

ISABELA MARQUES QUEIROZ

CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES FEITOS DE ALGA (*Egeria Densa*), PODA DE
ÁRVORE E RSU

ISABELA MARQUES QUEIROZ

CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES FEITOS DE ALGA (*Egeria Densa*), PODA DE
ÁRVORE E RSU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de
Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de
Energia.

Orientador(a): Profa. Associada Andrea Cressoni De Conti.

Rosana

2025

Q3c

Queiroz, Isabela Marques

Caracterização de briquetes feitos de Alga (*Egeria Densa*), poda de árvore e RSU. / Isabela Marques Queiroz. -- Rosana, 2025

35 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana

Orientadora: Andrea Cressoni De Conti

1. Energia da Biomassa. 2. Briquetes. 3. Alga de água doce. 4. Cortes de árvores. 5. Resíduos de plástico. I. Título.

ISABELA MARQUES QUEIROZ

CARACTERIZAÇÃO DE BRIQUETES FEITOS DE ALGA (*Egeria Densa*), PODA DE
ÁRVORE E RSU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Energia da Faculdade de
Engenharia e Ciências - Câmpus de Rosana,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de
Energia.

Rosana, 07/07/2025.

Componentes da Banca Examinadora:

Prof(a) Associada Andrea Cressoni De Conti, Câmpus de Rosana,
FEC/ UNESP – Campus de Rosana

Prof(a) Dr(a) Maria Claudia Costa de Oliveira Botan,
FEC/ UNESP – Campus de Rosana

Eng. De Energia Marcos Paulo Patta Granado

Dedico este trabalho a todos aqueles que considero serem da minha família e aos amigos
que me apoiaram e continuam sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço aos meus Guias, Orixás e Entidades, que caminharam comigo durante essa jornada. Sem a fé que carrego na alma e a força que recebo da espiritualidade, nada disso seria possível. Que cada vela acesa, cada reza e cada firmeza tenha sido luz nesse caminho.

À minha família – minha mãe, minha irmã, minha sobrinha e minha tia de coração - meu porto seguro, minha base. Obrigada por acreditarem em mim, mesmo nos dias em que nem eu consegui. Cada palavra de apoio, cada gesto de carinho, cada oração feita em silêncio me sustentou até aqui. Esse trabalho também é de vocês.

A todos os funcionários e corpo docente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Rosana, por todo auxílio e conhecimento que me foi passado durante estes anos, toda ajuda foi necessária para minha chegada ao título de Engenheira de Energia.

A minha orientadora Prof.^a Associada Andrea Cressoni De Conti e o Prof. Associado Claudio De Conti, por todos os momentos de conversas, alegrias, churrascos, cafés da tarde e desabafos, por estarem presentes em todo meu processo de formação e mesmo nos momentos difíceis de minha vida não me deixaram desistir, este título veio graças a vocês.

E, por fim, um agradecimento especial aos meus últimos parceiros, que em algum momento do meu passado, duvidaram da minha capacidade. Ouvi suas palavras, sim, mas optei por não acolher como verdade. E hoje, com orgulho, carrego a prova de que acreditar em si mesma é, e sempre será, o caminho mais poderoso!

“Bom... Nós demos tudo de si, e viramos o jogo.”

Zootopia (2016)

RESUMO

O crescimento constante do consumo de energia elétrica no Brasil, impulsionado pelo aumento da demanda, reforça a importância da busca por fontes alternativas e sustentáveis. Este trabalho, de natureza técnico-experimental, teve como objetivo principal caracterizar briquetes produzidos a partir de resíduos de alga (*Egeria Densa*), poda de árvore e resíduos sólidos urbanos (RSU), avaliando seu potencial energético e físico. Para isso, foram realizadas misturas com diferentes proporções desses resíduos, com e sem adição de ligantes, e submetidas a ensaios de durabilidade, expansão volumétrica e análise de blendas. Os resultados obtidos indicaram que a combinação dos materiais utilizados, especialmente com a presença de ligantes, favorece a produção de briquetes com boas propriedades físicas, além de promover o reaproveitamento de resíduos frequentemente descartados sem tratamento adequado. Conclui-se que a briquetagem de alga (*Egeria Densa*), poda de árvore e RSU é uma alternativa promissora para a geração de energia renovável, com benefícios tanto ambientais quanto energéticos, contribuindo para o fortalecimento da matriz energética limpa no país.

Palavras-chave: Briquetagem. Alga. Poda de árvore. Resíduo sólido urbano. Biomassa. Energia renovável.

ABSTRACT

The continuous growth in electricity consumption in Brazil, driven by equipment modernization and increasing demand, underscores the importance of seeking alternative and sustainable energy sources. This technical and experimental study aimed to characterize briquettes produced from algae residues (*Egeria Densa*), tree pruning waste, and municipal solid waste (MSW), assessing their energy and physical potential. To achieve this, mixtures with varying proportions of these residues, both with and without the addition of binders, were prepared and subjected to tumbling tests, volumetric expansion analysis, combustion efficiency tests, and blend evaluations. The results indicated that the combination of the selected materials, especially with the inclusion of binders, contributes to the production of briquettes with favorable physicochemical properties, while also enabling the reuse of waste that is often discarded without proper treatment. It is concluded that the briquetting of *Egeria Densa*, tree pruning residues, and MSW is a viable and promising alternative for renewable energy generation, offering both environmental and energetic benefits, and contributing to the strengthening of a cleaner national energy matrix.

Keywords: Briquetting. Algae. Tree pruning. Municipal solid waste. Biomass. Renewable energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Alga após retirada do rio.	18
Figura 2: Poda de árvore após triturada	19
Figura 3: Plástico (RSU) separado e triturado.	19
Figura 4: Poda de árvore separada em granulometria.	20
Figura 5: Briquetes identificados, medidos inicialmente e armazenados para medidas posteriores.	21
Figura 6: Briquetes confeccionados em 100% Alga com Temperatura.....	21
Gráfico 1: Expansão Volumétrica – Alga sem (azul) e com temperatura (vermelho).....	26
Gráfico 2: Expansão Volumétrica - Poda de árvore sem (azul) e com temperatura (vermelho).	26
Gráfico 3: Expansão Volumétrica – Misturas (blendas) sem (azul) e com temperatura (vermelho).	27
Gráfico 4: Expansão Volumétrica Geral das Blendas.....	28
Figura 7: Briquetes pós teste de durabilidade	29
Gráfico 5: Variação Volumétrica por Densidade Aparente	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Briquetagem como técnica de densificação energética.....	13
2.1.1	<i>Resíduos utilizados como matéria-prima para briquetes.....</i>	<i>13</i>
2.2	Importância dos ligantes no processo de briquetagem	14
2.2.1	<i>Ensaio e Qualidade dos briquetes</i>	<i>15</i>
2.2.2	<i>Testes de durabilidade.....</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Expansão volumétrica após briquetagem.....</i>	<i>15</i>
2.2.4	<i>Eficiência de queima e análise térmica.....</i>	<i>15</i>
2.2.5	<i>Impactos dos ligantes na formulação.....</i>	<i>15</i>
2.3	Estudos comparativos recentes.....	16
2.3.1	<i>Densidade e estabilidade dimensional</i>	<i>16</i>
2.3.2	<i>Emissão de poluentes na queima.....</i>	<i>16</i>
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1	Materiais utilizados	17
3.2	Método de preparo das blendas	18
3.3	Processo de briquetagem.....	19
3.4	Ensaio realizado.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1	Resultados teste de durabilidade.....	28
5	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

No que se refere ao consumo de energia, observa-se uma tendência constante de crescimento. A modernização de equipamentos domésticos, ainda que com foco na eficiência energética, impulsiona a substituição frequente desses dispositivos, gerando um aumento na demanda por energia elétrica. Para suprir essas necessidades energéticas crescentes, novas tecnologias vêm sendo continuamente pesquisadas e inseridas no mercado, com o objetivo principal de reduzir as emissões de carbono (Borges *et al.*, 2015; Furtado *et al.*, 2010).

