

AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE MECÂNICA EM PELLETS DE MADEIRA POR MEIO DE ANÁLISE DIMENSIONAL

Lucas Melegari de Souza,
lucas_melegari@hotmail.com¹

Robson Leal da Silva,
rlealsilva@hotmail.com²

¹Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790 - Zona 7, Maringá - PR, 87020-900, DEM – Bloco 14

²Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia MS-270, km 12, Dourados – MS, 79804-970, Caixa-postal: 364, FAEN - Faculdade de Engenharia

Resumo. O aproveitamento da biomassa residual para a produção de biocombustíveis está em voga nos últimos anos, em função da necessidade mundial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa e garantia da segurança energética nos próximos anos. O objetivo deste trabalho é verificar se a durabilidade mecânica de pellets de madeira pinus atendem os padrões de qualidade da norma ISO 17225, e se alterações nas condições de testes de durabilidade em dispositivo rotativo, normatizadas pela DS/EN 15210-1, são factíveis. O trabalho aplica a metodologia de análise dimensional (Teorema dos π 's de Buckingham) aos parâmetros de testes da norma técnica supracitada, obtendo desta maneira um conjunto de 5 números adimensionais que abordam semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Os resultados explorados buscam manter constantes alguns números adimensionais, porém alterando os parâmetros de testes de durabilidade mecânica. Resultados analisados para π_1 , π_4 e π_4' indicaram variação numérica dentro da faixa de incertezas padrão. Isto permite afirmar que são resultados equivalentes, ou seja, com semelhança nos aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Portanto, é possível realizar testes utilizando menor tempo ou menor quantidade de massa ou menor geometria, e obter resultados consistentes com base na metodologia de análise dimensional.

Palavras chave: Durabilidade Mecânica. Pellets. Análise dimensional. Semelhança

Abstract. The use of residual biomass for the production of biofuels has been in vogue in recent years, due to the global need to mitigate greenhouse gas emissions and guarantee energy security in the coming years. The objective of this work is to verify if the mechanical durability of pine wood pellets meets the quality standards of the ISO 17225-2 standard, and if changes in the conditions of durability tests in a rotating device, standardized by DS/EN 15210-1, are feasible. The work applies the dimensional analysis methodology (Buckingham's π 's Theorem) to the test parameters of the aforementioned technical standard, thus obtaining a set of 5 dimensionless numbers that address geometric, kinematic and dynamic similarity. The explored results seek to keep constant some dimensionless numbers, however changing the parameters of mechanical durability tests. Analyzed results for π_1 , π_4 and π_4' indicated numerical variation within the range of standard interferences. This allows us to state that they are equivalent results, that is, with similarity in geometric, kinematic and dynamic aspects. Therefore, it is possible to carry out tests using less time or less mass or less geometry, and obtain consistent results based on the dimensional analysis methodology.

Keywords: Mechanical Durability. Pellets. Dimensional analysis. Similarity

1. INTRODUÇÃO

Países desenvolvidos estão promovendo ações de inserção de fontes alternativas de energia em suas respectivas matrizes energéticas, com o intuito de reduzir o uso de derivados de petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética em relação aos países exportadores de petróleo. Outro ponto, é atender os compromissos firmados no Acordo de Paris, no tocante à redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e contenção do aquecimento global. Neste cenário, biocombustíveis derivados da biomassa celulósica (resíduos florestais e agrícolas) apresentam-se como rotas promissoras frente aos combustíveis fósseis. Em função da sua alta disponibilidade e baixo custo, a biomassa celulósica é considerada um recurso sustentável para geração de bioenergia a médio e longo prazo (Yang et al., 2015). Contudo, barreiras técnicas como baixa densidade de energia, baixa densidade volumétrica, alto teor de umidade e hidrofobicidade da biomassa impedem sua utilização em grande escala, para produção de bioenergia. A utilização da biomassa bruta, como combustível, resulta em alto custo de manuseio, armazenamento e baixa eficiência.

de conversão de energia. (Ramamurthi et al., 2014; Sokhansanj et al., 2003). Para resolver esses desafios é necessário submeter a biomassa ao processo de densificação que consiste em aplicar força mecânica para compactar resíduos (e.g., serragem) em partículas sólidas de tamanho uniforme, conhecidos comercialmente como pellets e briquetes.

