, 1ª ed., Embrapa Agroenergia, Brasília
14. Faria, J. F. F. (1994). *PREPARAÇÃO DE NITRATO DE CELULOSE A PARTIR DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR*, Universidade de São Paulo
15. Fernandez, B. O., Gonçalves, B. F., Pereira, A. C. C., Hansted, A. L. S., 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*, Revista Virtual de Química, vol. 9, n. 1
16. Gomide, R. (1984). *Estequiometria industrial*, (3ªrd ed.).
17. Instituto Nacional de Estatísticas - INE (2024). *Indicadores Básicos de Agricultura e Alimentação*, 2022.
18. José, P., Fontes, P., Ferreira Quirino, W., & Pastore Júnior, F. (1984). *AGLUTINANTES PARA BRIQUETAGEM DE CARVÃO VEGETAL*.
19. Kalak, T. (2023). *Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future*, Energies, Vol. 16, n. 4,
20. Keivens, K. P. (2019). *EXPERIMENTAL CONTROL OF IGNITION AND FLAME SPREAD*. San Diego State University.
21. Komalasari, D., & Wulandari, S. (2022). *PENGARUH VARIASI TEKANAN PADA MODIFIKASI BRIKET BATUBARA TERHADAP WAKTU SULUT*, Vol. 1, n 4
22. Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). *A review of technical and economic aspects of biomass briquetting*. Sustainability, Switzerland, (Vol. 12, n. 11
23. Lestari, L., Variani, V. I., Sudiana, I. N., Sari, D. P., Sitti Ilmawati, W. O., & Hasan, E. S. (2017). *Characterization of Briquette from the Corncob Charcoal and Sago Stem Alloys*. Journal of Physics: Conference Series, vol. 846, n. 1

CAPÍTULO VII

24. Louro, A., & Neves, M. (2023). *CELLULOSE NITRATE OBJECTS IN COLLECTIONS: HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY HAND IN HAND WITH CONSERVATION OF CULTURAL HERITAGE*. Universidade Nova de Lisboa.
25. Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). *Sugarcane bagasse - A source of cellulosic fiber for diverse applications*, Heliyon, Vol. 7, n. 8
26. Marreiro, H. M. P., Peruchi, R. S., Lopes, R. M. B. P., Andersen, S. L. F., Eliziário, S. A., & Junior, P. R. (2021). *Empirical studies on biomass briquette production: A literature review*, Energies, vol. 14, n. 24
27. Matos, P. M. J. (2021). *ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DAS CASCAS DE COCO VERDE E COCO SECO PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETE BRÍQUETES E UTILIZAÇÃO EM EQUIPAMENTOS DE COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS*, Trabalho de Licenciatura, DEQui – Feng – Universidade Eduardo Mondlane.
28. Mattar, H., Baz, Z., Saleh, A., Shalaby, A. S., Elsayed Azzazy, A., Salah, H., & Ismail, I. (2020). *Nitrocellulose: Structure, Synthesis, Characterization, and Applications*. *Water, Energy, Food and Environment Journal*, vol. 1, n. 3, p. 1–15
29. McAlevy III, R. F. (1961). *The Ignition Mechanism of Composite Solid Propellants*.
30. Ministério da Agricultura e Desenvolvimento Rural – MADER, (2024), *INQUÉRITO INTEGRADO AGRÁRIO 2023*.
31. Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., & Darkwa, N. A. (2013). *Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes*, Energy and Environmental Engineering, vol. 4, n. 30
32. Morris, E., Pulham, C. R., & Morrison, C. A. (2023). *Structure and properties of nitrocellulose: approaching 200 years of research*, RSC Advances, Vol. 13, n. 46, pp. 32321–32333
33. Mularski, J., & Li, J. (2023). *A review on biomass ignition: Fundamental characteristics, measurements, and predictions*, Fuel Vol. 340
34. Nakashima, G. T., Martins, M. P., Aleixo Da Silva, D., Chrisostomo, W., & Florestal, E. (2014). *APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS VEGETAIS PARA A PRODUÇÃO DE BRIQUETE BRÍQUETES UTILIZATION OF CROP RESIDUES FOR THE PRODUCTION OF BRIQUETTES*, Revista Brasileira de Ciências Ambientais