O Brasil tem se destacado positivamente no cenário global pela utilização de fontes renováveis de energia, apresentando uma das matrizes energéticas mais sustentáveis entre as grandes potências. Dentre as fontes renováveis, a biomassa ocupa posição de destaque, sendo considerada um dos principais pilares da geração de energia limpa no país. Contudo, o desafio ainda persiste: alcançar uma participação de 70% de fontes renováveis na matriz energética brasileira até o ano de 2050 (Borges *et al.*, 2015; Furtado *et al.*, 2010).

A diversidade da produção agrícola nacional confere ao Brasil grande potencial na geração de matérias-primas voltadas à produção de energia. Este aspecto tem chamado a atenção de outros países e reforçado a relevância estratégica do setor agro-energético (Henrique *et al.*, 2017). Atualmente, observa-se um crescimento na demanda por recursos agrícolas destinados à geração de energia, bem como o aumento das iniciativas voltadas ao aproveitamento de resíduos e subprodutos agrícolas com essa finalidade (Borges *et al.*, 2015; Miranda *et al.*, 2019). As condições climáticas e geográficas do país favorecem o cultivo de diferentes tipos de biomassas, como aquelas derivadas do milho, soja, madeira, entre outras, o que amplia as possibilidades para além das fontes mais tradicionais, como a cana-de-açúcar e o carvão vegetal (Miranda *et al.*, 2019).

A biomassa apresenta a vantagem de permitir uma utilização contínua ao longo do ano, dependendo apenas do manejo adequado do plantio e da colheita. No entanto, muitos dos materiais utilizados possuem elevado teor de umidade, o que compromete a eficiência energética. Por essa razão, há um esforço contínuo na busca por soluções que minimizem esse obstáculo. Além disso, outros desafios persistem, como a dificuldade de transporte, que resulta em perdas significativas, a necessidade de grandes espaços para armazenamento e o baixo poder calorífico, especialmente quando comparada a fontes não renováveis (Miranda *et al.*, 2019).

Entre as alternativas estudadas para otimizar o uso da biomassa, destaca-se o conceito de biomassa concentrada, considerada uma das formas mais eficientes de aproveitamento

energético. Dentro desse contexto, o processo de densificação energética tem recebido atenção crescente, sendo a briquetagem uma das técnicas mais amplamente adotadas (Felfli *et al.*, 2011).

A briquetagem consiste em um processo de compactação da biomassa que visa melhorar suas propriedades de manuseio, aumentar o poder calorífico por volume, reduzir os custos com transporte e gerar um combustível mais uniforme, limpo e estável. O volume da biomassa antes do processo é, em média, cinco vezes maior do que após a briquetagem, o que evidencia a eficiência da compactação, mesmo considerando a redução do poder calorífico por massa (Junior, *et al.*, 2016).

Atualmente, a produção de briquetes no Brasil tem se mostrado uma solução viável para a redução dos resíduos agroindustriais e agrofloretais, ao mesmo tempo em que contribui para o aumento da geração de energia renovável. A adição de ligantes durante o processo de fabricação dos briquetes é fundamental, pois melhora as propriedades físicas e energéticas das misturas, promovendo maior coesão entre as partículas. Dentre os materiais utilizados como ligantes, destacam-se os resíduos agrofloretais, devido ao seu elevado teor de lignina, superior ao da cana-de-açúcar, o que os torna mais eficazes e ambientalmente sustentáveis (Henrique *et al.*, 2017).

Para garantir a eficiência do processo de briquetagem, recomenda-se a realização de blendagens, isto é, misturas de diferentes materiais com o objetivo de otimizar o desempenho do briquete final. Essas blendas são submetidas a diversas análises, incluindo testes químicos e ensaios de queima, a fim de identificar a composição que oferece o melhor rendimento energético. (Felfli *et al.*, 2011).

Nesse trabalho foram confeccionadas blendas com diferentes proporções de resíduos de alga, poda de árvore e RSU (plástico), com e sem adição de ligantes, e submetidas a ensaios de durabilidade, expansão volumétrica. Os resultados obtidos indicaram que a combinação dos materiais utilizados, especialmente com a presença de ligantes, no caso plástico, favorece a produção de briquetes com boas propriedades de durabilidade, além de promover o reaproveitamento de resíduos frequentemente descartados sem tratamento adequado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Briquetagem como técnica de densificação energética

A briquetagem é um processo de densificação energética, onde o objetivo é transformar materiais com baixo valor energético por unidade de volume, em combustíveis sólidos compactos com maior valor agregado, assim aumentando o aproveitamento de materiais. Esta técnica consiste basicamente na compactação por pressão de resíduos de biomassa de granulometria elevada, sendo estas em pó ou trituradas, em moldes com ou sem adição de ligantes, formando blocos sólidos conhecidos como briquetes. (Obi *et al.*, 2022).

Esta técnica não só melhora as características físicas dos resíduos, como densidade, forma e resistência mecânica, mas também contribui para sua valorização energética, reduzindo perdas durante o armazenamento, consequentemente facilitando o transporte. Além disso, a briquetagem favorece a queima mais eficiente e controlada do material, menor emissão de poluentes, se comparado à biomassa *in natura*. (Souza *et al.*, 2016).

A qualidade do produto obtido por este método, depende da pressão aplicada na confecção, assim como as propriedades do material utilizado para a realização destes testes. Alguns fatores presentes nos processos também afetam e são responsáveis pelos resultados, como diâmetro e temperatura aplicada. (Souza *et al.*, 2016).

O uso de briquetes é considerado estratégico para comunidades e indústrias que buscam soluções sustentáveis para a reciclagem de resíduos e a produção de energia térmica “limpa”, especialmente em regiões com alta geração de resíduos orgânicos. (Ibitoye *et al.*, 2021).

2.1.1 Resíduos utilizados como matéria-prima para briquetes

- Poda de Árvore

Os abundantes resíduos provenientes da poda de árvores em regiões urbanas, são frequentemente descartados em aterros ou incinerados sem reaproveitamento. Esse material, encontrado em larga escala, é composto em sua maioria por galhos, folhas e cascas de árvores, apresenta características lignocelulósicas relevantes para a produção de briquetes, devido à presença de celulose, hemicelulose e lignina. No entanto, sua composição pode variar conforme a espécie vegetal e o grau de umidade, fatores que influenciam diretamente nas propriedades térmicas e mecânicas dos briquetes (Souza *et al.*, 2016; Silva, *et al.*, 2016).

