

Caracterização de briquetes sob o efeito da adição de carbonáceos

Thamirys Fernanda Souza¹; Darci Eckert Junior¹; Sergio Renato da Silva Soares¹; Leonardo Resende¹; Luana Góes Soares da Silva²; Marcelo Mendes Vieira¹

¹ Universidade Federal de Rondonópolis(UFR), Mato Grosso-MT, Brasil;
²Universidade Feevale-Câmpus II, Rio grade do Sul-RS, Brasil.

Resumo: O principal objetivo desse trabalho é propor um método alternativo para a produção de compactos de madeira (briquetes) com elevado potencial energético. Partículas de madeira angico tipo *Anadenanthera macrocarpa*, foram compactas sem o uso de ligantes e temperatura em pressões de até 300 MPa. Posteriormente os briquetes obtidos foram imersos em solução aquosa enriquecida com 63% de sólidos carbonáceos até saturação de suas microestruturas porosas e finalmente submetidos a tratamento térmico na estufa até a total retirada de água de suas microestruturas. Os briquetes produzidos foram caracterizados via medidas de densidade a granel e energética, análise imediata e determinação do poder calorífico superior e inferior. Briquetes integros foram obtidos com valores de densidade energética de até 11969 MJ/m³.

Palavras-chave: Densidade energética, Briquetes, Sólidos carbonáceos, Ligantes.

Characterization of briquettes under the effect of carbonaceous addition.

Abstract:The main objective of this work is to propose an alternative method for the production of wood compacts (briquettes) with high energy potential. Angico wood particles, type *Anadenanthera macrocarpa*, were compacted without the use of binders and temperature at pressures of up to 300 MPa. Subsequently, the briquettes obtained were immersed in an aqueous solution enriched with 63% carbonaceous solids until their porous microstructures were saturated and finally subjected to heat treatment in the oven until the water was completely removed from their microstructures. The briquettes produced were characterized via bulk and energy density measurements, immediate analysis and determination of the upper and lower calorific value. Integrity briquettes were obtained with energy density values of up to 11969 MJ/m³.

Keywords: Energy density, Briquettes, Carbonaceous solids, Binders.

1. INTRODUÇÃO

Dinesha *et al.* (2019), Saccol (2020) e Franco (2022), nos informam que está previsto ocorrer um aumento significativo do mercado de briquetes na Europa. Ainda que ela no momento esteja na liderança do mercado global desta biomassa, o Brasil por ser o segundo país do mundo com maior extensão florestal, apresenta-se como um produtor em potencial destes materiais. Logo um forte concorrente ao fornecimento de briquetes ao mercado brasileiro e global. De

acordo Alves *et al.* (2019), entre 2021 e 2022, cerca de 779,6 milhões de toneladas de resíduos agrícolas foram gerados no Brasil. Isso se convertido em energia corresponderia aproximadamente à 12,1 milhões de PJ (10^{15} Joules). Atualmente, já se tem um mercado considerável, mas ainda não atendendo plenamente em especial, às necessidades industriais brasileiras.

Segundo Almeida *et al.* (2015), Saccol *et al.* (2020), Sena *et al.* (2021), Marreiros *et al.* (2021) e Obi *et al.* (2022), a briquetagem através de combinações de temperatura e pressão de compactação é um processo bem conhecido que reaproveita resíduos sólidos para produzir combustíveis com alta densidade energética. Entretanto até quanto conhecemos não existem trabalhos publicados que abordem a produção de briquetes íntegros sem o uso de ligante e temperatura, que apresentem aumento de sua densidade energética em mais de 50%.

Na presente pesquisa resíduos da madeira de angico (*Anadenanthera macrocarpa*) foram compactados em pressões de até 300 MPa. A seguir metade foi imersa numa solução enriquecida com sólidos carbonáceos até a sua saturação. A outra metade não foi imersa. Comparando-se os resultados entre si foi possível identificar nos briquetes saturados um aumento percentual na densidade energética de até 62,33%.