A densificação aumenta a densidade energética e diminui a densidade volumétrica, o que facilita o armazenamento e manuseio, reduzindo custos de transporte e diminuição do teor de umidade (Peng, 2013). Entretanto, durante o manuseio dos pellets, por exemplo, massa é desagregada na forma de partículas finas, o que requer desta capacidade de se manterem intactos (durabilidade mecânica). Assim sendo, este trabalho tem por objetivo verificar se a durabilidade mecânica de pellets comerciais de madeira de *pinus* atendem aos requisitos de qualidade da norma EN/ISO 17225-2 (2014), por meio de um dispositivo rotativo e metodologia de teste normatizados pela DS/EN 15210-1 (2010). Também, será aplicada a técnica de análise dimensional para verificar se existe condições de semelhança nos resultados numéricos da durabilidade mecânica, da variação de massa e massa específica dos pellets ao alterar parâmetros dimensionais (Geométricos, Cinemáticos e Dinâmicos) recomendados pela norma técnica mencionada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biomassa e formas de conversão

Biomassa são todos os materiais orgânicos na natureza que são combustíveis, seja de origem vegetal ou animal (Panwar et al., 2012). A Biomassa vegetal é uma composição estruturada de três famílias de compostos químicos: hemicelulose, celulose e lignina, além de outras espécies menores (compostos alifáticos e fenólicos). A hemicelulose e a celulose estão agrupadas compondo as paredes das fibras da madeira (celulose é a parede e a hemicelulose ocupa os espaços vazios). A lignina é um polímero tridimensional com a finalidade de manter as fibras juntas (Bareto et al., 2008). A biomassa é considerada neutra em carbono, porque a quantidade de carbono que ela pode liberar é equivalente à quantidade que ela absorveu durante seu tempo de vida. Não há aumento líquido de carbono para o meio ambiente, a longo prazo, ao queimar os materiais lignocelulósicos. Sendo a biomassa uma fonte renovável de energia que desempenha um importante papel frente as mudanças climáticas e questões de segurança energética dos países (Xu et al., 2009; Kobayashi et al., 2011).

Naturalmente a biomassa apresenta uma forma volumosa, o que dificulta seu manuseio, armazenagem e transporte, quando comparada a combustíveis líquidos e gasosos. Esta desvantagem fomentou o desenvolvimento de processos de conversão da biomassa sólida em combustíveis líquidos e gasosos, por meio de duas rotas: a bioquímica e termoquímica. Na rota termoquímica, toda a biomassa é vertida em gases, que posteriormente podem ser usados diretamente ou sintetizados em produtos químicos de grande potencial calorífico. A produção de energia térmica é a principal rota de conversão, possuindo quatro caminhos: Combustão, pirólise, gaseificação e liquefação. A combustão é um processo amplamente utilizado que converte a biomassa em dióxido de carbono e vapor de água, na presença de ar e altas temperaturas. A gaseificação é uma reação química em um ambiente com deficiência de oxigênio. E a pirólise ocorre em uma temperatura relativamente baixa na ausência total de oxigênio. Por fim, na liquefação, as moléculas maiores da matéria-prima são decompostas em líquidos com moléculas menores, por ação de um catalisador em uma temperatura menor que na gaseificação (Basu, 2010).

2.2 Densificação da biomassa

A peletização e briquetagem são as duas formas mais comuns de densificação de biomassa, possuem processos semelhantes de produção, mas variam nos tamanhos da biomassa densificada obtida. Produtos com diâmetro maior (e.g., 40 mm) são chamados de briquetes e produtos de menor diâmetro (e.g., 10 mm) chamados pellets. Por serem menores, os pellets são comumente produzidos por extrusão, enquanto briquetes maiores são produzidos por compactação (Muazu et al., 2017). A qualidade dos pellets produzidas são atestadas conforme os padrões das normas: EN ISO 17225-1 (2014), para requisitos gerais, EN ISO 17225-2 (2014) para pellets de madeira classificados para uso industrial e não industrial e EN ISO 17225-6 (2014) para pellets não lenhosos, expressos na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificações de qualidade exigidas para os pellets, segundo a norma ISO 17225 (2014)

