

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO NO PODER CALORÍFICO E DENSIDADE EM BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR

João Vitor da Silveira Nunes – [jvitornune@gmail.com](mailto:jvitornune@gmail.com)  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Humberto Monte, s/n, Pici  
60440-593 – Fortaleza – Ceará

Kevyn Matheus Vieira Nogueira – [kevynnogueira@gmail.com](mailto:kevynnogueira@gmail.com)  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Humberto Monte, s/n, Pici  
60440-593 – Fortaleza – Ceará

Jackson de Queiroz Malveira – [jackson.malveira@nutec.ce.gov.br](mailto:jackson.malveira@nutec.ce.gov.br)  
Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará  
R. Prof. Rômulo Proença, s/n, Pici  
60440-552 – Fortaleza – Ceará

Rafael Almeida Bartholomeu – [rabartholomeu@gmail.com](mailto:rabartholomeu@gmail.com)  
Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará  
R. Prof. Rômulo Proença, s/n, Pici  
60440-552 – Fortaleza – Ceará

Maria Aleksandra de Sousa Rios – [alexsandrarios@ufc.br](mailto:alexsandrarios@ufc.br)  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica, Bloco 714  
Av. Humberto Monte, s/n, Pici  
60020-181 – Fortaleza – Ceará

**Resumo:** Um dos principais fatores que podem ser controlados durante o processo de briquetagem é a pressão de compactação. Desse modo foi utilizado bagaço de cana in natura para estudar quais os efeitos que a pressão tem no PCS (Poder Calorífico Superior) e na Densidade do briquete. Foi utilizado um molde cilíndrico para produzir briquetes a 12,7; 25,5 e 38,2 MPa de pressão. Em seguida foi medido o PCS e densidade em triplicata para cada faixa de pressão, em foi realizada uma análise estatística para determinar se houve variação significativa entre os resultados. Partindo-se de 12,7 MPa, o PCS só variou significativamente ao chegar ao valor de 38,3 MPa, variando de 15,757 até 15,962 MJ/Kg (aumento de 1,3%). Já a densidade e consequentemente a densidade energética foram bastante sensíveis a variação de pressão. Entre os mesmos intervalos de pressão a densidade variou de 148,0004 até 213,0537 g/m<sup>3</sup>(variação de 44%), e a densidade energética variou de 2.332 até 3,401 MJ/m<sup>3</sup> (variação de 46%).

**Palavras-chave:** Briquete. Briquetadeira. Bagaço de Cana de Açúcar. Poder Calorífico. Densidade

**Abstract:** One of the main factors that can be controlled during the briquetting process is the compression pressure. Thereby, sugarcane bagasse in natura was used to study the effects of compression pressure on GCV (Gross Calorific Value) and briquette density. A cylindrical

die was used to produce briquettes at 12.7; 25.5 and 38.2 MPa pressure. The GCV and density in triplicate were then measured for each pressure range, followed by a statistical analysis to determine if there was significant variation between the results. Starting from 12.7MPa, the GCV only varied significantly when reaching 38.3MPa, varying from 15.757 to 15.962 MJ/kg (increase of 1.3%). The density and consequently the energy density were quite sensitive to the variation of pressure. Between the same pressure ranges the density varied from 148.0004 to 213.0537 g/m<sup>3</sup> (variation of 44%), and the energy density varied from 2.332 to 3.401 MJ/m<sup>3</sup> (variation of 46%).

**Key-words:** Briquette, Briquette Machine. Sugarcane Bagasse. Calorific Value. Density.

## 1 INTRODUÇÃO

Os fatores que podem modificar as características físicas e mecânicas do briquete são: pressão de compactação, teor de umidade, tamanho das partículas (granulometria) e temperatura (MITCHUAL; FRIMPONG-MENSAH; DARKWA, 2013). A umidade e granulometria dependem mais do preparo da biomassa que da própria briquetagem. A temperatura não é um fator simples de se controlar e medir durante o processo, mas a pressão de compactação é possível de ser controlada por meio da força aplicada em um molde durante a briquetagem.

Inclusive o efeito da pressão já costuma ser estudado em laboratório utilizando um conjunto de molde e êmbolo aliado a uma prensa hidráulica para verificar a eficiência dos ligantes naturais da matéria prima (DIAS et al., 2012). Um estudo realizado com resíduos de papel e madeira por exemplo mostrou que nas pressões de 30 a 60 MPa os briquetes se quebravam facilmente, enquanto em pressões de 150 a 250 MPa o material era mais consistente e compacto, além de apresentar maior densidade (KERS et al., 2010).

