



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE BRIQUETES

Fábio Minoru Yamaji¹, Lais Vendrasco², Walbert Chrisostomo³ e Wesley de Paula Flores⁴

RESUMO: A produção de briquetes e peletes é uma forma de obter combustível sólido de qualidade através da biomassa. Pelo processo de compactação há uma redução de volume que pode variar entre 5 e dez vezes, dependendo do tipo de matéria-prima. Essa redução de volume resulta num aumento da densidade da biomassa, o que favorece as operações de transporte, estoque e manuseio. A princípio, qualquer biomassa vegetal pode ser utilizada na produção de briquetes. Atualmente, os materiais mais utilizados são os resíduos agrícolas, florestais e de processos industriais e algumas propriedades devem ser observadas para manter a qualidade do produto final. Um dos principais cuidados deve ser com o teor de umidade, tanto do conteúdo de água da biomassa quanto à umidade relativa do ambiente, haja vista que a biomassa é um material higroscópico. Um conteúdo de umidade elevado na biomassa compromete a qualidade dos briquetes. O objetivo do trabalho foi analisar o comportamento higroscópico dos briquetes produzidos com diversos tipos de biomassa em diferentes condições de armazenamento (60% UR, 75% UR e 95% UR). Os resultados mostraram que cada matéria prima respondeu de maneira diferente ao processo de acondicionamento. O bagaço de cana e o capim apresentaram maior higroscopicidade que os demais. Por exemplo, num ambiente com 95% de UR os briquetes de capim elefante chegaram a se desintegrar. As características de densidades são influenciadas pelo ambiente nos quais são armazenados.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa, bioenergia, resíduos.

ANALYSIS OF THE HYGROSCOPIC BEHAVIOR OF BRIQUETTES

ABSTRACT: The production of briquettes and pellets is a possibility to get quality solid fuel from biomass. The compactation process reduces the product volume from 5 to 10 times, depending on the type of raw material. This volume reduction increases the biomass density, which facilitates the transport, storage, and handling. Any vegetal biomass can be used to produce briquettes. Currently, the most used materials in briquettes production are waste-products from agricultural, forestry, and industrial processes. However, some properties must be observed to maintain the quality of the final product. The moisture content of the biomass and the ambient relative humidity where the final product will be stocked must be controlled, considering that the biomass is a hygroscopic material and thus has the ability to absorb moisture from the ambient. Biomass with high moisture content can compromise the quality of the briquettes. The objective of this study was to analyze the moisture content of briquettes produced with different types of biomass in different storage conditions (60% RH, 75% RH and 95% RH). The results showed that each raw material had a different behavior in the storage process. For example, the briquettes of elephant grass desintegrated in an environment with 95% RH. The briquettes density are influenced by the environment in which they are stored.

KEYWORDS: biomass, bioenergy, residues.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de resíduos (serragem, galhos, cascas, bagaço de cana, etc.) funciona como uma alternativa

energética aos combustíveis sólidos convencionais (lenha e carvão). O modo mais simples de utilizar estes resíduos é a queima direta, porém este método traz algumas desvantagens. Por exemplo, os resíduos florestais possuem baixa densidade, o que dificulta o transporte e armazenamento, resultando no aumento dos custos. A maioria dos resíduos contém elevada umidade, portanto parte da combustão é consumida para secar a própria biomassa (SILVA; ROCHA, 2007).

^{1, 2} e ³ UFSCAR - Universidade Federal de São Carlos, Campus de Sorocaba. fmyamaji@ufscar.br; laisvendrasco@gmail.com; wesley.depaula@yahoo.com.br

⁴ Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. wesley.depaula@yahoo.com.br

A briquetagem é um método eficiente para elevar a densidade da biomassa, pois o processo de compactação faz com que haja uma maior concentração de energia por unidade de volume (PARIKKA, 2004). Além disso, devido à forma homogênea dos briquetes, o processo de estocagem e transporte é vantajoso, visto que, em decorrência da biomassa estar compactada poderá ser transportada uma quantidade superior de massa (logo, de poder energético) uma vez que o espaço físico foi reduzido. Haja vista que o material chega a uma redução de volume em torno de 5 a 7 vezes (QUIRINO, 1991). Flores et al. (2009) conseguiram uma redução de até dez vezes para briquetes de braquiária (*Brachiaria* sp).