- Resíduo Sólido Urbano (RSU)

O RSU é um resíduo heterogêneo, composto por uma mistura de materiais orgânicos e inorgânicos, sendo uma fração significativa potencialmente reaproveitável na forma de combustível sólido. A utilização de RSU na briquetagem exige uma triagem prévia, visando eliminar materiais contaminantes e inapropriados para queima, como metais, plásticos não combustíveis e materiais úmidos em excesso. Dentre os resíduos plásticos, o PET (*polietileno tereftalato*) pode contribuir positivamente na composição dos briquetes, uma vez que apresenta alto poder calorífico e potencial de fusão que melhora a coesão entre as partículas, desde que utilizado em quantidades controladas para evitar excesso de emissão de compostos voláteis. Quando bem selecionado, o RSU pode ser uma alternativa viável de biomassa para fins energéticos, especialmente quando combinado com outras matérias-primas orgânicas. (García *et al.*, 2017).

- Alga (*Egeria Densa*)

A “*Egeria Densa*” é classificada como macrófita aquática, frequentemente considerada uma planta invasora em ambientes hídricos brasileiros. Seu crescimento acelerado e alta biomassa gerada tornam sua remoção um desafio ambiental recorrente. No entanto, sua composição orgânica permite seu aproveitamento energético, especialmente quando submetida a processos de secagem e compactação. Estudos indicam que, mesmo com teor de umidade naturalmente elevado, essa alga pode apresentar boas características energéticas após o tratamento adequado, configurando-se como uma matéria-prima inovadora e sustentável na produção de briquetes. (Azevedo *et al.*, 2017).

2.2 Importância dos ligantes no processo de briquetagem

A adição de ligantes é um fator determinante na qualidade dos briquetes produzidos. Esses aditivos têm a função de melhorar a coesão entre as partículas, aumentando a resistência mecânica do produto e sua estabilidade durante o manuseio e transporte. Além disso, os ligantes podem atuar na melhora das propriedades térmicas, promovendo uma queima mais eficiente e uniforme. (Marreiro *et al.*, 2021).

Ligantes naturais, como amidos, melaço, argila e até mesmo a lignina presente na biomassa, são preferidos por não comprometerem a sustentabilidade do processo. A escolha do tipo e da proporção do ligante depende das características da mistura, da finalidade dos briquetes e das condições operacionais de fabricação. Pode ser encontrada uma porcentagem de 8% até 10% como sendo ideal para a maximização da durabilidade e aporte ideal de densidade, estes parâmetros são importantes para aplicações térmicas. (Marreiro *et al.*, 2021).

2.2.1 *Ensaaios e Qualidade dos briquetes*

Para avaliar a viabilidade técnica dos briquetes produzidos a partir de Alga (*Egeria Densa*), Poda de árvore e Resíduo Sólido Urbano (RSU), foram conduzidos ensaios específicos que analisaram características mecânicas, físicas e térmicas desses materiais, tanto de forma isolada, quanto combinadas, chamadas assim de blends. (Obi *et al.*, 2022).

2.2.2 *Testes de durabilidade*

O ensaio de durabilidade busca simular o desgaste físico que os briquetes sofrem durante transporte e armazenamento. Estudos demonstram que briquetes fabricados com biomassas mistas, podem apresentar durabilidade entre 93% e 98%, após cinco dias, mesmo com diferentes granulometrias e teores de umidade. Isso demonstra sua alta aplicabilidade em contextos urbanos e industriais, principalmente quando há adição de ligantes naturais que aumentam a coesão das partículas (Abdel Aal *et al.*, 2023).

2.2.3 *Expansão volumétrica após briquetagem*

Logo após o processo de prensagem, os briquetes passam por um processo de expansão, geralmente inferior a 2% em um caso ideal. Estudos com biomassa agrícola indicam que essa expansão pode ser controlada por meio de compactação adequada e pela escolha de ligantes apropriados, assim mantendo a integridade estrutural durante o tempo pós briquetagem e transporte (Santos *et al.*, 2020).

2.2.4 *Eficiência de queima e análise térmica*

A termogravimétrica (TGA) permite identificar o comportamento térmico da biomassa durante a queima. Materiais como a alga (*Egeria Densa*), por possuírem frações orgânicas e celulósicas, apresentam três estágios de decomposição térmica. Essa característica favorece uma combustão eficiente quando aliada à poda urbana ou Resíduo Sólido Urbano (RSU) (Azevedo *et al.*, 2022; Fernandes *et al.*, 2021; Álvarez *et al.*, 2020).

2.2.5 *Impactos dos ligantes na formulação*

A adição de ligantes influencia diretamente a resistência mecânica e o poder calorífico dos briquetes. Além disso, a escolha correta do ligante reduz o desgaste dos equipamentos utilizados, melhora o tempo de prensagem e possibilita um produto com maior durabilidade, densidade e estabilidade térmica. (Kumar *et al.*, 2020; Marreiro *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2020).

2.3 Estudos comparativos recentes

Pesquisas recentes sobre briquetes e materiais nos quais estes podem ser confeccionados, contribuem para o entendimento da performance dos briquetes produzidos com resíduos semelhantes ao do objeto do presente estudo, confirmando assim a viabilidade da técnica em diferentes contextos. (Junior, *et al.*, 2016).

2.3.1 Densidade e estabilidade dimensional

Segundo a literatura, pesquisas com biomassa urbana e agrícola, como serragem, eucalipto e restos vegetais, mostraram que densidades médias entre 400 e 800 kg/m³ são ideais para armazenamento e transporte. Os melhores resultados foram obtidos quando a matéria-prima foi moída a granulometria inferior a 5 mm, reduzindo a expansão volumétrica. Este estudo trás a matéria-prima a uma granulometria de 20 a 40 Mesh. (Silva, *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2020).

2.3.2 Emissão de poluentes na queima

Briquetes formulados com frações orgânicas do RSU demonstram não apenas poder calorífico elevado (acima de 22MJ/kg), mas também uma redução significativa na emissão de gases poluentes em comparação ao carvão vegetal. Essa característica reforça os benefícios ambientais da utilização de resíduos sólidos urbanos no processo de briquetagem. (García *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2020).

A combustão de forma literal, é a reação química exotérmica que ocorre entre um combustível e um comburente, os materiais envolvidos sofrem um processo de oxidação, onde liberam calor, e assim formam um grupo de espécies diferentes de reagentes. A combustão traz como propósito a geração de energia em primeiro lugar, e com isso sua eficiência se baseia na menor geração de carbono. (Rendeiro *et al.*, 2008)

Em sistemas de geração de energia renovável a partir da combustão de resíduos sólidos, utiliza-se da biomassa em sua forma natural para a geração, o que traz propostas positivas como a redução de emissão de gases de efeito estufa, por ser uma forma “mais limpa” de geração. Porém, assim como todo processo, este pode-se tornar mais eficiente com o passar dos anos e com estudos relacionados a área. (Baris, *et al.*, 2018).