A característica mais importante do ponto de vista energético e de qualidade do briquete é o poder calorífico. Já do ponto de vista logístico é a sua densidade, já que briquetes mais densos facilitam seu transporte, manuseio e armazenamento, além de concentrarem mais energia por volume.

Desse modo foi avaliado como o PCS e a densidade no briquete variam com a pressão aplicada. Foram testadas as cargas de 5ton, 7,5ton e 10ton, os quais para o diâmetro do molde de Ø50mm representam respectivamente 12,7; 25,5 e 38,2 MPa de pressão.

## 2 OBJETIVOS

Medir a densidade e PCS de briquetes de bagaço de cana de açúcar nas faixas de pressão de 12,7; 25,5 e 38,2 MPa e constatar como esses fatores variam com a mudança na pressão de compactação.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos testes para a escolha da biomassa a ser utilizada constatou-se que briquetes de materiais fibrosos (como palha de cana carnaúba, casca de coco) costumavam ter maior compactação e maior consistência que materiais não fibrosos (como casca de castanha de caju e casca de arroz). Por isso o material escolhido para realizar os testes foi o bagaço de cana de açúcar, pois devido a sua natureza fibrosa, demonstrou facilidade de compactação. Até

mesmo em materiais que briquetados se desfaziam facilmente, como a casca de arroz, tornavam-se consistentes se briquetados em mistura ao bagaço de cana.

Também foram realizados testes em diferentes granulometrias, concluindo que para o material e faixa de pressão utilizadas uma granulometria de 1mm era pequena o bastante para melhorar a compactação e evitar espaços vazios no briquete, sem comprometer a consistência do briquete, já que quanto menor a granulometria, maior seria pressão requerida para alcançar maiores temperaturas (FILIPPETTO, 2008), de modo conseguir que a lignina plastifique-se e envolva as partículas.

Depois a biomassa foi levada a uma estufa de bancada da marca De Leo onde foi aquecida até ficar entre 8 e 12% de umidade.

Para o teste de poder calorífico eram pesados 5g de amostra em uma balança analítica marte AY220 e eram levados ao molde para briquetagem. As Figuras 1 e 2 abaixo mostra os briquetes produzidos:

Figuras 1 e 2 – Briquete de cana de açúcar 1mm –  
7.5ton (38,2 Mpa). Amostra com cerca de 5g para  
teste de PCS



Fonte: Autor

Em seguida o material era levado para bomba calorimétrica ICA C-200 (DIN EN14918/2014) para medir o PCS. Para isso os briquetes eram partidos em pedaços de 1g com o auxílio de uma grilhotina, como mostra a Figura 3:

Figura 3 – Briquete de cana de açúcar 1mm – 7.5ton (38,2 Mpa), cortado em pedaços de 1g para teste de PCS



Fonte: Autor

Para o teste de densidade eram pesadas e briquetadas amostras de 30g. Após remover do molde o briquete era pesado numa balança analítica, e sua altura e diâmetro eram medidos com um paquímetro para obter seu volume. As Figuras 4 e 5 abaixo mostra um briquete produzido para o teste de densidade:

Figuras 4 e 5 – Briquete de cana de açúcar 1mm – 7.5ton (38,2 Mpa), cortado em pedaços de 1g para teste de PCS



Fonte: Autor

As tabelas 1,2 e 3 abaixo mostram os valores de PCS obtidos para cada faixa de pressão:

Tabelas 1, 2 e 3 - Resultados dos testes de PCS

Briquetes de Cana de açúcar 7,5 ton 1mm	
Pressão Aplicada - 38,2 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
0.6776	15.787
0.9763	15.969
0.8603	15.913
0.906	16.008
0.9838	16.132

Briquetes de Cana de açúcar 5 ton 1mm	
Pressão Aplicada – 25,5 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
1.0211	16.102
0.8647	15.89
0.8958	15.87
0.8684	15.9
0.9471	15.78

Briquetes de Cana de açúcar 2,5 ton 1mm	
Pressão Aplicada – 12,7 MPa	
Massa(g)	Poder Calorífico (MJ/kg)
0.8126	15.816
0.8587	15.735
0.5463	15.749
0.5752	15.679
0.7691	15.805

Fonte: Autor

Abaixo nas Tabelas 4,5 e 6 tem-se os valores de densidade para as três faixas de pressão:

Tabelas 4, 5 e 6 - Resultados dos testes de PCS

Briquetes de Cana de açúcar 7,5 ton 1mm		
Pressão Aplicada - 38,2 MPa		
Massa(g)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
29.6613	0.000142505	208.1423
30.0077	0.000142505	210.5731
31.4146	0.000142505	220.4457