Vendrasco e Yamaji (2009) não encontraram normas nacionais para a produção de briquetes. Foram encontradas algumas normas internacionais (EN14961, DIN 51731, Ö-Norm M-7135) que descrevem a compactação das partículas sólidas como um indicador de qualidade de briquetes e peletes. Também não foram encontrados parâmetros para higroscopicidade de briquetes.

A densidade é utilizada como parâmetro para análise da qualidade de briquetes e peletes (RABIER et. al., 2006). Em geral, a compactação da matéria prima resulta em briquetes com alta densidade, baixa umidade e forma adequada. Yamaji et al. (2010) mostraram que existe um grande potencial no Brasil para a produção de briquetes e peletes. Entretanto, a qualidade do produto final é altamente influenciada pelo tipo de matéria prima utilizada e pelas condições de armazenamento.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho é analisar o comportamento higroscópico dos briquetes confeccionados com diferentes tipos de biomassa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As biomassas utilizadas para o processo de briquetagem foram às encontradas em abundância na região de Sul e Sudeste. As matérias primas selecionadas foram:

- Acícula de araucária (*Araucaria angustifolia*);
- Acícula de pinus (*Pinus* sp.);
- Folha do coqueiro (*Cocos* sp.);
- Serragem de nativa (resíduos de diversas espécies nativas);
- Serragem de pinus (*Pinus* sp);
- Serragem de eucalipto (*Eucalyptus* sp.)
- Bagaço de cana de açúcar (*Saccharum officinarum*);
- Capim elefante (*Pennisetum* sp).

O bagaço da cana de açúcar, capim elefante, acícula de pinus e acícula de araucária precisaram passar pelo moinho tipo Willey, devido ao tamanho elevado das partículas. A folha do coqueiro passou por um processo de pré-moagem, visto que suas partículas possuíam tamanho elevado para serem processados no moinho tipo Willey. Para a fabricação dos briquetes, os materiais moídos passaram por um classificador de partículas para se obter uma curva de distribuição granulométrica de cada material. Para a escolha da melhor granulometria foi utilizado o estudo feito por Costa et al. (2010). As granulometrias utilizadas para a fabricação dos briquetes foram as frações retidas nas peneiras de 20 a 100 mesh (0,841 a 0,149 mm). O teor de umidade das biomassas foi determinado com o auxílio da estufa e de uma balança eletrônica de precisão. A secagem da matéria prima foi realizada com temperatura constante a 102°C, até peso constante. A partir do material seco (0% de teor de umidade) foram preparadas amostras de todos os materiais a 12% de umidade, com auxílio de um borrifador de água e da balança determinadora de umidade.

O processo de briquetagem que foi realizado através de uma prensa hidráulica de 15t e com o auxílio de moldes de 3,5cm de diâmetro e 16cm de altura. A produção dos briquetes seguiu a metodologia descrita por Chrisostomo et al. (2010). Todos os briquetes seguiram a mesma conformação: massa de 20g, umidade 12%, pressão de compactação 1247,4 kgf.cm⁻² e tempo de prensagem de 30s. Ressaltando-se que os briquetes foram prensados sem a utilização de temperatura e sem o uso de aglutinantes, onde a eficiência do processo foi demonstrada por Chrisostomo (2011). Para cada matéria prima foram confeccionados cinco repetições e após a prensagem verificou-se o diâmetro e altura de cada briquete com o auxílio de um paquímetro digital. A densidade aparente foi determinada pelo método estereométrico, conforme método descrito por Vendrasco et al. (2010).

Em seguida os briquetes foram acondicionados em câmara climática com controle de temperatura e umidade, onde foram simuladas diferentes condições ambientais de armazenamento. Para comparar a higroscopicidade dos briquetes, as condições de armazenamento adotadas foram a 20°C, alterando apenas o teor de umidade (UR%) da câmara climática. A primeira durou 45 dias com umidade relativa controlada em 60%, acarretando um briquete com teor de umidade de equilíbrio em torno de 11%. A próxima etapa foi a de 20°C com teor de umidade ambiente de 75% estabilizando o briquete a um teor de umidade próximo a 15% (27 dias). Em seguida, as condições foram alteradas para uma temperatura de 20°C e 95% de teor de umidade, durante 22 dias, para atingir uma umidade de equilíbrio em torno de 24% (American Society for Testing and Materials. D4933-99). Após cada etapa de acondicionamento mediu-se o peso, altura e diâmetro

dos briquetes. Para realizar uma caracterização dos briquetes posteriormente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições e massa específica (densidade) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Massa específica dos briquetes, logo após prensagem.