A combustão de material agroindustrial “*in natural*” é a maneira mais comum de geração de energia térmica, difundida em diversas unidades geradoras de energia por meio térmico, como usinas sucroalcooleiras e de papel e celulose, por exemplo. (Baris, *et al.*, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa consiste em realizar uma revisão bibliográfica dos produtos já produzidos, estes serão obtidos e realizados conforme as normas e artigos já prontos anteriormente, tendo como base acervos, periódicos e as bibliotecas físicas e virtuais de universidades como UNESP, UNICAMP, UFTPR e USP, conforme informações sobre o tema.

3.1 Materiais utilizados

Para a produção dos briquetes, foram utilizados três tipos principais de materiais:

- **Alga (*Egeria Densa*):** coletada no Rio Paraná, no reservatório de Rosana – SP, e limpa através do processo de catação para a retirada de impurezas, mexilhões e pequenos peixes, seca a céu aberto de 48 a 72 horas, garantindo umidade inferior a 12%.
- **Poda de árvores urbanas:** composta majoritariamente por galhos, folhas e pequenas porções de troncos triturados, provenientes da limpeza urbana, com secagem a céu aberto por até 72 horas. (Figura 1)
- **Resíduo Sólido Urbano (RSU):** composto por resíduos classificados “PET”, já separados resíduos de metais e vidros, então triturados em moinho industrial, e separados em granulometria considerada de 40 Mesh. (Figura 2)

Figura 1: Alga após retirada do rio.



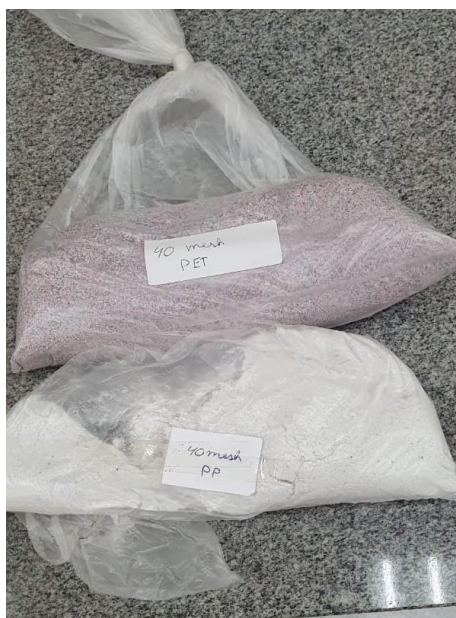
Fonte: Próprio Autor.

Figura 2: Poda de árvore após triturada.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3: Plástico (RSU) separado e triturado



Fonte: Próprio Autor.

3.2 Método de preparo das blendas

Todos os briquetes foram realizados de igual forma, levando em sua produção um peso inicial do material de 50g (cinquenta gramas) cada um, mesmo em blendas que apresentam a mistura dos materiais bases.

As biomassas utilizadas foram inicialmente pesadas e separadas em três proporções experimentais, denominadas como “blendas”. Cada blenda foi testada em duas situações, com ou sem temperatura, de aproximadamente 110° C.

- Blenda 1: 100% Alga (*Egeria Densa*)
- Blenda 2: 100% Poda de árvore

- Blenda 3: 45% Alga (*Egeria Densa*) + 45% Poda de Árvore + 10% Resíduo Sólido Urbano (RSU).

A separação das blendas ocorreu da seguinte forma: cada blenda contou com 6 unidades de briquetes. Para as blendas com misturas, o material foi previamente pesado e depois misturado até obter uma massa homogênea (Figura 3).

Figura 4: Poda de árvore separada em granulometria



Fonte: Próprio Autor.

3.3 Processo de briquetagem

O processo foi realizado em uma briquetadeira LIPEL-LB32, que permite a densificação utilizando temperatura, aplicando-se pressão de 110 bar por briquete, com tempo de prensagem de 5 minutos. Para os briquetes onde a temperatura foi aplicada, respeitou-se o tempo de 5 minutos de prensagem e 10 minutos para resfriamento. O molde utilizado foi cilíndrico, com dimensões de aproximadamente 33mm de diâmetro por 60mm de altura.

Os resíduos foram secos e moídos, e a determinação da composição granulométrica das partículas, foram realizadas de acordo com a norma NBR NM 248/2003. Verificado em seguida o teor de umidade dos materiais em uma balança específica para isso (OHAUS, modelo MB27), a fim de verificar se a porcentagem estava entre 10 e 12%.

A moagem do material foi realizada através de um moinho MARCONI-MA1680, com velocidade de rotação regulada em 128rpm. A separação granulométrica foi realizada em um agitador de batida intermitente MARCONI-MA750, com abertura de 0.425mm (40Mesh), regulada com a velocidade de 100rpm.

Após a prensagem (Figuras 4 e 5), os briquetes foram medidos, identificados e armazenados em sacos plásticos por 72 horas para medidas de expansão volumétrica até sua estabilização.

Figura 5: Briquetes identificados, medidos inicialmente e armazenados para medidas posteriores.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 6: Briquetes confeccionados em 100% Alga com Temperatura.



Fonte: Próprio Autor.

3.4 Ensaios realizados

Foram realizados os seguintes ensaios para avaliação física e mecânica dos briquetes:

- **Durabilidade:** Avalia a resistência mecânica dos briquetes à abrasão e impactos, simulando manuseio e transporte. Consiste em girar os briquetes em um tambor por tempo determinado e assim medir a perda de massa.
- **Expansão volumétrica:** Analisa a variação nas dimensões dos briquetes durante 72 horas, indicando sua estabilidade dimensional e resistência à absorção de umidade ao longo do tempo.
- **Análise de blendas:** Avaliação visual e física das proporções testadas, observando a homogeneidade, coesão e integridade das misturas formadas.

Para a determinação do volume de cada briquete, considerando seu formato cilíndrico, utilizou-se a Equação 1 do volume do cilindro e utilizando um paquímetro digital para a medição da altura e do diâmetro. Todas as medidas foram feitas nos tempos de 1h, 3h, 5h, 7h, 24h, 48h e 72h, a fim de verificação o máximo da expansão volumétrica.

$$VB = \pi * hB(dB/2)^2 \quad (1)$$

Em que V_B é o volume do briquete; d_B é o diâmetro do briquete; e h_B é a altura do briquete.

A expansão volumétrica foi calculada pela diferença entre os valores finais e iniciais do volume para cada briquete, pela Equação 2.

$$\Delta V = V - V_o \quad (2)$$

Em que ΔV é a variação do volume, V é o volume final e o V_o é o volume inicial.

Durante a caracterização física dos briquetes, dois parâmetros fundamentais para avaliar a qualidade do produto são: Densidade aparente e Densidade energética. A densidade aparente (DA) refere-se à razão entre a massa (m) do briquete e seu volume (V), considerando inclusive os espaços vazios internos e a forma final do produto. Ela é expressa da seguinte forma:

$$DA = \frac{m}{V} \quad (3)$$

Onde, “DA” (kg m^{-3}) é a densidade aparente; “m” (g) é a massa final e V (cm^3) é o volume final do briquete. Este parâmetro influencia diretamente na eficiência do transporte, armazenamento e no comportamento térmico durante a queima.