Além disso, do ponto de vista energético, a possibilidade de se enriquecer a microestrutura de qualquer tipo de madeira com carbono via o uso de sólidos carbonáceos, abre um caminho onde não somente ela, mas qualquer outro tipo de biomassa sólida como aquelas apresentadas por Rendeiros e Nogueira (2008), possam também serem enriquecidas. O principal objetivo desse trabalho foi associar de forma exploratória a ação combinada da pressão e presença de sólidos carbonáceos na microestrutura dos briquetes com o comportamento de suas propriedades energéticas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Resíduos particulados da madeira de angico tipo *Anadenanthera macrocarpa* com granulometria igual ou inferior a 0,85 mm (20 mesh), foram utilizados no presente estudo. A compactação sem o uso de ligante em uma massa fixa de 14,5 g de partículas antes da secagem, foi realizada em cinco diferentes pressões, ou seja, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa e 300 MPa. Um total de 100 briquetes, sendo 20 em cada pressão, foram compactados. A seguir 10 briquetes foram imersos até a sua saturação em uma solução líquida enriquecida com 63% de sólidos carbonáceos. Os demais permaneceram somente compactados.

Comentado [L1]: É recomendado que para a escrita de algarismos de 0-9 escrevemos por extenso, de 10 para cima escrevemos o algarismo.

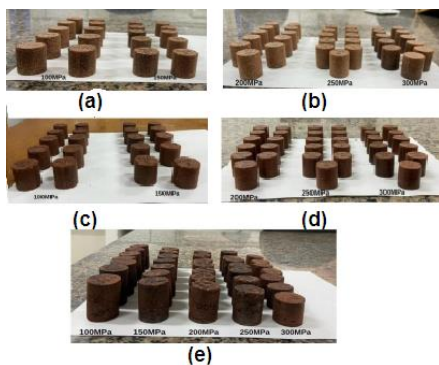
Para realizar a saturação dos briquetes com sólidos carbonáceos, foi necessário retirar primeiro toda a umidade inicial destas biomassas, ou seja, colocá-las na estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. A cada período de tempo as amostras foram pesadas até que, de acordo com a norma técnica NBR 14929 (ABNT, 2003), a diferença entre a medida atual e a anterior não fosse superior 0,5%. Esse mesmo procedimento foi utilizado na análise de secagem das amostras após serem saturadas com a solução líquida (63% de sólidos carbonáceos). A seguir todos os corpos de prova fabricados foram caracterizados via análise imediata, poder calorífico, densidade aparente e densidade energética. A análise imediata foi feita com base na norma ASTM D 1762-84 (ASTM D 1762-84, 2021). Ela consistiu na determinação dos teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo em base seca. O teor de carbono fixo foi calculado de acordo com norma NBR 8112 (ABNT, 1986). Todas as análises foram realizadas em triplicata. O poder calorífico foi estimado segundo a equação de Parikh *et al.* (2005) e a densidade aparente medida de acordo com a norma NBR 6922 (ABNT, 1981), em um recipiente com volume equivalente a uma caixa com dimensões internas de 22,90 x 22,90 x 22,90 mm.

Comentado [L2]: Se a norma utilizada foi a atualizada em 2021, a citação deve ser ela, isto é, com ano 2021. Isso deve ser considerado nas referências também. Verificar também de existe o 84.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 mostra a típica aparência dos compactos produzidos. Nota-se que independentemente de estarem úmidos, secos ou saturados e secos com sólidos carbonáceos, todos se apresentam íntegros. Quando se compara os briquetes sem umidade com aqueles secos e saturados produzidos na mesma pressão, observa-se que ocorreu uma significativa alteração em suas dimensões e provavelmente no aumento de suas massas. A adição da solução aquosa enriquecida com sólidos carbonáceos foi a principal responsável por estas alterações.

Figura 1. Imagem dos briquetes: **a) e b)** úmidos; **c) e d)** secos; **e)** saturados e secos.



Fonte: Autor

Na tabela 1 são apresentados os resultados das massas dos briquetes secos não saturados e secos saturados com sólidos carbonáceos. Os resultados apresentados confirmam o indicativo de alteração de massa discutido anteriormente na figura 1. Comparando os briquetes compactados sob a mesma pressão, nota-se um visível aumento de massa em todos os saturados. Isto se deve a adição das partículas de carbonáceos à estrutura destes materiais, sendo mais significativo naqueles compactados sob a pressão de 100 MPa. Neste caso o acréscimo de massa aos briquetes foi de aproximadamente 55%.