Matéria Prima	Raio (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g.cm ⁻³)
Acícula de pinus	1,78	2,18	21,74	19,7	0,90
Pinus	1,78	2,28	22,70	19,5	0,86
Eucalipto	1,79	2,53	25,30	20,2	0,80
Acícula de araucária	1,80	2,39	24,29	19,8	0,82
Nativa	1,81	2,44	24,99	19,9	0,80
Bagaço de cana	1,90	2,67	30,27	19,9	0,66
Capim elefante	1,78	2,37	23,70	20,6	0,87
Folha do coco	1,68	2,27	20,15	19,9	0,99

De acordo com os dados apresentados, os briquetes formados a partir do bagaço da cana apresentaram a menor densidade de 0,66 g.cm⁻³, enquanto que as folhas do coqueiro resultaram em briquetes com a maior densidade de 0,99 g.cm⁻³. As altas densidades apresentadas pelos briquetes de folhas do coqueiro e acícula de pinus possibilitam melhor acondicionamento, porque materiais densos são menos higroscópicos. Os briquetes de bagaço de cana apresentaram baixa densidade, isso acarreta problemas no manuseio e transporte destes materiais.

Em seguida, os materiais foram acondicionados na câmara climática a 20°C e umidade de 60% durante 45 dias, estabilizando com uma umidade de equilíbrio em 11%. Após atingirem massa constante foram medidos e pesados novamente (Tabela 2).

Tabela 2: Massa específica dos briquetes após acondicionamento a 20°C e 60% de umidade relativa.

Matéria Prima	Raio (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g.cm ⁻³)
Acícula de pinus	1,77	2,17	21,37	19,2	0,90
Pinus	1,78	2,26	22,53	19,2	0,85
Eucalipto	1,78	2,49	24,75	20,2	0,82
Acícula de araucária	1,79	2,33	23,36	19,1	0,82
Nativa	1,80	2,38	24,16	19,1	0,79
Bagaço de cana	1,91	3,71	42,50	19,4	0,46
Capim elefante	1,84	3,61	38,21	21,3	0,56
Folha do coqueiro	1,77	2,23	22,09	19,5	0,88

Nessa primeira fase, teoricamente, os briquetes deveriam permanecer estáveis. Entretanto, os briquetes de capim e bagaço de cana apresentaram ligeira expansão após acondicionamento na câmara climática (Figura 1), resultando numa diminuição da densidade. Como não houve aumento da massa (absorção de água), a diminuição da densidade foi resultado da expansão longitudinal. Talvez o uso de aquecimento na prensagem possa diminuir a expansão longitudinal.

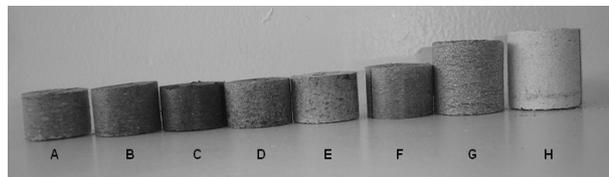


Figura 1: Briquetes após acondicionamento a 20°C e 60% UR. (A) Nativa; (B) Acícula de araucária; (C) Acícula de pinus; (D) Folha do coqueiro; (E) Pinus; (F) Eucalipto; (G) Capim elefante e (H) Bagaço de cana.

Os resultados da segunda fase de acondicionamento estão na tabela 3.

Tabela 3: Densidade dos briquetes após acondicionamento a 20°C e 75% de umidade relativa.

Matéria Prima	Raio (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g.cm ⁻³)
Acícula de pinus	1,78	2,24	22,40	19,5	0,87
Pinus	1,79	2,34	23,51	19,5	0,83
Eucalipto	1,79	2,57	25,77	20,5	0,80
Acícula de araucária	1,80	2,41	24,50	19,6	0,80
Nativa	1,80	2,43	24,76	19,2	0,78
Bagaço de cana	1,94	4,40	51,95	20,2	0,39
Capim elefante	1,96	4,88	58,74	21,4	0,36
Folha do coqueiro	1,79	2,37	23,78	19,8	0,83

A segunda etapa de acondicionamento durou 27 dias, estabilizando com uma umidade de equilíbrio em torno de 15%. Os briquetes do bagaço de cana e capim sofreram uma expansão longitudinal de 35% (capim) e 18% (cana). Esse fenômeno já demonstrou que tanto o capim elefante como o bagaço de cana são materiais mais higroscópicos que os demais materiais ensaiados. Conforme mencionado, isso pode ter sido provocado pela ausência de aquecimento no processo de prensagem.