Propriedades	Norma ISO 17225-1		Pellets de madeira ISO 17225-2		Pellets não-lenhoso ISO 17225-6
	Unid.	Residencial A1	Comercial A2	Geral A	
Diâmetro	mm	6,0 - 8,0 ±1		6,0 - 10,0	
Comprimento	mm	3,15 - 40,0		3,15 - 40,0	
Teor de umidade	%	≤ 10,0	≤ 10,0	≤ 12,0	
Durabilidade Mecânica	%	≥ 98,0	≥ 97,5	≥ 97,5	

2.3 Teste de Durabilidade Mecânica

A durabilidade mecânica ou resistência à abrasão, é definida como a capacidade dos pellets de permanecerem intactos durante o manuseio. A norma DS/EN 15210-1 (2010) estabelece como método para determinar a durabilidade mecânica de pellets um teste que consiste em acondicionar uma amostra de 500 ± 10 g de pellets em uma caixa com dimensões especificadas pela Fig.1, e submetê-la a uma rotação de 50 ± 2 RPM por um tempo de 10 minutos, resultando num total de 500 rotações. Após o teste a amostra é retirada e peneirada, em uma peneira com malha de 3,15 mm, e posteriormente pesada em uma balança com precisão de no mínimo 0,1 g.

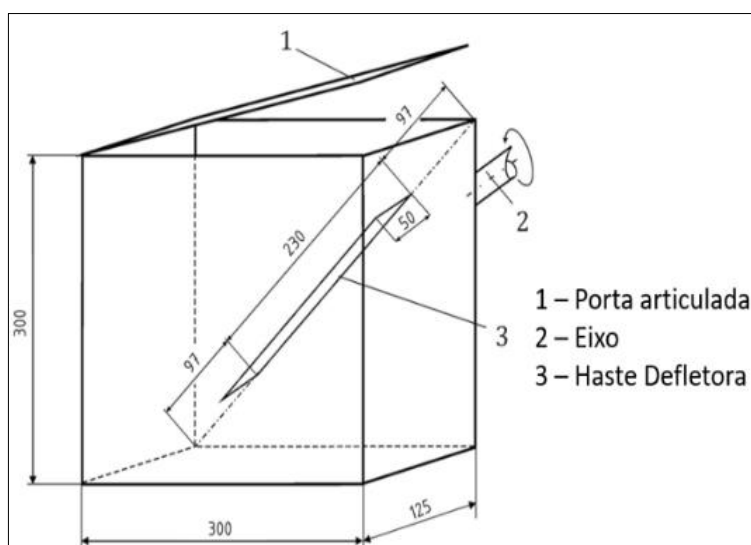


Figura 1. Caixa rotativa do teste durabilidade mecânica
Fonte: Adaptado da norma DS/EN 15210-1 (2010)

A partir dos valores da massa inicial e final da amostra, a durabilidade mecânica é determinada usando a Eq.(1). Onde, m_i é massa da amostra antes do teste e m_f é a massa da amostra peneirada após o teste. O princípio físico do teste, é submeter as amostras de pellets a choques mecânicos contra as paredes da caixa e entre si.

$$\text{Durability (\%)} = \frac{m_f}{m_i} 100 \quad (1)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados três sacos de 15kg (cada), de pellets de madeira de *pinus*, comercializados como granulado higiênico para animais. Amostras destes foram separadas e acondicionadas em sacos plásticos, conforme ilustrado na Fig.2, e testadas em dispositivo rotativo de durabilidade mecânica segundo as condições de ensaios expressas na Tab.2

Tabela 2. Condições de ensaio com parâmetros diferentes da norma DS/EN 15210-1 (2010)

Condições de testes	Rotação da caixa (Rpm)	Tempo de teste (min)	Massa da amostra de pellets (g)	Largura e comprimento da haste defletora (mm)	Número de repetições por condição
C1	40, 45, 50, 55, 60 e 70	10	500	50 x 230	6
C2	40, 55, 60 e 70	12,5; 9,09 ;8,3 e 7,14	500	50 x 230	4
C3	50	10	50, 100, 200 e 300	50 x 230	4
C4	50	10	500	184 x 40; 50 x 230 e 287,5 x 62,5	4



Figura 2. Separação dos pellets em amostras de 300, 200, 100 e 50g

O dispositivo rotativo (Fig.3) mencionado é dotado essencialmente de um sistema mecânico e elétrico. Os seus respectivos componentes estão descritos abaixo:

A: Tacômetro digital para leitura da rotação da caixa;

B: Sistema de transmissão, composto um eixo soldado à um coroa de 56 dentes e um pinhão de 14 dentes acoplado ao eixo do motor elétrico por chaveta, unidos por uma corrente modelo 428H;

C: Painel de controle elétrico, composto por uma caixa com dimensões de 400 x 600 x 200 mm, potenciômetro 10k Ohms, inversora de frequência Omron 3G3JX, chaves liga e desliga do inversor e do sensor de rotação respectivamente.