É fundamental, nesse ponto, discutir também os resultados em termos da relação entre o preenchimento dos poros, a sua quantidade e tamanho distribuídos na estrutura destes materiais. A quantidade e tamanho dos poros ou vazios presentes nos briquetes são reduzidos durante a sua compactação sob diferentes pressões. Segundo Soares (2022) a dinâmica de deformação das partículas está associada a redução de seu tamanho e conseqüentemente ao seu rearranjo durante a sua compactação. O preenchimento dos poros nestes materiais dependerá fundamentalmente deste dinâmico rearranjo particulado. Logo, os briquetes de diferentes madeiras produzidos sob a mesma pressão e aqueles de uma mesma madeira, fabricados sob diferentes pressões, apresentarão diferentes tamanhos e quantidade de poros distribuídos em sua microestrutura. No presente trabalho o aumento de massa nos briquetes saturados ou não saturados com carbonáceos, está associado ao preenchimento de seus poros com o pó do resíduo de madeira e/ou sólidos carbonáceos, respectivamente. Os vazios anteriormente ocupados pela umidade passaram a ser ocupados por partículas sólidas. Os poros não preenchidos com o pó de madeira presente nos briquetes compactados em cada pressão, foram preenchidos com sólidos carbonáceos até onde o seu tamanho fosse menor que o poro. Logo a massa total dos briquetes saturados será a soma das massas do pó de madeira e carbonáceos versus os seus percentuais respectivos distribuídos na microestrutura destes materiais.

Tabela 1. Resultados de massa dos briquetes obtidos em diferentes pressões saturados ou não com carbonáceos.

| PRESSÃO (MPa) | MASSA (g) | | |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | Seca não saturada (M_s) | Seca saturada (M_{ss}) | $\Delta M = M_{ss} - M_s$ |
| 100 | 13,0918±0,0486 | 20,2745±0,9667 | 7,1827± 0,9679 |
| 150 | 13,1271±0,0234 | 19,8593±0,8191 | 6,7322± 0,8194 |
| 200 | 13,1499±0,0115 | 18,2171±0,5750 | 5,0671± 0,5711 |

| | | | |
|-----|----------------|----------------|----------------|
| 250 | 13,1358±0,0169 | 19,0259±0,8807 | 5,8901± 0,8809 |
| 300 | 13,1146±0,0392 | 14,9216±0,3070 | 1,807± 0,3095 |

Na tabela 2 são apresentados os resultados da análise imediata dos briquetes sem e com a adição de carbonáceos. Comparando os resultados entre si, observa-se uma considerável redução da umidade naqueles que foram saturados com carbonáceos. Segundo Foelkel (2016), este fato coopera significativamente para o aumento da eficiência energética dos briquetes e é de grande interesse para geração de energia em caldeiras. De acordo com Moreira, Lima e Goulart (2012), quanto menor é o teor de umidade na biomassa, maior o seu poder calorífico, logo maior será a quantidade de energia fornecida pelo combustível, maior será o desempenho da caldeira e menor será o custo para gerar a mesma quantidade de energia.

Outro aspecto interessante é o baixo teor de cinzas medido principalmente nos briquetes saturados com carbonáceos. Todos os teores estão abaixo de 2,5%. Comparativamente a maior redução do teor de cinzas (30,3%), ocorreu com aqueles compactados sob 150 MPa. Este teor abaixo de 4% é recomendável para geração de energia em caldeiras, pois de acordo com Carvalho *et al.* (2021), sob estas condições se minimiza a corrosão, desgaste ou incrustações nos equipamentos e consequentes gastos com manutenção da caldeira.

O aumento da massa dos briquetes previamente discutida nos resultados apresentados na tabela 1 mais a redução de sua umidade e baixo teor de cinzas, indicam a possibilidade de se obter neles um considerável aumento de sua densidade energética.

Tabela 2. Resultados da análise imediata dos briquetes saturados ou não com sólidos carbonáceos.

| BRIQUETES | ANÁLISE IMEDIATA | | | |
|-----------|------------------|-----------|---------|---------------|
| | %Umidade | %Voláteis | %Cinzas | %Carbono fixo |
| AB10CC | 2,5033 | 74,5473 | 0,7435 | 24,7092 |
| AB15CC | 1,9750 | 79,7024 | 0,6561 | 19,6414 |
| AB20CC | 2,5033 | 73,7376 | 1,4201 | 24,8424 |
| AB25CC | 1,8367 | 73,3414 | 1,5313 | 25,1273 |
| AB30CC | 2,1467 | 73,6677 | 1,1301 | 25,2021 |
| AB10SC | 5,3633 | 74,8214 | 0,8107 | 24,3678 |
| AB15SC | 6,5217 | 74,7998 | 1,2625 | 23,9377 |
| AB20SC | 6,0133 | 74,2160 | 1,8101 | 23,9740 |
| AB25SC | 5,9412 | 74,5226 | 1,0544 | 24,4231 |
| AB30SC | 5,8850 | 74,7078 | 1,2665 | 24,0578 |

Obs: Na nomenclatura dos briquetes, o número corresponde a pressão de compactação, CC e SC à briquetes saturados e não saturados com sólidos carbonáceos, respectivamente.