Já a densidade energética (DE) relaciona a densidade aparente com o poder calorífico inferior (PCI) do briquete, refletindo a quantidade de energia por unidade de volume. É dada por:

$$DE = DA \times PCS \quad (4)$$

Onde “DE” (MJ/m^3), “DA” (kg m^{-3}) e PCI em MJ/kg . Quanto maior a densidade energética, maior será o potencial do briquete como biocombustível sólido, demonstrando sua capacidade de gerar energia de forma compacta e eficiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais permitiram identificar diferenças entre as blendas testadas, tanto em relação à resistência mecânica quanto a estabilidade dimensional. Nesta seção, serão apresentados e discutidos os dados obtidos, com apoio de gráficos e tabelas comparativas.

As misturas de briquetes compostos por Algas (*Egeria Densa*), poda de árvore e RSU, tem sido uma área de pesquisa cada vez mais relevante, impulsionada pela busca por fontes de energia mais sustentáveis e pelo aproveitamento de resíduos orgânicos e plásticos. Apresenta-se os resultados comparativos entre as blendas que foram mantidas em diferentes condições de temperatura e as que não foram buscando compreender a influência desse fator no desempenho desses materiais.

Inicialmente, foram analisadas blendas compostas pelos materiais utilizados neste estudo, sem o controle de temperatura durante o processo de briquetagem. Conforme apresentado nas tabelas 1 e 2 e nos gráficos de 1 a 3, esses testes permitiram avaliar o desempenho das misturas em condições ambientais normais. Os resultados indicam que, mesmo sem controle térmico, as formulações apresentam potencial.

Em contraste, a variável temperatura foi aplicada controladamente durante a fase da briquetagem, permitindo avaliar o efeito do calor nas diferentes blendas. Os resultados revelam que o controle da temperatura teve um impacto no desempenho dos briquetes, levando a um aumento de densidade, resistência mecânica.

O controle de temperatura durante o processo de briquetagem das blendas compostas por alga (*Egeria Densa*), poda de árvore e Resíduo Sólido Urbano (RSU), revela um fator essencial para determinar o desempenho final desses materiais. O aumento da temperatura em aproximadamente 110° C, experimentou efeitos em diversos aspectos do processo resultando em melhorias na qualidade e eficiência dos briquetes produzidos nessas condições.

Ao aumentar a temperatura durante a briquetagem, observou-se uma melhora na fusão e coesão dos materiais constituintes. Esse fenômeno favoreceu a formação de briquetes mais densos e com maior resistência mecânica. A interação entre as partículas das matérias-primas foi mais efetiva em temperaturas elevadas, promovendo uma aglomeração mais resistente e, consequentemente, briquetes mais sólidos e robustos.

Observou-se que o aumento da temperatura no processo de briquetagem favoreceu a compactação dos materiais e a redução da umidade, o que poderia influenciar positivamente na densidade e na estabilidade dos briquetes. Embora não tenham sido realizados testes calorimétricos nesse estudo, é possível sugerir, que a eliminação parcial de compostos

voláteis e a maior coesão entre os materiais possam contribuir para um melhor desempenho térmico. Esse resultado indica um potencial para aproveitamento energético mais eficiente em futuras aplicações.

Assim, o controle de temperatura durante o processo de briquetagem contribuiu para uma melhor compactação dos materiais, o que tende a favorecer a estabilidade e facilitar o manuseio dos briquetes. Briquetes mais estáveis e coesos são preferíveis para armazenamento e transporte, por apresentarem menor risco de desintegração e maior eficiência na distribuição.

Assim, o controle de temperatura durante o processo de briquetagem contribuiu para uma melhor compactação dos materiais, o que tende a favorecer a estabilidade e facilitar o manuseio dos briquetes. O valor apresentado para PCS (Poder calorífico Súperior), foi adquirido, estudado e tabelado, anteriormente a este trabalho. Embora se reconheça que briquetes mais densos e coesos normalmente apresentam maior eficiência energética, neste trabalho não foi realizada a análise direta do poder calorífico, e, portanto, não se aplicou metodologia específica para essa variável. As observações aqui apresentadas baseiam-se nos comportamentos físicos e estruturais verificados nos testes mecânicos.

Em suma, a influência da temperatura durante todo o processo nas blendas compostas pelos materiais, Alga (*Egeria Densa*), Poda de árvore e Resíduo Sólido Urbano, se fez capaz de alcançar briquetes com melhor desempenho. A otimização das condições térmicas resultou em briquetes mais densos, resistentes, com maior poder calorífico e menor teor de umidade. Esses avanços representam um passo significativo em direção a uma fonte de energia mais limpa, sustentável e eficiente, confiante para a busca de soluções energéticas mais amigáveis ao meio ambiente.

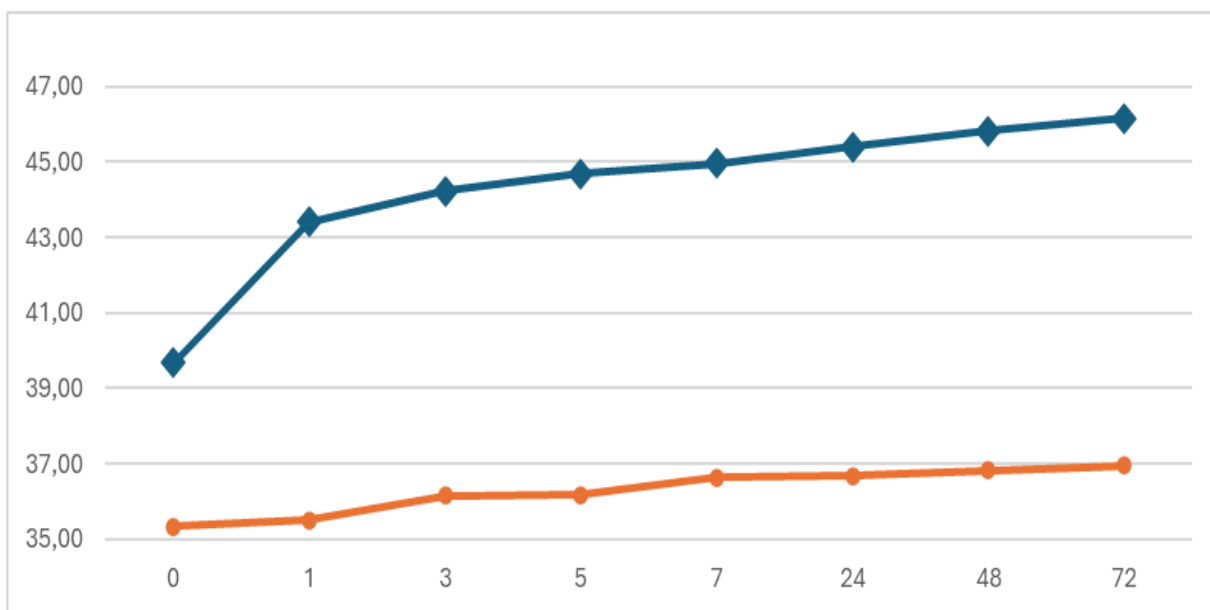
Tabela 1: Blendas sem temperatura.