CAPÍTULO VII

35. Nalevaiko, J. Z., Cremonez, P. A., & Teleken, J. G. (2021). *USE OF AGROINDUSTRIAL BY-PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF BRIQUETTES*, Brazilian Journal of Biosystems Engineering, vol. 15, nr. 1, p. 1–26.
36. Ndindeng, S. A., Mbassi, J. E. G., Mbacham, W. F., Manful, J., Graham-Acquaah, S., Moreira, J., Dossou, J., & Futakuchi, K. (2015) – *Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products*. Energy for Sustainable Development, vol 29, 24–31
37. Nonnenmacher, H., Frantz, J. C., Dias, R. de M., & Stangarlin, H. W. (2011). *Análise da influência do teor de Humidade no poder Calorífico em Combustível sólido para a geração de vapor d'água. Salão de ensino e de extensão*
38. Olaiya, B. C., Lawan, M. M., & Olonade, K. A. (2023). *Utilization of sawdust composites in construction—a review*. Springer Nature Applied Sciences, Vol. 5, n. 5
39. Ott, E., Spurlin, H. M., & Grafflin, M. W. (1954). *Cellulose and Cellulose Derivatives Part I*. Interscience Publishers
40. Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2004) – *A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels*, Fuel, vol. 84, n. 5, p 487–494
41. Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2007) – *A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials*. Fuel, vol. 86, n. 12/13, p 1710–1719
42. Pereira, A. F., Carneiro, A. de C. O., Vital, B. R., Lúcia, R. M. Della, Júnior, W. P., & Bianche, J. J. (2009). *Propriedades físico-químicas de briquetebríquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio*, Floresta e Ambiente, n. 1
43. Quirino, W. F., & Brito, J. O. (1991). *CARACTERÍSTICAS E ÍNDICE DE COMBUSTÃO DE BRIQUETEBRÍQUETES DE CARVÃO VEGETAL*, LPF - Série Técnica nº 13, Brasília
44. Quirino, W. F., Teixeira Do Vale, A., Ana, Abreu De Andrade, P., Lúcia, V., Abreu, S., Cristina, A., & Azevedo, S. (2005) – *PODER CALORÍFICO DA MADEIRA E DE MATERIAIS LIGNO-CELULÓSICOS*. Revista Da Madeira, no 89, 100–106.
45. Reis, D. T., Pereira, A. K. D. S., Scheidt, G. N., & Pereira, D. H. (2019) – *Plant and bacterial cellulose: Production, chemical structure, derivatives and applications*, Orbital, vol. 11, nº 5, p 321–329
46. Rominiyi, O. L., Adaramola, B. A., Ikumapayi, O. M., Oginni, O. T., & Akinola, S. A. (2017) – *Potential Utilization of Sawdust in Energy, Manufacturing and Agricultural*

CAPÍTULO VII

- Industry; Waste to Wealth*, World Journal of Engineering and Technology, vol. 05, n. 3, p 526–539.
47. Rotich, P. K. (1998). *Carbonization and briquetting of sawdust for use in domestic cookers*. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138542925>
48. Sánchez, E. A., Pasache, M. B., & García, M. E. (2014). *Development of Briquettes from Waste Wood (Sawdust) for Use in Low-income Households in Piura, Peru*. World Congress on Engineering 2014, Vol II, 1538.
49. Saragi, E., Padil, & Yelmida. (2014) – *Pembuatan Nitroselulosa Dari Selulosa Hasil Pemurnian Pelepah Sawit dengan*, Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau
50. Silva, D. A. da, Hansted, A. L. S., Nakashima, G. T., Padilla, E. R. D., Pereira, J. C., & Yamaji, F. M. (2021) – *Volatile matter values change according to the standard utilized*, Research, Society and Development, vol. 10, n. 12
51. Souza, F. De, & Vale, A. T. do. (2017). *Densidade energética de briquetebríquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem*. Pesquisa Florestal Brasileira, vol. 36, n. 88, p. 405
52. Tavares, S. R. D. L., & Do Amaral, F. C. S. (2014). *DETERMINAÇÃO DO TEOR DE FIBRA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES BIOMAS VISANDO O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E BIOMASSA ENERGÉTICA*. www.cnps.embrapa.br
53. Tursi, A. (2019). *A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion*. In Biofuel Research Journal, Vol. 6, n. 2, p. 962–979)
54. Urbanski, T. (1965). *Chemistry and Technology of Explosives* (W. Orna & Laverton Sylvia, Trans.; Vol. 2). Pergamon Press.
55. Vershinina, K., Dorokhov, V., Romanov, D., & Strizhak, P. (2023). *Ignition, Combustion, and Mechanical Properties of Briquettes from Coal Slime and Oil Waste, Biomass, Peat and Starch*. Waste and Biomass Valorization, vol. 14, n. 2, p. 431–445.
56. Vilas-Boas, A. C. M., Tarelho, L. A. C., Oliveira, H. S. M., Silva, F. G. C. S., Pio, D. T., & Matos, M. A. A. (2023). *Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products*, Sustainable Energy and Fuels, 2ed. Vol. 8, p. 379–396.