D: Caixa rotativa com porta articulada, fabricada em MDF e dimensões expressas conforme a Fig.1;

E: Motor elétrico trifásico de 0,5 CV (220V) da fabricante NOVA;

F: Bancada metálica de 420 mm de largura por 420 mm de comprimento e 1000 mm de altura.

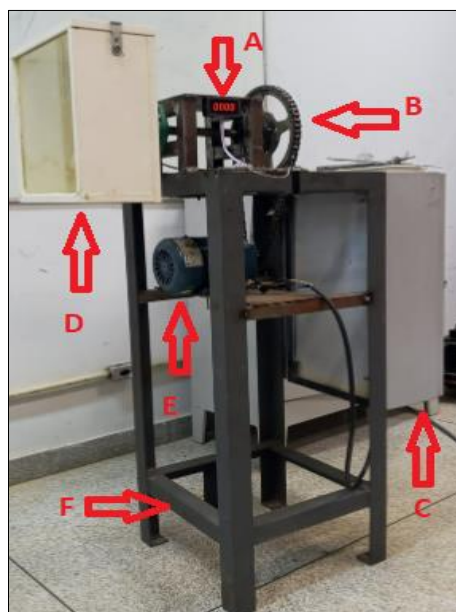


Figura 3. Dispositivo Rotativo

3.1 Análise Dimensional e condições de semelhança

Neste trabalho foi aplicada a técnica de análise dimensional que consiste em reduzir o número de variáveis relacionadas a um dado fenômeno físico que depende de n variáveis dimensionais a apenas um problema de p variáveis adimensionais (White, 1988). Na prática, é possível escrever as variáveis caracterizadoras de um fenômeno sob a forma de números adimensionais, onde cada uma dessas variáveis é expressa por uma unidade associada. Desta maneira, o teorema dos PI's de Buckingham foi aplicado e a durabilidade mecânica modelada pela Eq. (2). Onde, m_i : massa inicial dos pellets; Δm : variação da massa dos pellets; m_f : massa final dos pellets; L_H : comprimento da haste da caixa rotativa; W_H : largura da haste da caixa rotativa; n : rotação de ensaio; t : tempo de ensaio; ρ : massa específica dos pellets..

$$Du(m_i, \Delta m, m_f, L_H, W_H, n, t, \rho) \quad (2)$$

As variáveis físicas dimensionais da Eq.2 podem ser representadas a partir das dimensões primárias independentes M, L e T (massa, comprimento e tempo). Desta forma, têm-se que: $m_i [M]$; $m_f [M]$; $\Delta m [M]$; $L_H [L]$; $W_H [L]$; $n [T^{-1}]$; $t [T]$; $\rho [Ml^{-3}]$. Assim sendo, $n = 8$ é o número de variáveis dimensionais e $m = 3$ as dimensões físicas independentes (massa, comprimento e tempo). Desta maneira, $n - m = 5$ corresponde a quantidade de números adimensionais que modelam a durabilidade mecânica, elencados conforme as Eq. (3 a 7). Os adimensionais π_1, π_3 são de natureza geométrica; π_2 cinemático; π_4 e π_4' dinâmicos.

$$\pi_1 = \frac{\rho W_H^3}{m_i} \quad (3)$$

$$\pi_2 = nt \quad (4)$$

$$\pi_3 = \frac{L_H}{W_H} \quad (5)$$

$$\pi_4 = \frac{\Delta m}{m_i} \quad (6)$$

$$\pi_4' = \frac{m_f}{m_i} \quad (7)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. 3 apresenta dados do teor de umidade, massa específica e dimensões geométrica, dos pellets dos três sacos utilizados para realização dos ensaios.