BLENDA	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	PCS do Material (MJ/kg)	DENSIDADE ENERGÉTICA APARENTE (MJ/M³)	Variação Volumétrica (%)
100% ALGA	1127,6951	14,2591	16079,9168	11,66
100% PODA DE ÁRVORE	988,9873	12,4565	12319,3207	18,33
(45%A+45%P+10%PET)	985,5125	12,4565	12276,0365	10,57

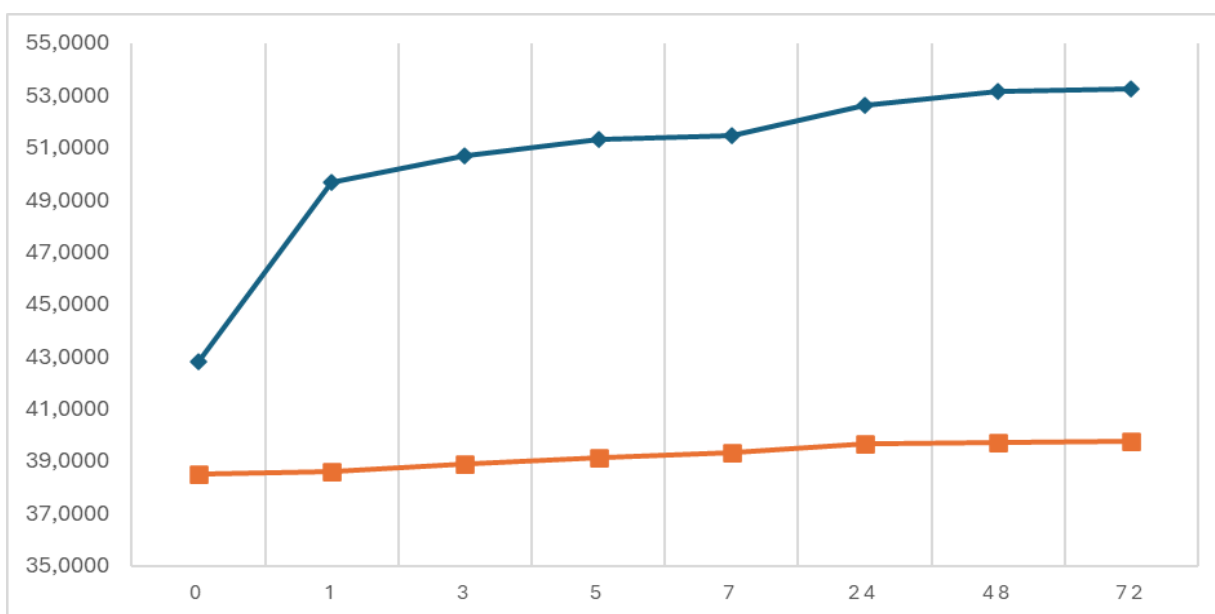
Fonte: Próprio Autor**Tabela 2:** Blendas com temperatura.

BLENDA	DENSIDADE APARENTE (kg/m³)	PCS do Material (MJ/kg)	DENSIDADE ENERGÉTICA APARENTE (MJ/M³)	Variação Volumétrica (%)
100% ALGA	1374,2748	14,2591	19595,9219	2,67
100% PODA DE ÁRVORE	1271,8207	12,4565	15842,4341	1,79
(45%A+45%P+10%PET)	1290,4155	12,4565	16074,0612	2,59

Fonte: Próprio Autor

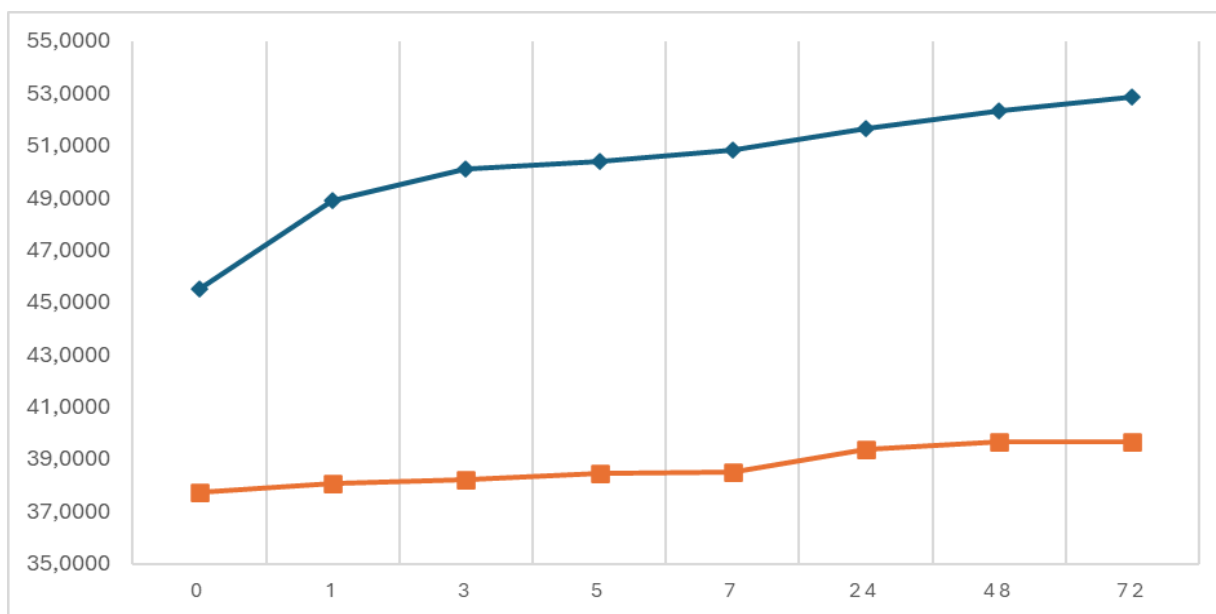
Gráfico 1: Expansão Volumétrica – Alga sem (azul) e com temperatura (vermelho).

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 2: Expansão Volumétrica - Poda de árvore sem (azul) e com temperatura (vermelho).

Fonte: Próprio Autor

Gráfico 3: Expansão Volumétrica – Misturas (blendas) sem (azul) e com temperatura (vermelho).

