ENGINEERING & TECHNOLOGY SCIENTIFIC JOURNAL

ORIGINAL

2023, VOL. 01, N°. 01, e023005
DOI: 10.55977/etsjournal.v01i01.e023005

Combustível Sólido de Resíduos Silvo-Sucroacooleiro

Gabrielli Viana Magalhães [1], Gustavo Manfredini Cerqueira [1], Lucas Brito Ferreira [1], Muriel Ramos de Oliveira[1], Nanci Keiko Matsumoto [1], Carlos Toshiyuki Hiranobe [1], Felipe Gomes Machado Cardoso [1], Andrea Cressoni de Conti [1]

[1] Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC), Departamento de Engenharia - Campus de Rosana. Rosana, 19274-000, São Paulo, Brasil.

Received 2022-12-29
Revised 2023-05-13
Accepted 2023-06-26
Published 2023-10-10

***Corresponding author**
Andrea C. De Conti
andrea@rosana.unesp.br

***ORCID**
0000-0002-5433-3295

Page e-location ID
e023005

Distributed under
CC BY-NC 4.0

Copyright: Authors
OPEN ACCESS

RESUMO

A preocupação com a atual matriz energética do mundo provocou muitos países a buscarem formas mais sustentáveis de produzir energia, uma dessas forma é através da utilização da biomassa proveniente de resíduos urbanos e agrícolas. Através da briquetagem, há uma maneira de transformar os resíduos, que não seriam reutilizados nem descartados de forma correta, em briquetes que é um biocombustível sólido e compactado. Nesta pesquisa, os briquetes foram feitos em laboratório utilizando misturas de Pinus sp. e bagaço de cana de açúcar. Com um total de sete tratamentos, T_1 (100% Bagaço), T_2 (25% Pinus + 75% Bagaço), T_3 (75% Pinus + 25% Bagaço), T_4 (100% Pinus), enquanto que "T_5", "T6" e "T_7" foram feitos com uma proporção de 50% Pinus e 50% Bagaço, todos os tratamentos têm uma granulometria de 10 mesh. O objetivo do presente projeto foi analisar a resistência mecânica das misturas. Os briquetes foram produzidos com uma máquina de briquetagem manual com uma pressão de 15 toneladas. T_5 é a mistura com queima mais rápida devido a seu alto conteúdo volátil e baixo conteúdo de carbono fixo, enquanto T_2 tem o maior tratamento de carbono fixo. O T_1 (bagaço puro) foi visto como o briquete com maior taxa de umidade, enquanto o meio bagaço meio pinus sp. apresentou o menor teor de umidade, embora os briquetes à base de pinus cresçam e resistam mais ao impacto do que os à base de bagaço. No entanto, a taxa do PCS foi maior em T_4 (100% Pinus sp.). Concluiu-se que o pinus, é um bom material para produzir briquetes, afinal, suas características como PCS elevado e pequeno teor de cinzas é importante para gerar energia.

Palavras-Chave Densificação Energética; Briquetagem; Pinus sp; Sucroalcooleiro.

How to cite this article (APA): Viana Magalhães, G.., Manfredini Cerqueira, G.., Brito Ferreira, L.., Ramos de Oliveira, M.., Keiko Matsumoto, N.., Toshiyuki Hiranobe, C.., Gomes Machado Cardoso, F.., & Cressoni De Conti, A. Combustível Sólido de Resíduos Silvo-Sucroacooleiro. *Engineering & Technology Scientific Journal, 01(01)*, e023005.

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento do consumo em países em desenvolvimento vem mostrando grandes problemas ambientais, sendo um deles, a grande quantidade de resíduos urbanos produzidos e que não são tratados e descartados adequadamente, além disso outro problema que preocupa os cientistas é a alta emissão de gases oriundos de fontes não renováveis como petróleo, carvão que representam a maior parte da matriz energética mundial.