A terceira etapa de acondicionamento teve duração de 22 dias, estabilizando com uma umidade de equilíbrio de 24% e os resultados estão na tabela 4.

Tabela 4: Densidade dos briquetes após acondicionamento a 20°C e 95% de UR.

Matéria Prima	Raio (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g.cm ⁻³)
Acícula de pinus	1,84	3,07	32,84	20,0	0,61
Pinus	1,86	3,55	38,67	20,0	0,52
Eucalipto	1,84	3,67	39,12	21,0	0,54
Acícula de araucária	1,89	3,72	41,53	20,2	0,49
Nativa	1,86	3,21	35,01	19,6	0,56
Bagaço de cana	2,08	8,13	110,43	22,2	0,20
Capim elefante*	-	-	-	-	-
Folha do coqueiro	1,85	3,27	35,01	20,4	0,58

* Todos os briquetes de capim se desintegraram.

Houve perda de material durante a terceira etapa de acondicionamento (20°C e 95% UR), os briquetes começaram a se desintegrar de forma generalizada (Figura 2)

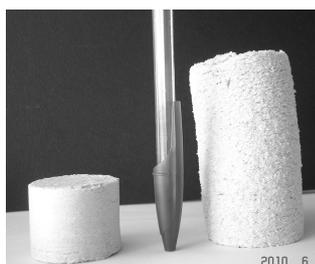


Figura 2: (A) Briquete de bagaço de cana, antes do acondicionamento e (B) Briquete de bagaço de cana após acondicionamento a 20°C e 95% UR.

Pelas análises de densidade apresentadas no gráfico 1, os briquetes de bagaço de cana e de capim elefante são menos resistentes a acondicionamentos em ambiente úmido, pois apresentaram maior higroscopicidade (absorção de água), deste modo seu armazenamento deve ser realizado em condições controladas de temperatura e umidade, para evitar a absorção de umidade e a consequente redução das propriedades físico-mecânicas.

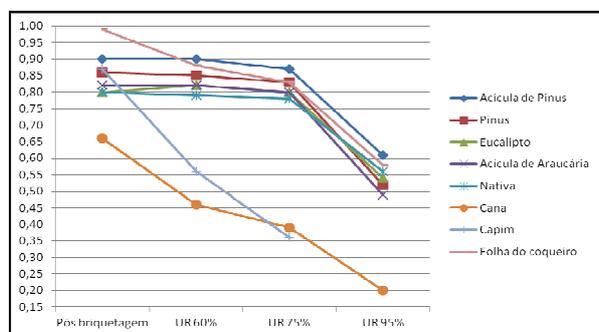


Gráfico 1: Análise das densidades (g.cm⁻³) todas as etapas de acondicionamento a 20°C e diferentes Umidades Relativas.

O gráfico 2 demonstra o ganho efetivo de água do briquetes, nas diversas fases de acondicionamento.

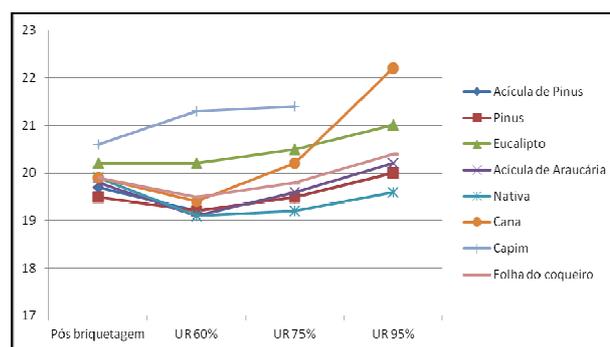


Gráfico 2: Análise das densidades (g.cm⁻³) todas as etapas de acondicionamento a 20°C e diferentes Umidades Relativas.

Este gráfico mostra que os briquetes de nativa, pinus, acícula e folha de coqueiro não tiveram alteração de massa por absorção de água. Para o bagaço de cana o ganho foi significativo e que para o capim elefante apensar de não ser alta a porcentagem de absorção, isso já foi suficiente para a desintegração dos briquetes.