Briquetes de Cana de açúcar 5 ton 1mm		
Pressão Aplicada – 25,5 MPa		
Massa(g)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
25.1657	0.000134588	186.9833
29.9924	0.000152611	196.5279
31.2692	0.000166919	187.3319

Briquetes de Cana de açúcar 2,5 ton 1mm		
Pressão Aplicada – 12,7 MPa		
Massa(g)	Volume (m <sup>3</sup> )	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
30.6882	0.000211474	145.1158
30.4867	0.000206686	147.5026
30.2001	0.000199	151.3828

Fonte: Autor

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 7 e 8 abaixo tem-se a média e desvio padrão para o PCS e para a densidade:

Tabelas 7 - Resultados de média e desvio padrão amostral para o teste de PCS

Briquetes de Cana de açúcar 1mm – PCS (MJ/kg)

Média e desvio padrão amostral	2,5 ton - 12,7 MPa	5 ton - 25,5 MPa	7,5 ton - 38,2 MPa
	15.757± 0.056	15.908± 0.118	15.962± 0.127

Fonte: Autor

Tabelas 8 - Resultados de média e desvio padrão amostral para a densidade aparente

Briquetes de Cana de açúcar 1mm – Densidade Aparente (kg/m<sup>3</sup>)

Média e desvio padrão amostral	2,5 ton - 12,7 MPa	5 ton - 25,5 MPa	7,5 ton - 38,2 MPa
	148.0004± 3.1630	190.2810 ± 5.4128	213.0537 ± 6.5160

Fonte: Autor

Para iniciar a análise estatística inicialmente se verificam as condições paramétricas em cada grupo de amostras. Assim são verificados se eles possuem distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk e Kolmogorov – Smirnov), se eles são independentes (teste de Qui-Quadrado de Pearson) e se são homogêneos, ou seja, de variância semelhante (Teste de Levene). (FIELD, 2009) Os teste foram realizados utilizando o programa estatístico SPSS. As Tabelas 9, 10 e 11 abaixo mostra os testes paramétricos para os dados de PCS:

Tabelas 9 - Análise de Normalidade para os dados de PCS

Grupos PCS	Shapiro Wilk – Sig.	Kolmogorov-Smirnov Sig.	Conclusão
7,5 ton - 38,2 MPa	,655	,200	É normal
5 ton - 25,5 MPa	,294	,083	É normal
2,5 ton - 12,7 MPa	,988	,200	É normal

Fonte: Autor

Tabelas 10 - Análise de Independência para os dados de PCS

Grupos	Qui-Quadrado Pearson Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,363	Não é independente

Fonte: Autor

Tabelas 11 - Análise de Homogeneidade para os dados de PCS

Grupos	Levene Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,536	É Homogêneo

Fonte: Autor

Como conclusão para os valores de PCS, os tres grupos tem distribuição normal, tem variâncias semelhantes e são dados independentes entre si. A seguir nas Tabelas 12, 13 e 14 são mostrados os testes paramétricos para os dados de densidade:

Tabelas 12 - Análise de Normalidade para os dados de densidade

Grupos Densidade	Shapiro Wilk – Sig.	Conclusão
7,5 ton - 38,2 MPa	,739	É normal
5 ton - 25,5 MPa	,062	É normal
2,5 ton - 12,7 MPa	,358	É normal

Fonte: Autor

Tabelas 13 - Análise de Independência para os dados de densidade

Grupos Densidade	Qui-Quadrado Pearson Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,324	Não é independente

Fonte: Autor

Tabelas 14 - Análise de Homogeneidade para os dados de densidade

Grupos Densidade	Levene Sig.	Conclusão
2,5/5,0/7,5 ton	,304	É Homogêneo

Fonte: Autor

Para os dados de densidade, os tres grupos são normais, tem variâncias semelhante e são independentes entre si. Essas três condições são necessárias para uma amostra ser considerada paramétrica (GAYA; GARLIPP, 2008).

Considerando os dados de PCS e densidade aptos aos testes paramétricos, executamos o teste de Anova. A Tabela 15 mostra as significâncias para o PCS e densidade:

Tabelas 15 - Análise de Variância para os dados de PCS e densidade

Grupos PCS	Anova Sig.	Conclusão
PCS 2,5/5,0/7,5 ton	,025	Há diferença
Densidade 2,5/5,0/7,5 ton	<0,01	Há diferença

Fonte: Autor

Para os dois testes a diferença foi significativa, então o passo seguinte é realizar um teste paramétrico como Tukey ou teste de T entre pares de cada grupo para localizar entre quais grupos houve essa diferença.