O Brasil possui uma grande disponibilidade de resíduos de biomassa florestal e agrícola, que podem ser nocivos para o meio ambiente, poluindo rios e o ar, com a queima inadequada de alguns resíduos, como por exemplo a palha de cana-de-açúcar, que os agricultores queimam a fim de eliminar esse resíduo, por não ser vantajoso para a indústria do açúcar e do álcool (Silva et al., 2017)

Uma alternativa para resolução desses problemas é a utilização de fontes renováveis que não geram quantidades significativas de emissão de gases podendo ser usada de forma sustentável (Goldemberg & Lucon, 2007).

Uma dessas fontes renováveis em questão é a biomassa que pode ser entendida como qualquer matéria orgânica sendo classificada em diferentes tipos de como: florestais, agrícolas, animais, industriais e urbanos. Porém um desafio a ser superado são as propriedades desses resíduos não serem inicialmente boas para o aproveitamento energético, devido ao fato de não possuírem um bom poder de queima e possuírem um alto teor de umidade. Dessa forma é necessário que esses resíduos passem por um processo que otimiza suas propriedades e potencial com intuito de terem um aproveitamento energético considerável, uma dessas alternativas é passar por um processo chamado de densificação energética (Paulo et al., 2019).

A densificação energética de biomassa consiste em aplicar uma determinada força mecânica, com ou sem ligante, onde transforma os resíduos em um produto compacto e sólido (Paulo et al., 2019). Uma das vantagens da densificação energética, são os melhores valores de densidade energética proporcionando assim, maior concentração de energia, consequentemente aumentando seu potencial energético e melhor forma para armazenagem dos briquetes e pellets. As principais características a serem analisadas para assim os briquetes serem viáveis para fabricação, são: poder calorífico superior (PCS), densidade, e resistência mecânica (Standard, 2011).

Com isso, o objetivo do trabalho realizado, foi analisar o potencial energético de mistura de pinus sp. e bagaço de cana-de-açúcar bem como a resistência mecânica dos briquetes confeccionados a partir dessa mistura.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As análises e os testes realizados no projeto, foram executados no laboratório de Densificação Energética BioJoule – Unesp/Campus de Rosana.

How to cite this article (APA): Viana Magalhães, G.., Manfredini Cerqueira, G.., Brito Ferreira, L.., Ramos de Oliveira, M.., Keiko Matsumoto, N.., Toshiyuki Hiranobe, C.., Gomes Machado Cardoso, F.., & Cressoni De Conti, A. Combustível Sólido de Resíduos Silvo-Sucroacooleiro. Engineering & Technology Scientific Journal, 01(01), e023005.

2.1. Materiais

Os resíduos de Pinus sp. foram coletados de uma serraria localizada na cidade de São Manuel - SP e os resíduos sucroalcooleiros (bagaço de cana-de-açúcar) foram coletados de empresa Sucroalcooleira localizada na região de Teodoro Sampaio - SP, os resíduos foram armazenados em sacos plásticos. Esses resíduos foram moídos e secos até que todos ficassem com um teor de umidade entre 10% e 15%, que foi verificado em uma balança determinadora de umidade (OHAUS, modelo MB27), constando que a madeira precisou realizar um processo de umidificação e uma nova verificação por apresentar inicialmente uma porcentagem abaixo do desejado. A secagem dos resíduos sucroalcooleiros foi realizada através da exposição do material ao sol, e o processo de umidificação dos resíduos madeireiros foi realizada através de borrifadas de água no material de forma homogênea. A moagem foi executada em um moinho de facas. As **Figs. 1** e **2** mostram os materiais moídos.



Figura 1. Saco com Pinus sp. moído.



Figura 2. Saco com bagaço de cana-de-açúcar moído.