CAPÍTULO VII

7.2 Bibliografia Consultada

1. Bello R., Onilude, M. (2020), *Physico-mechanical Characteristics of High-Density Briquettes produced from Composite Sawdust*, Journal of Applied Sciences and Environmental Management, vol. 24, n. 5, p. 779-787
2. Bhattacharjee, S., Carmignani L., Celniker, G., Rhoades, B., (2017) – *Measurement of instantaneous flame spread rate over solid fuels using image analysis*, Fire Safety Journal p. 123–129
3. Chaloupková, V., Ivanova, T., Ekrt, O., Kabutey, A., Herak, D. (2018) - *Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes*, Energies, vol 11, n. 2
4. Ferreira, A. de O. G. M. (2016). *Caracterização Experimental da Ignição de Partículas Isoladas de Biomassa e Lenhite*, Engenharia Mecânica – Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa
5. Gopinath K., Anuratha K., Harisundar, R., Saravanan M., (2015) - *Utilization of Saw Dust in Cement Mortar & Cement Concrete*, INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & ENGINEERING RESEARCH, vol. 6
6. Handayani S, Widiati K, Putri F (2023) - *Quality of Charcoal Briquettes from Sawdust Waste of Ulin (Eusideroxylon zwageri) and Coconut Shell (Cocos nucifera) Based on Variations in Ratio and Particle Size*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1282
7. José, p., fontes, p., Ferreira Quirino, w., & pastore júnior, f. (1984). *Aglutinantes para briquetagem de carvão vegetal*.
8. Madlala, N., Eloka-Eboka, A., Lokhat, D. (2021), *Effect of pith/fiber separation, binders and hybridization on energy density and physical properties of bagasse briquettes*, Journal of Oleo Science
9. Mengist M., Woldeyes B., Gabbiye N., (2021) – *Production and Characterization of Sawdust Briquettes for Firewood Substitution*, Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, P 3-26
10. Mitchual, S. J., Frimpong-Mensah, K., Darkwa, N. A., (2013) – *Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes*, Energy and Environmental Engineering, International Journal of Energy and Environmental Engineering, vol. 4, n. 30.

CAPÍTULO VII

11. Nunes, Tiago E. F., (2015) – *Estudo da inflamabilidade de diversos tipos de madeiras e de cortiça usados na estrutura e na envolvente de edifícios*, Universidade de Coimbra, Coimbra
12. Olaniyi, H., Elinge, C., Lawal, M., Jinga, D. (2024) – *IGNITION AND BURNING RATE OF SHEANUT SHELL BRIQUETTES PRODUCED AT MODERATE TEMPERATURE AND DIE PRESSURE*, International Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, vol. 10, n. 6
13. Pereira, a. F., carneiro, a. De c. O., vital, b. R., lúcia, r. M. Della, júnior, w. P., & bianche, j. J. (2009). *Propriedades físico-químicas de briquetes aglutinados com adesivo de silicato de sódio*, n. 1
14. Torero, Jose L., (2016) - *Flaming Ignition of Solid Fuels*, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, p. 633–661
15. Yamaji, F. M., V., Lais Chrisostomo, W., Flores, W. (2013), *ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BRÍQUETES*, Energia na Agricultura, vol. 28, n.1, p.11-15
16. Yokoyama S., Matsumura Y., (2008) – *The Asian Biomass Handbook - A Guide for Biomass Production and Utilization*, Japan Institute of Technology
17. Zepeda-Cepeda C., Goche-Télles J., Palacios-Mendoza, C., Moreno-Anguiano, O., Núñez-Retana, V. D., Heya, M. N., Carrillo-Parra A., (2021) – *Effect of sawdust particle size on physical, mechanical, and energetic properties of pinus durangensis briquettes*, Applied Sciences, vol. 11