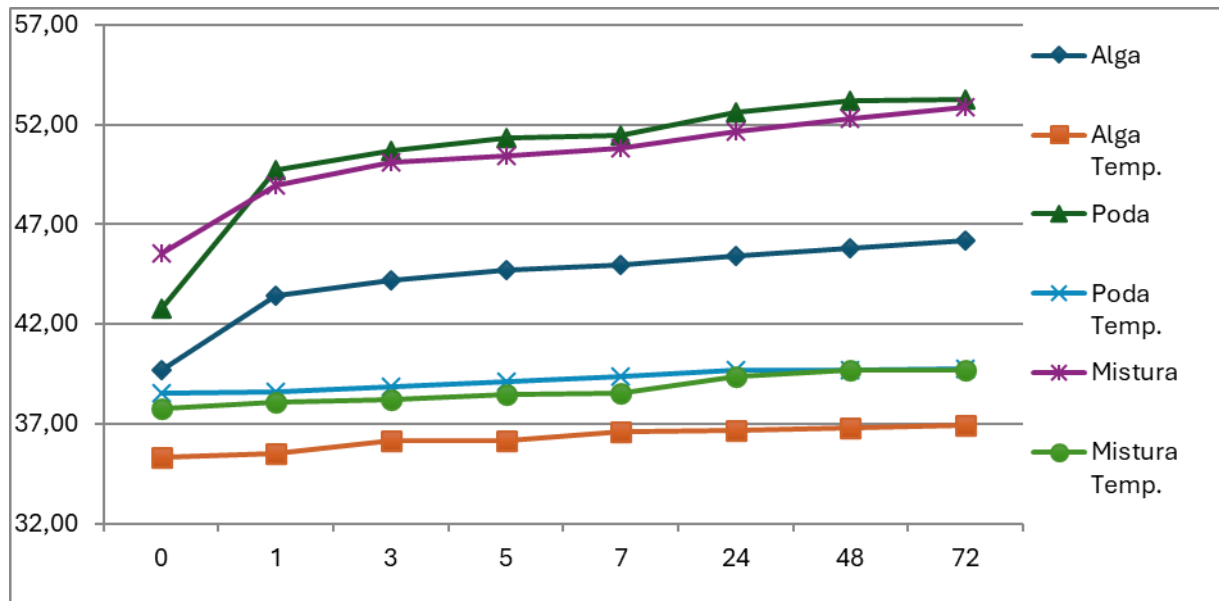


Fonte: Próprio Autor

Quando comparados os gráficos apresentados acima individualizados, notamos um melhor desempenho comercial das blendas com temperatura para transporte, por causa de sua menor variação volumétrica.

Os dados obtidos demonstram que a adição equilibrada de materiais, aliada a aplicação correta de ligantes, favorece tanto a eficiência energética quanto a integridade mecânica dos briquetes produzidos com resíduos renováveis.

A discussão desses resultados evidencia que a combinação entre os resíduos vegetais aquáticos e urbanos é uma estratégia viável para a produção de biocombustíveis sólidos sustentáveis, com impacto positivo na destinação de rejeitos e no fortalecimento da matriz energética limpa.

Gráfico 4: Expansão Volumétrica Geral das Blendas

Fonte: Próprio Autor

4.1 Resultados teste de durabilidade

Nos testes de tamboreamento, observou-se que as misturas contendo ligante apresentarem maior resistência à abrasão, especialmente na composição onde foi aplicada temperatura. Essa tendencia é corroborada por estudos, que indicam melhor desempenho mecânico em briquetes de resíduos vegetais urbanos quando combinados com ligantes. (Abdel Aal *et. al.*, 2023).

Figura 7: Briquetes pós teste de durabilidade



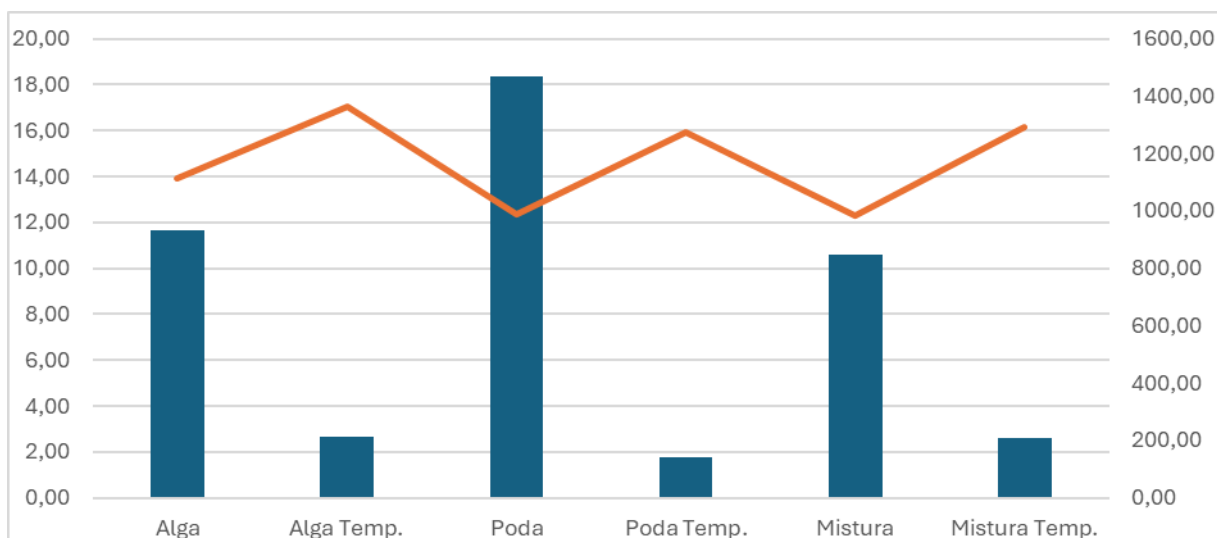
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3: Durabilidade sem e com Temperatura

BLENDA	DURABILIDADE SEM TEMPERATURA (%)	DURABILIDADE COM TEMPERATURA (%)
100% ALGA	98,73	99,7252
100% PODA DE ÁRVORE	74,7853	99,6432
(45%A+45%P+10%PET)	84,4833	99,6448

Fonte: Próprio Autor

A expansão volumétrica foi mais acentuada nas misturas 100% naturais, onde se destaca a de Alga (*Egeria Densa*), possivelmente devido à maior quantidade de umidade retida inicialmente. Essa observação está alinhada com os resultados da referência bibliográfica, que destaca a importância da secagem adequada na estabilidade dimensional dos briquetes. (Santos *et. al.*, 2020).

Gráfico 5: Variação Volumétrica por Densidade Aparente

Fonte: Próprio Autor

Conforme apresentado anteriormente nesta seção, o tratamento adequado reduz a umidade e contribui para a estabilidade da expansão volumétrica, como observado no gráfico.

Observa-se que a variação volumétrica nos briquetes submetidos ao tratamento térmico foi significativamente menor em comparação aqueles produzidos sem controle de temperatura. Esse resultado evidencia o efeito positivo da secagem na estabilidade dimensional dos briquetes, uma vez que o calor auxilia na evaporação da umidade residual e na ativação da lignina presente na biomassa. A lignina, ao amolecer com o calor, atua como um ligante natural, promovendo maior coesão entre as partículas e reduzindo a tendência à expansão após a prensagem. Com isso, obtém-se um produto mais estável, denso e mecanicamente resistente.