Na tabela 3 são apresentados os valores do poder calorífico, densidade a granel e densidade energética dos briquetes produzidos. Como pode ser visto, os briquetes

saturados têm densidade a granel superior aos não saturados, mesmo quando produzidos sob a mesma pressão. Como o tamanho de partículas usadas para se medir a densidade a granel foi entre 60 e 100 mesh, é provável que os carbonáceos tenham influenciado significativamente no aumento da quantidade de partículas menores (100 mesh). Logo, aumentado os valores de densidade a granel nos briquetes saturados.

A tabela 3 apresenta também os valores das propriedades energéticas obtidas para as amostras compactadas, sem e com a adição de sólidos carbonáceos. Nota-se que o aumento de massa influenciou significativamente no aumento da densidade energética destes materiais. Independente se o percentual de massa dos particulados de madeira e/ou carbonáceos adicionados à microestrutura dos briquetes fosse ou não diferente, a soma total deles foi a principal responsável pelo aumento da densidade energética destes materiais. O estudo mostra que os maiores valores de densidade energética obtidos foram entre 10343 MJ/m³ e 11969 MJ/m³ para os briquetes compactados entre 100 MPa e 200 MPa. Quando comparados com os resultados de Soares (2023), obtidos para madeira de angico (*Anadenanthera macrocarpa*), nota-se um aumento desta propriedade em até 54%.

Tabela 3. Resultados das propriedades energéticas dos briquetes.

| Amostras | PCS (MJ/Kg) | PCI (MJ/Kg) | Densidade a granel (Kg/m ³) | Densidade energética (MJ/m ³) | |
|----------|-------------|-------------|---|---|-----------|
| | | | | PCS | PCI |
| AB10CC | 20,5844 | 17,3498 | 502,4556 | 10342,746 | 8717,5031 |
| AB15CC | 19,6128 | 16,3782 | 592,7766 | 11625,994 | 9708,5985 |
| AB20CC | 20,4975 | 17,2629 | 583,9550 | 11969,596 | 10080,735 |
| AB25CC | 20,5344 | 17,2998 | 573,2314 | 11770,938 | 9916,7640 |
| AB30CC | 20,4480 | 17,2133 | 438,2353 | 8961,0363 | 7543,4765 |
| AB10SC | 20,5067 | 17,2721 | 438,2353 | 8986,7825 | 7569,2664 |
| AB15SC | 20,3477 | 17,1131 | 463,7019 | 9435,2617 | 7935,3714 |
| AB20SC | 20,2634 | 17,0288 | 368,1953 | 7460,8966 | 6269,9319 |
| AB25SC | 20,3044 | 17,0700 | 410,6514 | 8338,0306 | 7009,8197 |
| AB30SC | 20,2019 | 16,9673 | 403,3367 | 8148,1670 | 6843,5342 |

Obs: O número corresponde a pressão de compactação dos briquetes, CC e SC à briquetes saturados e não saturados respectivamente com sólidos carbonáceos.

Comentado [L3]: Mesma observação da tabela 2.

4. CONCLUSÃO

O efeito combinado da pressão e saturação de sólidos carbonáceos na estrutura dos briquetes foi eficiente para o aumento da densidade energética nestes materiais, principalmente naqueles compactados sob a pressão de 200 MPa. Neste caso, ao comparar os briquetes não saturados com saturados, nota-se que o valor de densidade energética aumentou em 62,33 %.

Os briquetes produzidos sob pressões de 100 MPa e 150 MPa apresentaram valores de densidade energética de 10343 MJ /m³ e 11625 MJ /m³ respectivamente. Se considerarmos o conjunto de resultados obtidos, aqueles referentes aos compactados nas pressões supracitadas são os mais atraentes, principalmente porque as briquetadeiras industriais podem fabricá-los nesta faixa de pressão.