ANEXOS

Anexo 1: Caracterização da Biomassa

Tabela A1-1: Granulometria da serradura antes da moagem

Peneiro(mm)	Massa Retida (g)	Fracção Retida (xi)	Fracção Cumulativa (Xi)
4,75	72	0,24	0,24
2	30	0,1	0,34
1,18	40	0,13	0,47
1	10	0,03	0,51
0,5	64	0,21	0,72
Base	80	0,27	0,99
Total	296	-	1
Perdas	4	0,01	-

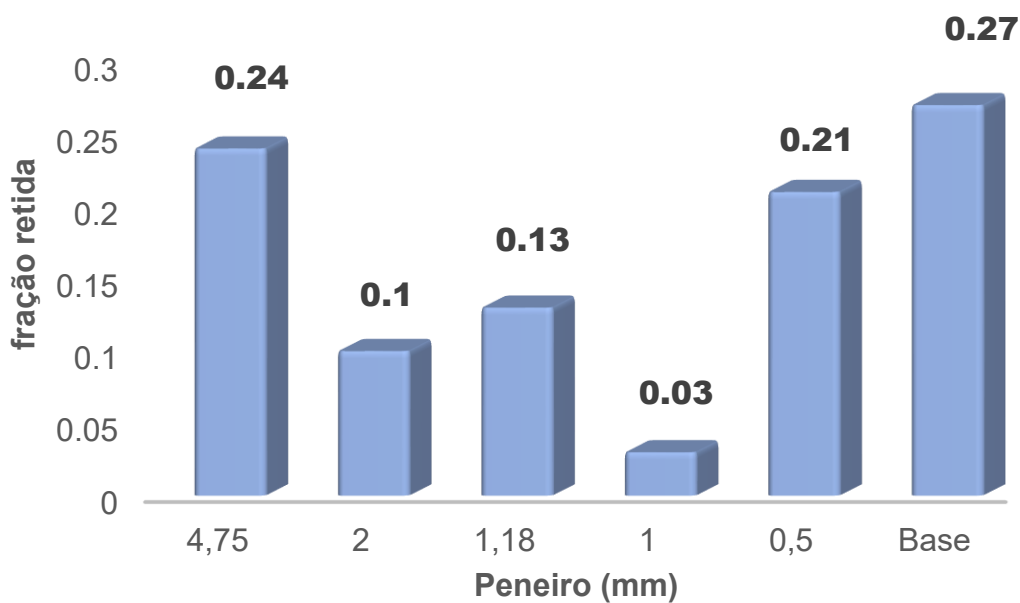


Gráfico G1: Distribuição granulométrica da serradura antes da moagem:

Fracção vs. diâmetro do peneiro

CAPÍTULO VIII

Tabela A2-2: Granulometria da serradura
pós moagem

Peneiro(mm)	Massa Retida (g)	Fracção Retida (x_i)	Fracção Cumulativa (X_i)
2	0,3	0,0010	0,0010
1,18	1,51	0,0052	0,0063
1	3,174	0,0111	0,01725
0,5	113,61	0,3933	0,4105
Base	170,3	0,5895	1
Total	288,89	-	-
Perdas	11,106	0,0384	1,0384