2.2. Produção dos Briquetes

Para a produção dos briquetes foi utilizada a briquetadeira hidráulica manual com capacidade de até 30 ton.F. Foram confeccionados 2 briquetes de cada blenda como é apresentada na **Tab. 1**, utilizando 50 g do material, pressão de compactação de 15

t, tempo de compactação de 1 min. Nas **Figs. 3** e **4**, podemos observar um briquete da blenda 1 e um da blenda 4, respectivamente



Figura 3. Briquetes pós-prensagem, vista aérea.



Figura 4. Briquetes pós prensagem, vista horizontal.

Os briquetes foram armazenados em sacos plásticos lacrados, a fim de evitar a entrada de ar e de umidade.

Tabela 1. Blendas dos briquetes

Blendas	Porcentagem dos resíduos
1	100% Bagaço de cana-de-açúcar
2	25% Pinus sp. + 75% Bagaço de cana-de-açúcar
3	75% Pinus sp. + 25% Bagaço de cana-de-açúcar
4	100% Pinus sp.
5	50% Pinus sp. + 50% Bagaço de cana-de-açúcar
6	50% Pinus sp. + 50% Bagaço de cana-de-açúcar
7	50% Pinus sp. + 50% Bagaço de cana-de-açúcar

2.3. Caracterização dos materiais

Para a caracterização das blendas foram realizados os testes de análise imediata e o cálculo de PCS (Poder Calorífico Superior).

2.4. Análise Química Imediata

A análise química imediata foi realizada seguindo a norma ASTM, portanto a determinação do teor de umidade foi realizada seguindo a ASTM D-3173 (Standard, 2011), teor de cinzas ASTM D-3174 (Standard, 2011), teor de voláteis ASTM D-3175 (Standard, 2011) e o cálculo do teor de carbono fixo foi feito usando a **Equação (1)**.

$$TCF = 1 - TV - TC \qquad \textbf{Eq. (1)}$$

Na qual TCF é o teor de carbono fixo, TV é o teor de voláteis e TC é o teor de cinzas.

2.5. Teste de Resistência Física e Expansão Volumétrica

Após a matéria orgânica ser prensada o material tenta reassumir sua forma original, além do efeito de moléculas como a da lignina que não são comprimidas facilmente e absorvem facilmente umidade, dessa forma elas aumentam e fazem com que o briquete cresça (Silva et al., 2017) . Setenta e duas horas depois da compressão e evitando o contato com a umidade o volume estabiliza.

Com o auxílio de um paquímetro digital os briquetes tiveram suas larguras e alturas medidos em horários específicos, eles foram: momento instantâneo a pós briquetagem, uma hora após, três horas após, 5 horas, 7 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas, esse período foi dividido de forma a contemplar as maiores mudanças que ocorrem nas primeiras vinte e quatro horas, e, também um intervalo mais estável, mas que ainda sofre mudanças significativas.

O teste de queda seguiu uma adaptação do processo indicado por (Richards, 1990), cada tratamento teve separado um de seus briquetes, os quais passaram pela expansão volumétrica e alcançaram a estabilidade volumétrica, e preparado o ambiente de queda, espaço aberto e com chão de concreto, sem cerâmica ou outra cobertura que absorveria o impacto, próximo a uma parede com a ajuda de uma trena é estabelecido uma diferença de altura de 2 metros em relação ao chão e lá é colocado um marcador para marcar um ponto comum de onde os briquetes foram soltos.

Os briquetes então são soltos um a um, caindo contra o chão de concreto, cada queda é anotada e os briquetes tem sua integridade física avaliada em busca de rupturas, caso a queda tenha quebrado o briquete de forma que separou pedaços dele e não apenas esfarela sua superfície, o teste acaba, os pedaços são contados e uma equação é feita para descobrir o IRI (Índice de Resistência ao Impacto), **Equação (2)**.

$$IRI = 100\ x\ \frac{Número\ de\ quedas}{Número\ de\ pedaços} \qquad \text{Eq. (2)}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise Imediata

Na Tab. 2 é apresentado os resultados da análise imediata realizada nos materiais utilizados para confecção dos briquetes.