Do ponto de vista energético, os resultados obtidos abriram um caminho para que briquetes de qualquer madeira, fabricados como no presente estudo, sem uso de temperatura e saturados com carbonáceos, tenham, a partir disto, um significativo aumento de sua densidade energética. Além disso, como possível consequência a: a) disponibilidade de um método alternativo para a produção de compactos de madeira (briquetes) com elevado potencial energético; b) possibilidade de seu uso para geração de energia em caldeiras; c) agregação de valor à resíduos de biomassa sólida; d) redução do imenso descarte destes materiais como lixo nas regiões onde são gerados; e) geração de uma alternativa para a redução do desmatamento em várias regiões do país tais como a Centro-Oeste em especial, o estado de Mato Grosso, onde a dificuldade é grande para implementação de novos plantios florestais.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14929**: Madeira- Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8112/1986**: Carvão vegetal Análise imediata- Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6922/1981**: Carvão vegetal ensaios físicos- determinação da massa específica (densidade à granel). Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Int. 2021; 84:1–2. doi: 10.1520/D1762-84R21**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. 2021.

ALMEIDA, C. C. F.; BRAND, M. A. ; BALDUINO JUNIOR, A. ; CUNHA, A. B. Qualidade energética da madeira e de briquetes produzidos a partir de *Cupressus lusitanica* Mill. **Scientia Forestalis** (IPEF), v. 43, p. 1003-1011, 2015.

ALVES, E. P. R.; SALCEDO-PUERTO, O.; NUNCIRA, J. *et al.* Renewable Energy Potential and CO2 Performance of Main Biomasses Used in Brazil. **Energies**, V.16, N.3959, p.2-59, 2023.

Comentado [L4]: Rever

Comentado [L5]: Bibliografia não encontrada no corpo do texto.

Comentado [U6R5]:

Comentado [U7R5]:



CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A. *et al.* Caracterização Física e Química da Biomassa usada como Combustível Sólido em uma Caldeira. **Quim. Nova**, Vol. 44, Nº 1, p. 35-40, 2021.

DINESHA, P.; KUMAR, S.; ROSEN, M. A. Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review. **Energy Technol.**, V.7, p.1-8, 2019.

FRANCO, C.R. Forest biomass potential for wood pellets production in the United States of America for exportation: a review. **BIOFUELS**, V.13, N.8, p.983-994, 2022.

FOELKEL, C.E.B. "Utilização da Biomassa do eucalipto para a Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 1: **Biomassa Florestal & Florestas Energéticas**", **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2016.

MARREIRO, H. M. P.; PERUCHI, R. S.; RIUZUANI, M. B. P. *et al.* Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. **Energies**, v. 14, n. 20, p. 6753, 2021.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2012. (Comunicado Técnico, 293).

OBI, O. F.; PECENKA, R.; CLIFFORD, M. J. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. **Energies**, V.15, N.2426, p.1-23, 2022.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

RENDEIROS, G. NOGUEIRA, M. Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. 1ª edição. **Ministério de Minas e Energia**, Brasília, 2008.

SACOLL, A. F. O.; WELTER, C. A.; ROSA, R. C. *et al.* The use of forest biomass in the manufacture of briquettes. **Revista Matéria**, V.25, N.2, 2020.

SENA, A. S.; NAHIME, B.; LIMA, E. C.; *et al.* Characterization of briquettes produced from eucalyptus wood waste generated in agro-industries. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**, V.25, N.11, p.794-798, 2021.

SOARES, L. G.; SOARES, S. R. S.; VIEIRA, M. M.; *et al.* Evaluation of Energy Properties in Wooden Briquettes Produced without the use of binding and temperature and enriched with carbonaceous solids. In: II South Florida Congress of Development, 2022, Miami - USA. **Proceedings [II South Florida Congress of Development]**. P. 203-212. Miami - USA: 2022.

SOARES, S. R. S.; VIEIRA, M. M.; FERNANDES, K. *et al.* A proposal to add energy value to solid residues of any type of wood. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, p. 30027-30039, 2022.

SOARES, S. R. S. FERNANDES, K.; VIEIRA, M. M.; *et al.* Behavior of the Energy Properties of Wooden Briquettes from the Combined Action of the Pressure and Saturation of its Microstructure with Carbonaceous Solids. **Current Scientific Journal**, V. 3, p. 122-132, 2023.