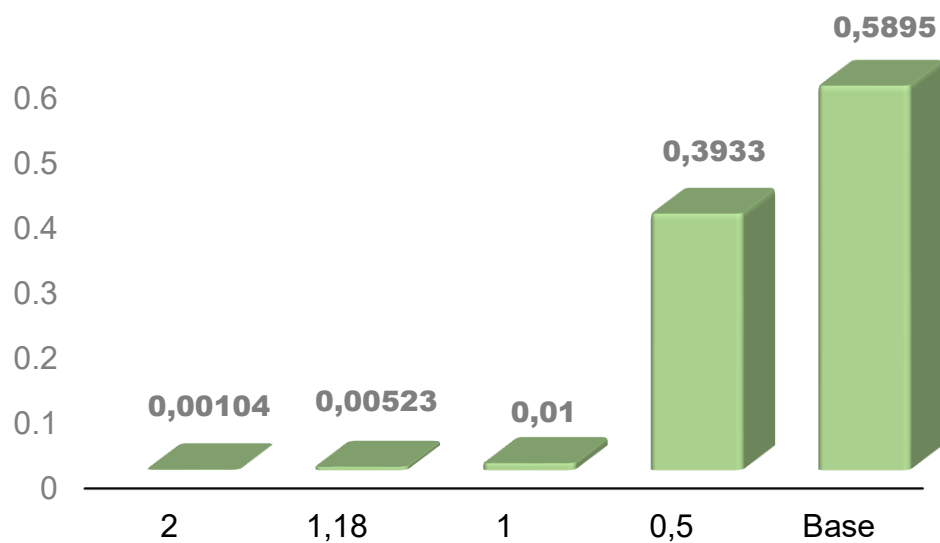


Gráfico G2: Distribuição granulométrica da serradura após moagem
Fracção vs. diâmetro do peneiro

CAPÍTULO VIII

Anexo 2: Caracterização dos Briquetes

Tabela A2-1: Variação da massa dos briquetes antes e após o teste de friabilidade

Identificação do briquete	Massa (g) antes	Massa (g) depois do teste	Variação
9	28,09	27,58	0,51
10	28,16	27,55	0,61
5	27,96	27,32	0,64

Tabela A2-2: Resultados da variação da altura dos briquetes ao longo do tempo

Tempo (h)	Altura (mm)			Elongação (%)		
	Briquetes					
	1	2	3			
0	12,47	12,33	12,91	0	0	0
1	12,61	12,47	13,03	1,36	1,86	0,93
24	12,77	12,82	13,14	2,49	3,90	1,78
72	13,00	12,89	13,28	3,94	4,30	2,71
96	13	12,89	13,28	4,25	4,54	2,87

Tabela A2-3: Dimensões dos Briquetes após alcançar a estabilidade dimensional para a determinação do volume e da densidade aparente

Briquete	Diâmetro (mm)	Altura(mm)	massa (g)	Volume (m ³)	Densidade Aparente (kg/m ³)
1	50,11	12,47	28,0078	$2,45802 \cdot 10^{-5}$	1139,4469
2	50,13	12,33	28,1067	$2,43236 \cdot 10^{-5}$	1155,5313
3	50,11	12,91	27,8745	$2,54475 \cdot 10^{-5}$	1095,3739
4	50,10	12,54	28,1931	$2,47083 \cdot 10^{-5}$	1141,0382

CAPÍTULO VIII

5	50,13	14,02	27,2922	$2,76575 \cdot 10^{-5}$	986,79165
6	50,09	12,84	28,3475	$2,52893 \cdot 10^{-5}$	1120,9288
7	50,15	13,2	28,2059	$2,60607 \cdot 10^{-5}$	1082,317
8	50,23	14,96	28,1845	$2,96297 \cdot 10^{-5}$	951,22384
9	50,01	14,58	27,5689	$2,86247 \cdot 10^{-5}$	963,11589
10	50,08	13,5	27,5385	$2,65786 \cdot 10^{-5}$	1036,1156
Médias	50,114	13,335	27,93196	$2,629 \cdot 10^{-5}$	1067,188308

Tabela A2-4: Resumo da determinação dos parâmetros de cálculo do índice de combustão para os 3 tipos de briquete