Tabela 2. Resultados da análise imediata dos materiais

Materiais	Teor de voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono fixo (%)	Teor de Umidade (%)
100%Bagaço de cana	85,12 ± 0,20	3,17 ± 0,21	11,7 ± 0,02	12,19
25% Pinus e 75% Bagaço	79,51 ± 3,82	4,49 ± 1,89	16 ± 4,08	11,08
75% Pinus e 25% Bagaço	84,59 ± 0,21	1,25 ± 0,15	14,16 ± 0,11	12,17
100% Pinus	84,62 ± 0,41	0,52 ± 0,02	14,86 ± 0,42	9,73
50% Pinus e 50% Bagaço	86,58 ± 0,53	1,51 ± 0,25	11,92 ± 0,58	9,83

Comparando os resultados com os dados da literatura é possível afirmar que os resultados do teor de umidade, teor voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo estão de acordo como o esperado, sendo recomendado pela literatura para ser considerado um bom briquete são recomendados terem o teor de voláteis entre 75% - 85%, teor de umidade entre 10 - 12% e carbono fixo entre 14% - 25% (Chrisostomo, 2011).

Pode-se concluir que o tratamento que terá a queima mais rapidamente será o tratamento 5 com a mistura de 50% Pinus e 50% Bagaço que possui 86,58% de teor de voláteis, outro fator que contribui para sua baixa duração é seu baixo teor de carbono fixo que consequentemente fará com que esse briquete queime mais rápido, desse modo não terá uma longa duração comparado com os outros tratamentos.

O maior teor de carbono fixo encontrado foi no tratamento 2 com a mistura de 25% Pinus e 75% bagaço de cana, esse tratamento teve o maior teor de carbono fixo devido o bagaço possuir uma alta resistência à decomposição térmica devido suas propriedades de ligninas que fazem com que haja essa resistência. Teoria defendida por (Otávio Brito & Ernesto Barrichelo, 1977), onde a queima de um material lignocelulósico rico em lignina produz um briquete com alto teor de carbono fixo, desse modo os tratamentos com maiores proporções de bagaço de cana ou outros materiais ricos em lignina terão alto teor de carbono fixo. Uma das vantagens do briquete possuir um alto teor de carbono fixo é a longa duração de queima desse briquete fazendo com que dure mais sua queima em relação aos outros tratamentos (CHRISOSTOMO, 2011).

O maior teor de umidade encontrado foi no tratamento com material puro de bagaço de cana-de-açúcar com 12% de umidade, isso se deve ao fato do bagaço

ser mais úmido em relação ao pinus devido às suas propriedades absorverem mais água, porém esse fator é equilibrado na mistura 50% Bagaço e 50% Pinus onde mostrou o teor de umidade mais baixo comparado com os outros tratamentos.

Em relação ao teor de extrativos (**Tab. 3**), o maior entre os tratamentos foi do material puro de bagaço de cana-de-açúcar, isso ocorreu devido ao alto teor de açúcares presente no bagaço, fator que contribui negativamente para o poder calorífico superior (PCS) fazendo com que seu índice de PCS seja baixo.

Tabela 3. Resultados da análise imediata (Teor de Extrativos).

Materiais	Extrativos (TEC%)
100% Bagaço de cana	3,04
25% Pinus e 75% Bagaço	2,89
75% Pinus e 25% Bagaço	2,52
100% Pinus	2,91
50% Pinus e 50% Bagaço	2,93

Foi verificado que a blenda de 100% bagaço apresentou maior teor de extrativos em comparação às misturas de bagaço com pinus sp. Assim dentro dos resultados esperados. O teor do extrativo, além de contribuir para o aumento do poder calorífico da biomassa, também é um componente que contribui para a adesão das partículas em altas temperaturas (Nakashima et al., 2017).