Tabela 3. Características físicas dos pellets de madeira de *pinus* (*in natura*)

Amostras	Teor de umidade (%)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa específica (kg/m ³)
Saco 1	6,43 ± 0,50	6,13 ± 0,03	12,81 ± 1,63	1108,63 ± 212,10
Saco 2	6,47 ± 0,30	6,10 ± 0,03	12,95 ± 1,71	1187,85 ± 220,05
Saco 3	6,40 ± 0,47	6,10 ± 0,03	13,60 ± 1,80	1096,83 ± 225,25

A Fig. 4 mostra resultados para a condição de teste C1, da Tab.2, onde um comportamento não-linear da durabilidade mecânica (ou Δm) foi obtido em função da rotação. Pontos de mínimos/máximos ocorrem em 50 ou 55 RPM. A norma ISO 17225-2 (2014) requer valores maiores que 97,5% para pellets de madeira, e os valores mínimos obtidos são 98,5 e 98,4 nas rotações mencionadas, respectivamente. O que falta para alcançar 100%, respectivamente 1,5% e 1,6%, é a variação de massa ou massa desagregada do pellet durante o ensaio, que é registrada ao passar as amostras na peneira recomendada e ao final do ensaio rotativo é pesada a quantidade que permanece na peneira.

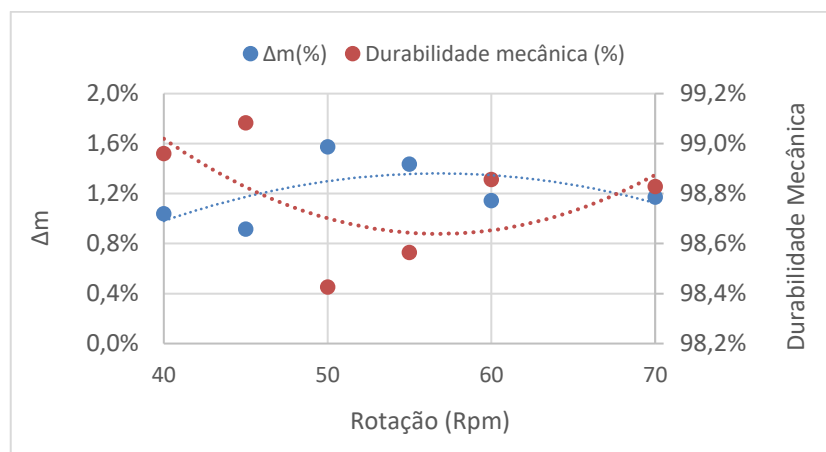


Figura 4. Durabilidade mecânica; variação de massa (Δm) vs. Rotação de teste

Os resultados apresentados na Fig 4, podem ser verificados sob a ótica da análise dimensional, em que as grandezas dimensionais (variação de massa e durabilidade mecânica) passam a ser representada pelos números adimensionais π_4 e π_4' , e a rotação pelo adimensional π_2 . A Fig. 5 mostra que π_4 e π_4' têm pontos de máximo e mínimo em $\pi_2 = 500$.