Bríquetes	A	B	C	Índice de Combustão por ensaio	Índice de Combustão
	0,5292	0,7078	0,8134	0,4605	
Serradura	0,5841	0,7118	0,8297	0,5010	$0,48 \pm 0,02$
	0,5116	0,7429	0,7898	0,4812	
	0,5096	0,8068	0,6973	0,5896	
Serradura + NC Simples	0,5772	0,8192	0,7170	0,6595	$0,65 \pm 0,06$
	0,5882	0,7598	0,6357	0,7030	
	0,5642	0,7495	0,7529	0,5616	
Serradura + NC Residual	0,4921	0,6896	0,7095	0,4783	$0,54 \pm 0,06$
	0,5437	0,7457	0,6875	0,5896	

CAPÍTULO VIII

Tabela A2-5: Determinação de índice de combustão de briquetes de serradura

Tempo (minutos)	Massa (gramas)	Temperatura (°C)
0	290	28
1	260	40
2	255	181
3	250	300
5	235	384
6	230	548
7	220	561
8	210	602
9	195	591
10	190	566
11	170	479
12	160	590
14	135	434
16	115	379
18	90	415
20	80	445
21	75	418
23	70	385
25	65	355
27	65	350
29	60	333
31	60	282
33	55	256
35	55	235
37	50	239
39	50	227
41	50	228
43	45	212
45	45	198
47	45	189

CAPÍTULO VIII

49	40	180
51	40	170
53	40	162
56	35	150,2
59	30	149
60	30	143
61	30	133
62	30	134

Tabela A2-6: Determinação de índice de combustão de briquetes NCR

Tempo (minutos)	Massa (gramas)	Temperatura (°C)
0	300	25,2
1	295	44
2	280	62
3	275	102
5	270	148
6	260	207
7	250	259
8	240	266
9	240	284
10	230	335
11	225	358
12	220	378

CAPÍTULO VIII

14	200	442
16	195	456
18	180	477
20	170	552
21	165	549
23	145	521
25	135	513
27	130	482
29	120	413
31	115	385
33	110	338
35	105	341
37	100	309
39	90	283
41	90	279
43	85	251
45	85	234
47	80	212
49	75	198
51	70	179
53	65	170

CAPÍTULO VIII

56	60	168
59	60	158
60	55	151
61	55	146
62	50	138
63	40	-

Tabela A2-7: Determinação de índice de combustão de briquetes NCS

Tempo (minutos)	Massa (gramas)	Temperatura (°C)
0	25	300
1	26	295
2	31	290
3	37	285
5	51	280
6	89	275
7	121	265
8	167	255
9	186	255
10	228	250
11	251	250
12	294	245
14	301	230
16	329	220
18	398	200
20	444	195
21	488	195
23	503	180

CAPÍTULO VIII

25	558	175
27	589	165
29	571	150
31	577	145
33	541	130
35	503	125
37	433	120
39	418	110
41	313	100
43	281	100
45	241	95
47	216	90
49	204	80
51	181	75
53	164	70
56	158	70
59	153	65
60	148	60
61	154	55
62	147	50
63	139	50
64	131	-
65	129	-
66	125	-
67	120	-
68	115	-
69	110	-

CAPÍTULO VIII

Anexo 3: Determinação do tempo de ignição

Tabela A3-1: Tempo até ignição dos bríquetes analisados

Descrição do Bríquete	Biomassa	Massa (gramas)	Tempo até a ignição (s)	Tempo médio (s)
1	Normal	35	86	
2	Normal	35	94	97 ± 12
3	Normal	35	110	
4	Normal	40	61	
5	Normal	40	65	66 ± 4
6	Normal	40	70	
7	Normal	50	48	
8	Normal	50	62	63 ± 15
9	Normal	50	78	
J	NCS	35	55	
E	NCS	35	71	69 ± 13
G	NCS	35	81	
H	NCS	40	53	
D	NCS	40	59	59 ± 5
I	NCS	40	63	
C	NCS	50	42	
K	NCS	50	66	84 ± 52
B	NCS	50	142	
L	NCR	35	103	
S	NCR	35	118	118 ± 15
O	NCR	35	133	
M	NCR	40	∞	
N	NCR	40	∞	∞
Sx	NCR	40	∞	
A	NCR	50	∞	
T	NCR	50	∞	∞
U	NCR	50	∞	