3.2. Poder Calorífico Superior

Analisando a **Tab. 4**, observa-se que o tratamento que teve maior poder calorífico nos testes realizados foi o material bruto de pinus (100% P), isso significa o quanto de energia será liberada durante a combustão. O que torna esse material um grande candidato para confecção de briquetes, visto que para ser um eficiente briquete uma das condições necessárias, seja que o poder calorífico do material tenha um alto índice.

Além disso é possível analisar os tratamentos com as misturas de bagaço e pinus, quando analisado os tratamentos com material em maior proporção com bagaço, menor é seu poder calorífico, quando analisado os tratamentos onde o pinus está em maior proporção maior é o poder calorífico do material, concluindo que o pinus influencia diretamente na qualidade de queima do briquete. Com isso concluímos que a mistura com maior poder calorífico (PCS) é a blenda de 75% pinus e 25% bagaço.

Tabela 4. Resultados do poder calorífico superior (pcs) para cada tratamento

	PCS(MJ/kg) - Bagaço (B) e Pinus(P)					
	100% B	95% B e 5% P	75% B e 25% P	50% B e 50% P	25%B e 75%P	100% P
A	18,025	16,759	16,915	18,237	18,401	19,975
B	17,68	15,256	16,947	18,706	18,236	20,95
C	17,95	16,309	16,896	18,114	18,876	18,897

3.3. Expansão volumétrica

Pode-se verificar na **Tab. 5** de expansão volumétrica, que os briquetes feitos de pinus sp. sofreram maior expansão em comparação a aqueles feitos de bagaço de cana-de-açúcar. Isso se deve ao fato de que algumas de suas estruturas como celulose, lignina e hemicelulose tem resistência compressão, e absorvem umidade facilmente, características que levam ao aumento do volume, isso também é descrito por (Silva et al., 2017).

Tabela 5. Expansão volumétrica

Material	Volume Final (cm^3)
100% Bagaço de cana	61,99
25%pinus e 75% B	63,02
75% Pinus e 25% B	58,69
100% Pinus	55,81
50% Pinus e 50% B	61,96

Para os tratamentos mistos foi notado mais uma característica descrita em (Yamaji et al., 2013), o bagaço de cana tem uma sensibilidade maior e menor integridade física. Briquetes feitos com 25% pinus sp. e 75% bagaço (tratamento 2) tiveram a maior expansão, enquanto aqueles com 25% bagaço e 75% pinus sp. (tratamento 3) tiveram a segunda maior expansão, tal fato decorre da união entre um material altamente absorvente (pinus sp.) (Silva et al., 2017), com um material com baixa integridade e adesão física (Yamaji et al., 2013).

Ainda foram preparados briquetes com proporção 1:1, eles tiveram uma expansão média maior do que o tratamento 1, e menor que os do tratamento 2, 3 e 4. A proporção encontrou certo equilíbrio entre a desintegração e a expansão volumétrica, o tratamento misto se expandiu mais que o briquete de puro bagaço-de-cana-de-açúcar, porém não teve a degradação que o mesmo sofreu, ou seja, a mistura de pinus sp. com o bagaço foi positiva para a manutenção da integridade física, isso é visto nas **Figs. 5** e **6**.



Figura 5. Comparação de desintegração entre um briquete 100% bagaço (esquerda) e um 50% bagaço 50% pinus sp. (direita).



Figura 6. Comparação de desintegração entre um briquete 100% pinus sp. (direita) e um 50% bagaço 50% pinus sp. (esquerda).

Note que quanto mais bagaço tem o briquete, mais ele cresce e mais ele se desintegra, enquanto o briquete de puro pinus sp. permanece mais compacto e menos desgastado, mesmo que todos os tratamentos tenham a mesma massa de 50 gramas.

3.4. Teste de resistência ao impacto

Como indicado em (Richards, 1990), o menor valor aceitável para o IRI é 50, maiores IRI demonstram maior resistência física a impactos, logo são briquetes com melhor adesão e que durante o transporte sofreram menos danos.