Foi realizado o teste de Tukey HSD, comparando dois a dois cada um dos grupos. Abaixo nas Tabelas 16 e 17 tem-se os resultados para os grupos de PCS e densidade:

Tabelas 16 - Análise de Tukey para os dados de PCS

Grupos PCS	Tukey HSD Sig.	Conclusão
2,5 ton – 5,0 ton	,097	Não há diferença
5,0 ton – 7,5 ton	,708	Não há diferença
7,5 ton – 2,5 ton	,024	Há diferença

Fonte: Autor

Tabelas 17 - Análise de Tukey para os dados de densidade aparente

Grupos Densidade	Tukey HSD Sig.	Conclusão
2,5 ton – 5,0 ton	<0,01	Há diferença
5,0 ton – 7,5 ton	0,004	Há diferença
7,5 ton – 2,5 ton	<0,01	Há diferença

Fonte: Autor

Entre os intervalos de 2,5 a 5,0 ton e de 5,0 a 7,5 ton não se percebeu melhora significativa no PCS. Foi apenas entre os intervalos 2,5 a 7,5 ton que houve uma melhora significativa, que de acordo com a tabela 15, foi uma diferença 0,205 MJ/kg entre médias, um aumento de cerca de 1,3%

No caso da densidade, ela é altamente sensível a variação de pressão. Entre todos os intervalos a diferença foi significativa. De acordo com a tabela 16, entre 2,5 e 5,0 ton houve uma diferença de médias de 42,2806 g/m<sup>3</sup>, entre 5,0 e 7,5 ton de 22,7727 kg/m<sup>3</sup>, e entre 2,5 e 7,5 ton de 65,0533 kg/m<sup>3</sup> (este último um aumento de cerca de 44%).

Houve pouca variação no PCS ao longo dos intervalos, mas uma grande mudança de densidade, o que gera uma significativa mudança na densidade energética, obtida pelo produto entre a densidade (kg/m<sup>3</sup>) e o PCS (MJ/kg). Com o aumento de 12,7 MPa até 38,2 MPa, a densidade energética aumentou pouco mais de 45%. A Tabela 18 mostra o resultado para cada uma das faixas de pressão utilizando as médias de PCS e densidade:

Tabelas 18 - Densidade energética para cada faixa de pressão

Faixas de Pressão	Densidade Energética (MJ/kg)
7,5 ton - 38,2 MPa	3400,721
5 ton - 25,5 MPa	3027,066
2,5 ton - 12,7 MPa	2332,012

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÃO

O PCS só teve melhora após variar de 12,7 para 38,2 MPa, e não foi uma grande mudança, apenas de 1,3%, variando de 15,757 para 15,962 MJ/kg

Já no caso da densidade, ela foi bastante sensível as variações de pressão e variou em todos os intervalos testados. Entre as pressões de 12,7 e 38,2 MPa, a densidade variou 44%, de 148,0004 até 213,0537 kg/m<sup>3</sup>

Consequentemente a variação da densidade energética também foi muito alta. No mesmo intervalo de pressão ela variou 46% de 2,332 até 3,401 MJ/m<sup>3</sup>.

Assim as maiores vantagens da compactação para o briquete de bagaço de cana a 1mm na faixa de pressão de até 40 MPa analisada foram na questão do aumento da densidade, e por consequência na densidade energética.

### *Agradecimentos*

Aos técnicos do Laboratório de Referência em Biocombustíveis Rosali Barbosa Marques e Erick Felipe da Silva, ao Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará, e ao Grupo de Inovações Tecnológicas e Especialidades Químicas. Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Processos 406697/2013-2, 459355/2014-7 e 308280/2017-2), CAPES, FINEP e Funcap.

## REFERÊNCIAS

DIAS, José Manuel Cabral de Sousa *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/952626/producao-de-briquetes-e-peletes-a-partir-de-residuos-agricolas-agroindustriais-e-florestais>>.

FIELD, Andy. **Descobrimo a ESTATÍSTICA usando o SPSS**. 2ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FILIPPETTO, Daniele. **Briquetagem de resíduos vegetais : viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GAYA, Adroaldo; GARLIPP, Daniel. **Ciências do Movimento Humano: Introdução à metodologia da pesquisa**. Porto Alegre: Artmed, 2008.

KERS, J *et al.* Determination of physical , mechanical and burning characteristics of polymeric waste material briquettes. **Estonian Journal of Engineering**, v. 19, n. 4, p. 307–316, 2010. Disponível em: <[http://www.kirj.ee/18098/?tpl=1061&c\\_tpl=1064](http://www.kirj.ee/18098/?tpl=1061&c_tpl=1064)>.

MITCHUAL, S. J.; FRIMPONG-MENSAH, K.; DARKWA, N. A. Effect of species, particle size and compacting pressure on relaxed density and compressive strength of fuel briquettes. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v.4, n.30, p. 1–6, 2013.