Além disso, a presença de Resíduo Sólido Urbano (RSU), especialmente contendo frações de PET, também contribuiu para o bom desempenho das formulações. Durante o aquecimento, o PET sofre amolecimento e atua como um ligante adicional, favorecendo a união entre as partículas e aumentando a densidade do briquete. Essa fusão parcial do material plástico melhora a integridade estrutural dos briquetes e reforça sua resistência à expansão, tornando a blenda mais estável após prensagem.

Usando de exemplo a poda de árvore sem temperatura, onde a variação volumétrica é mais alta, e a densidade aparente se apresenta bem mais baixa, o oposto também é comprovado; Estes comportamentos se correlacionam com uma menor possibilidade de que o material se desintegre, apresentando um melhor desempenho mecânico.

A mistura dos três materiais, principalmente com temperatura, mostra-se mais equilibrada com sua densidade aparente alta e uma variação volumétrica baixa. Isso reforça a eficiência da composição com ligantes, onde os diferentes tipos de biomassas proporcionam maior estabilidade e eficiência energética.

Diante dos resultados, confirma-se que a secagem adequada, junto ao uso combinado de diferentes resíduos (blendagens), se mostra uma estratégia eficaz para reduzir a variação volumétrica dos briquetes, aumentar a densidade e em consequência seu valor energético, além de promover a viabilidade de uso técnico desses resíduos como biocombustíveis sólidos.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal a caracterização mecânica de briquetes produzidos a partir da combinação das biomassas: Alga (*Egeria Densa*), Poda de árvore e Resíduo Sólido Urbano (RSU), com ênfase em propriedades como densidade aparente, variação volumétrica e resistência física. Não foram abordados testes de natureza química, reforçando o foco exclusivamente nas propriedades físicas e estruturais dos materiais.

Os resultados demonstraram que a adição equilibrada de diferentes resíduos, juntamente com a aplicação de temperatura apenas durante o processo de briquetagem, contribui significativamente para a melhoria da estabilidade volumétrica e da densidade aparente dos briquetes. Conforme observado nos ensaios e representado graficamente, as formulações submetidas à briquetagem com controle térmico apresentam menor expansão e maior coesão estrutural, validando a viabilidade técnica das blends como alternativas eficientes para produção de biocombustíveis sólidos.

A utilização desses resíduos específicos, todos disponíveis na cidade de Rosana, representa uma solução prática e estratégica. A Alga (*Egeria Densa*), frequentemente removida durante a limpeza dos flutuantes presentes na praia local, e os resíduos de poda urbana, abundantes em cidades arborizadas, podem ser reaproveitados de forma inteligente e sustentável. A combinação com Resíduo Sólido Urbano (RSU), sob metodologia adequada de prensagem e controle de umidade, resultou em briquetes com características mecânicas satisfatórias.

Esse reaproveitamento direcionado de resíduos, além de minimizar impactos ambientais associados ao descarte inadequado, pode contribuir para o fortalecimento da matriz energética renovável local, e para a criação de oportunidades de desenvolvimento sustentável no município.

Trabalhos futuros podem expandir os estudos para incluir análises térmicas detalhadas, avaliação de emissões atmosféricas durante a queima e análise de viabilidade econômica, ampliando o escopo da proposta e reforçando sua aplicabilidade em escala industrial.

REFERÊNCIAS

- ABDEL AAL, A. M. K. et al. Durability and combustion performance of *Ficus nitida* pruning residues briquettes. *Sustainability*, v. 15, n. 8, p. 6306, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086306>.
- ÁLVAREZ, X. et al. Carbonização hidrotérmica e produção de pellets de *Egeria densa*, revelando adequação da técnica para biomassa aquática. *SciELO Brasil*, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2003** — Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AZEVEDO, C. G. et al. Estudo cinético e termodinâmico da degradação térmica de *Egeria densa*, destacando seu potencial energético de 13,4 MJ/kg. *Bioresource Technology*, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- AZEVEDO, C. G. et al. The invasive *Egeria densa* macrophyte and its potential as a new renewable energy source. *Science of the Total Environment*, v. 856, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159058>.
- BARIS, D. et al. Improvement of thermal processes for using residues from bioethanol and sugar production in Brazil: experiments and proposed optimization measures. *Journal of Energy*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2420439>.
- BORGES, A. C. P. Caracterização energética do cavaco de *Eucalyptus grandis* "in natura" e torrefeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- BORGES, A. C. P. Caracterização energética do cavaco de *Eucalyptus grandis* "in natura" e torrefeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- FELFLI, F. F. et al. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, n. 1, p. 236–242, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.08.010>.
- FERNANDES, A. P. M. et al. Análise de propriedades térmicas de briquetes agrícolas por termogravimetria. *Biomassa & Energia*, v. 12, n. 2, p. 87–94, 2021.
- FURTADO, T. S. et al. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 30, n. 62, p. 101–106, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.62.101>.
- GARCÍA, R. et al. Briquettes from municipal solid waste – energetic and environmental

- evaluation. *Renewable Energy*, v. 103, p. 404–414, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.051>.
- HENRIQUE, G. et al. Biomass as sustainable energy in Brazil. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 29, n. 2, p. 6–13, 2017.
- IBITOYE, S. E. et al. Densificação de resíduos agrícolas para geração de energia sustentável: uma visão geral. *Bioresource and Bioprocessing*, v. 8, n. 75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w>.
- JUNIOR, C. R. S. et al. Estudo sobre briquetes de biomassa lignocelulósica e seu rendimento energético. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, n. 88, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- KUMAR, A. et al. Production and characterization of biomass briquettes from invasive aquatic macrophyte water lotus and molasses. *Energy Reports*, v. 6, p. 186–192, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.112>.
- MARREIRO, H. M. P. et al. Empirical studies on biomass briquette production: a literature review. *Energies*, v. 14, n. 17, p. 5602, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14175602>.
- MIRANDA, R. L. de; MARTINS, E. M.; LOPES, K. A potencialidade energética da biomassa no Brasil. *Desenvolvimento Socioeconômico em Debate*, v. 5, n. 1, p. 94–102, 2019.
- OBI, O. F. et al. A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Energies*, v. 15, n. 7, p. 2426, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15072426>.
- PEREIRA, D. T. et al. Avaliação físico-química e energética de briquetes de resíduos lignocelulósicos urbanos. *Revista Energia na Agricultura*, v. 35, n. 2, p. 210–219, 2020.
- RENDEIRO, G. et al. *Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia*. Manaus: INPA, 2008.
- SANTOS, M. A. et al. Influência de ligantes na resistência de briquetes de biomassa residual. *Revista Brasileira de Energia*, v. 26, n. 1, p. 32–40, 2020.
- SILVA, C. F.; LIMA, D. C. Compactação de biomassa de poda urbana e resíduos sólidos urbanos: análise físico-mecânica e energética. *Revista Engenharia e Sustentabilidade*, v. 9, n. 2, p. 65–74, 2020.
- SILVA, D. P. Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvores visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-09112016-141125/publico/DissertacaoDafneSilvaVF.pdf> Acesso em: 17 jun. 2025.
- SOUZA, F.; VALE, A. T. do. Energy density of lignocellulosic biomass briquettes and

its relationship with briquetting parameters. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, n. 88, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879>.