Os resultados do teste (**Tab. 6**) condizem com o foi indicado anteriormente. Pinus é um material coeso e resistente, bagaço sofre muita desintegração, ao misturá-los igualmente um valor médio é encontrado, e o briquete com maior resistência é aquele que tem 75% pinus sp. e 25% bagaço, o pinus une e mantém a integridade do briquete, enquanto o bagaço ajuda a diminuir a tensão sobre uma de suas superfícies com o crescimento provocado por ele, afinal, aumentar a área diminui a pressão sobre cada ponto do briquete.

Tabela 6. IRI de cada tratamento

Material	Quedas	Pedaços	IRI
100% Bagaço de cana	1	2	50
25%pinus e 75% B	1	2	50
75% Pinus e 25% B	3	2	150
100% Pinus	2	2	100
50% Pinus e 50% B	2	2	100

4. CONCLUSÃO

Podemos concluir que a presença de pinus na composição das blendas é vantajosa para a produção de combustível sólido (briquetes), já que os briquetes com mais porcentagem de pinus na sua composição apresentaram um PCS maior em relação à blenda composta 100% de bagaço de cana-de-açúcar, tendo assim um melhor rendimento energético. A blenda composta de 100%, 75% e 50% de pinus também apresentaram um teor de cinzas duas vezes menor do que a blenda composta 100% de bagaço de cana-de-açúcar. Todos os briquetes apresentaram bons teores de carbono fixo e teores de voláteis, não havendo grandes variações.

Concluiu-se então que a madeira agregou aspectos positivos à composição dos briquetes. Analisando os resultados, todas blendas estudadas apresentam um potencial de aproveitamento energético, realizando o processo de briquetagem para aumentar ainda mais o potencial do combustível.

5. INFORMAÇÃO DO AUTOR

Andrea Cressoni De Conti
Corresponding author. E-mail address: andrea@rosana.unesp.br

REFERÊNCIAS

A. da Silva, D., L. da Róz, A., A. F. Pires, A., M. de Carvalho, A., T. Nakashima, G., A. de Pádua, F., & M. Yamaji, F. (2017). The Influence of Moisture on the Mechanical Properties of Briquettes Made Out of Wood Residues (Eucalyptus sp. and Pinus sp.). *Revista Virtual de Química*, *9*(3), 1078–1086. https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170065

Chrisostomo, W. (2011). *Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido*. Universidade Federal de São Carlos.

Goldemberg, J., & Lucon, O. (2007). *Energias renováveis: um futuro sustentável*. http://www.fuelfromthewind.com/pollution_&_stats.htm

Otávio Brito, J., & Ernesto Barrichelo, L. G. (1977). *Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: i. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto*.

Paulo, M., Granado, P., Rossi, G. G., & De Conti, A. C. (2019). Densificação de biomassa: produção de briquetes a partir da poda de grama biomass densification: briquettes production from grass trimming densificación de biomasa: producción de briquete a partir de poda de gramo. *Revista Hipótese*, *1*, 133–145.

Richards, S. R. (1990). Physical testing of fuel briquettes. *Fuel Processing Technology*, *25*(2), 89–100. https://doi.org/10.1016/0378-3820(90)90098-D

Standard, A. S. T. M. (2011). *Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*.

T. Nakashima, G., C. S. Adhman, I., L. S. Hansted, A., B. Belini, G., R. Waldman, W., & M. Yamaji, F. (2017). Lignocellulosic Materials: Characterization and Production of Briquettes. *Revista Virtual de Química*, *9*(1), 150–162. https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170012

Yamaji, F. M., Vendrasco, L., Chrisostomo, W., & Flores, W. D. P. (2013). Análise do comportamento higroscópico de briquetes. *Energia na agricultura*, *28*(1), 11. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p11-15