A tabela 5 mostra o percentual de absorção de água a partir da massa inicial na prensagem até a massa final obtida na última fase de acondicionamento.

Tabela 5: Absorção de água em percentual desde a prensagem até após acondicionamento a 20°C e 95% de UR.

MP	% de absorção água
Acícula de Pinus	1,52
Pinus	2,56
Eucalipto	3,96
Acícula de Araucária	2,02
Nativa	-1,51
Cana	11,56
Capim	3,88
Folha do coqueiro	2,51

O capim respondeu bem ao processo de compactação, resultando numa densidade de 0,87 g.cm⁻³ logo após a briquetagem. Entretanto, mostrou-se também ser o material mais suscetível à umidade. Já na primeira fase de acondicionamento teve a densidade reduzida em 36%. Na segunda fase (75% UR) a densidade ficou reduzida a 41% da densidade inicial (pós-prensagem). Em um ambiente com 95% de UR os briquetes desintegraram. O ambiente com 95% de UR mostrou-se inadequado para todos os tipos de materiais ensaiados. Os briquetes de serragem de pinus, serragem de eucalipto, serragem de nativas, folha de coqueiro, acícula de pinus e acícula de araucária mostraram-se resistentes quando acondicionados em um ambiente com 75% de UR.

4 CONCLUSÃO

- Cada matéria prima responde de modo diferente ao processo de acondicionamento.
- Os briquetes mais densos foram os produzidos a partir da acícula de pinus e da folha do coqueiro e os menos densos são os produzidos a partir do capim elefante e do bagaço de cana de açúcar.
- Os resíduos de bagaço de cana e capim elefante possuem maior higroscopicidade que os demais materiais utilizados.
- Os briquetes produzidos a partir do capim elefante e do bagaço de cana de açúcar exigem maior cuidado no armazenamento.
- As características de densidades são influenciadas pelo ambiente nos quais são armazenados.
- A matéria-prima que dá origem para o briquete tem maior influência na higroscopicidade dos briquetes do que a massa específica dos mesmos obtidos pelo processo de compactação.
- Nesse estudo, a confecção dos briquetes foi realizada sem o uso de aquecimento nem adição de aglutinantes. Novos estudos estão sendo conduzidos com o uso de aquecimento na prensagem para verificar a influência da temperatura na higroscopicidade dos briquetes.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelos apoios financeiros através do Projeto Universal e das bolsas PIBIC e PIBITI.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4933-99**: standard guide for moisture conditioning of wood and wood-based materials¹. West Conshohocken, 2004.

CHRISOSTOMO, W. et al. Análise da compactação do bagaço de cana-de-açúcar para produção de briquetes. In: V Congresso Internacional de Bioenergia, 2010, Curitiba. Anais. Curitiba: Remade, 2010. p.1-6.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo do processo de compactação de resíduos lignocelulósicos para utilização como combustível sólido**. 2011. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais)-Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.

COSTA, D. R. et al. **Efeito da granulometria nas propriedades físico-mecânico de briquetes de *Pinus sp.*** 2010. Anais do V Congresso Internacional de Bioenergia, Curitiba. Anais. Curitiba: Remade, 2010. p.1-6.

FLORES, W. P. et al. Redução do volume de biomassa no processo de briquetagem. **Revista da Madeira**, Curitiba, ano 20, n. 121, p. 32-34. 2009.

PARIKKA, M. Global biomass fuel resources. **Biomass and Bioenergy**, Philidelphia, v. 27, p. 613-620, 2004.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos lignocelulósicos**. Brasília: LPF, 1991. (Circular Técnica, 20).

RABIER, F. et al. Participle density determination of pellets and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, Philidelphia, v. 30, p. 954-963, 2006.

SILVA, C. A. da; ROCHA, J. D. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos**. 2007. 156p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2007.

VENDRASCO, L.; YAMAJI, F. M. **Normas técnicas nas indústrias brasileiras de briquetes**. 2009. Anais do 17º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP – SIICUSP, Pirassununga. Anais. Pirassununga, Editora: USP, 2009.

VENDRASCO, L. et al. **Determinação da densidade de briquetes pelo método estereométrico**. 2010. Anais do V Congresso Internacional de Bioenergia, Curitiba. Editora: Remade, 2010.

YAMAJI, F. M. et al. **“The use of forest residues for pellets and briquettes production in Brazil”**. 2010. Anais do Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Veneza. Editora: Eurowaste, 2010.