CAPÍTULO VIII

Anexo 4: Análise da Nitrocelulose sintetizada

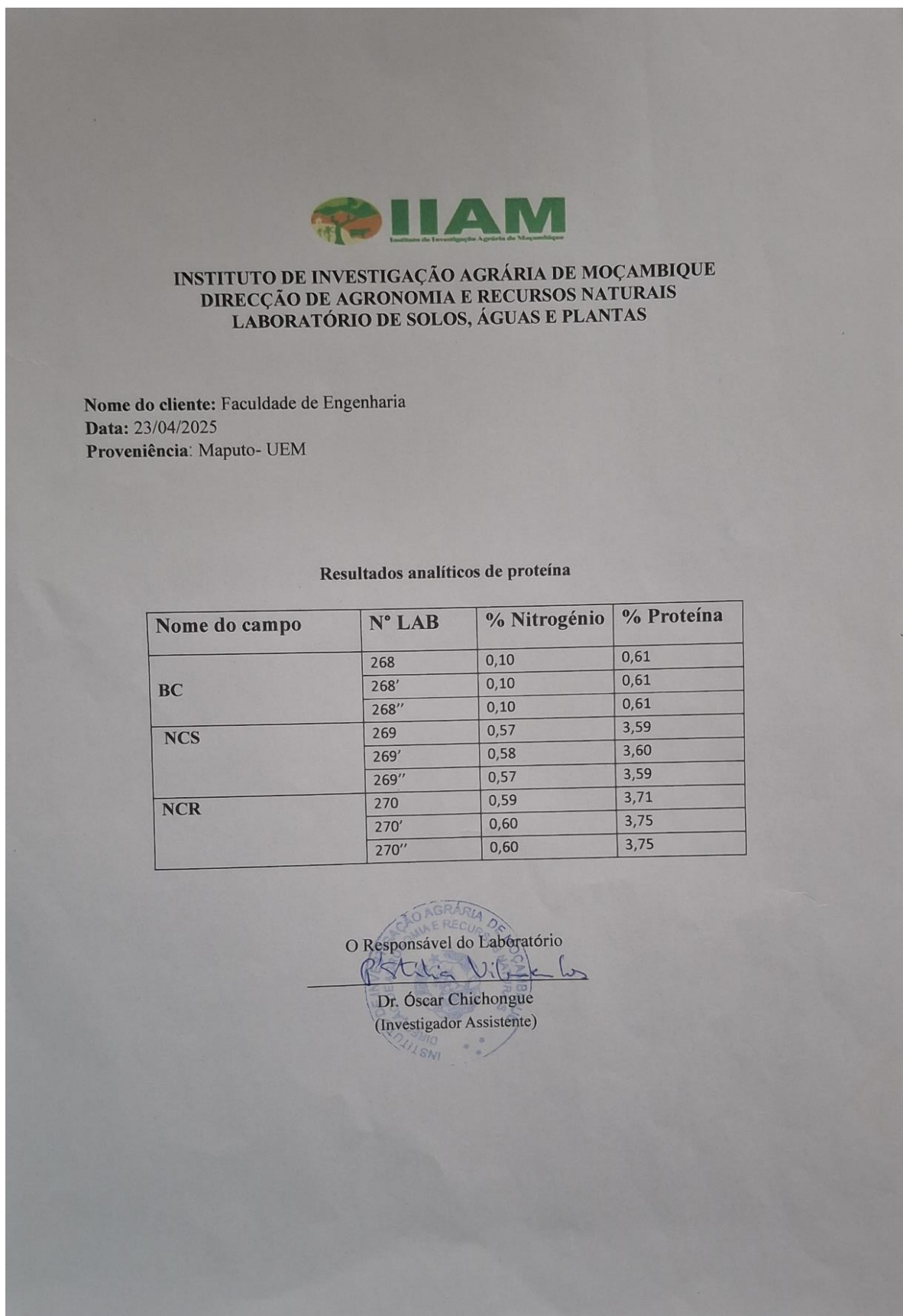


Figura F1: Resultados analíticos do teor de Nitrogénio das amostras