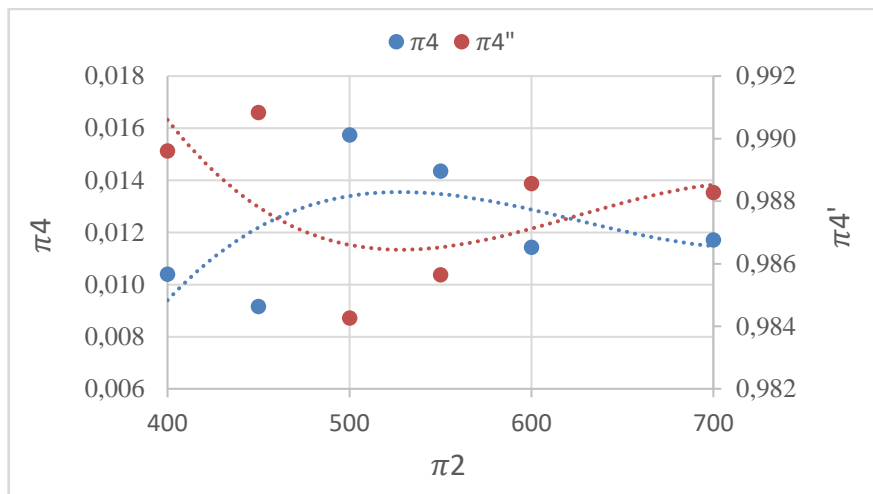


Figura 5. Análise dimensional π_4 , π_4' vs. π_2

A Figura 6 representa os resultados para a condição de teste C2 (Tab.2), onde manteve-se o adimensional de rotação $\pi_2 = 500$, convenientemente igual as 500 rotações (50 RPM; $t = 10\text{min}$) exigidas pela norma DS/EN 15210-1 (2010). Os resultados mostram que para as condições de 40 RPM ($t = 12,5\text{ min}$), 55 RPM ($t = 9,09\text{ min}$) e 60 RPM ($t = 8,3\text{ min}$) há uma constância dos adimensionais π_4 e π_4' , considerando uma variação dentro da faixa de incertezas experimentais. Este comportamento indica que o ensaio pode ser realizado em condições diferentes da norma. De maneira análoga para as mesmas condições supracitadas, a Fig. 7 mostra que há uma tendência do adimensional π_1 se comportar da mesma forma.

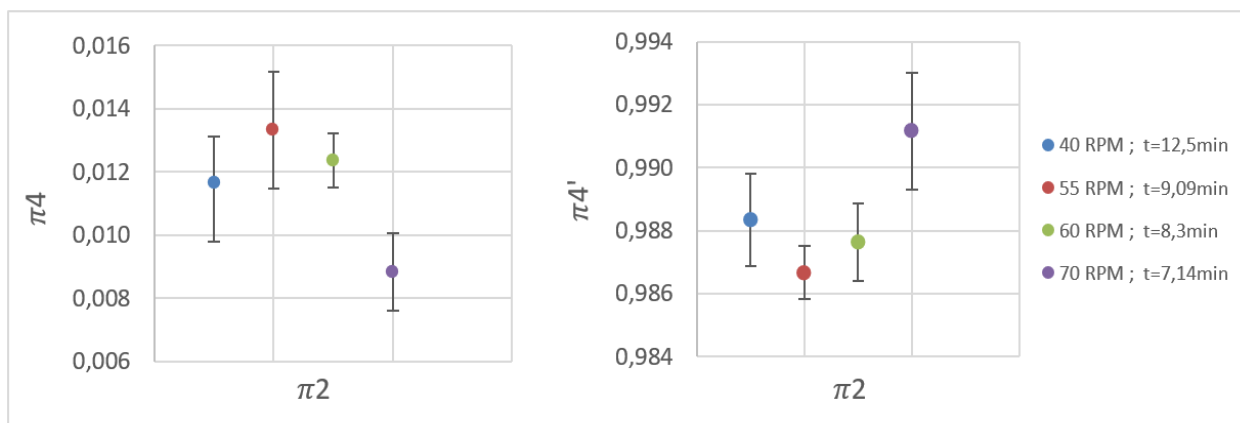


Figura 6. Análise dimensional de π_4 e π_4' vs. π_2

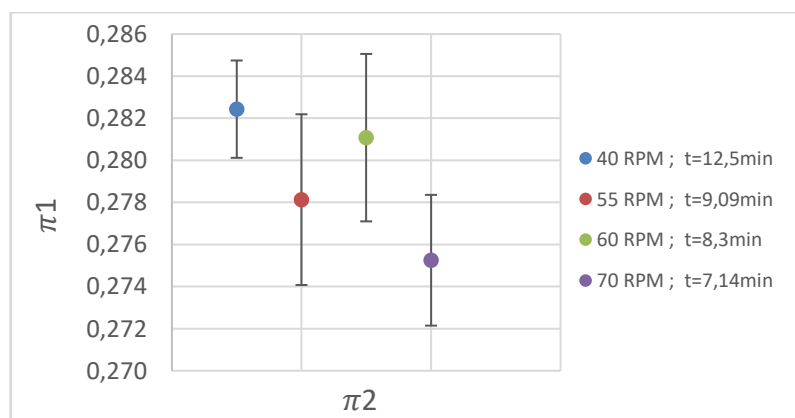


Figura 7. Análise dimensional de π_1 vs. π_2

A Figura 8 mostra resultados correspondentes a condição de teste C3 (Tab.2), com variação da massa inicial das amostras, e adimensional $\pi_2 = 500$. Verifica-se uma constância dos adimensionais π_4' e π_4 , estes apresentam valores médios de 0,080 e 0,020 respectivamente, dentro dos limites das incertezas experimentais. Isto indica que o ensaio de durabilidade pode ser realizado com amostras de menor massa comparado aos 500g recomendados pela norma DS/EN 15210-1 (2010).

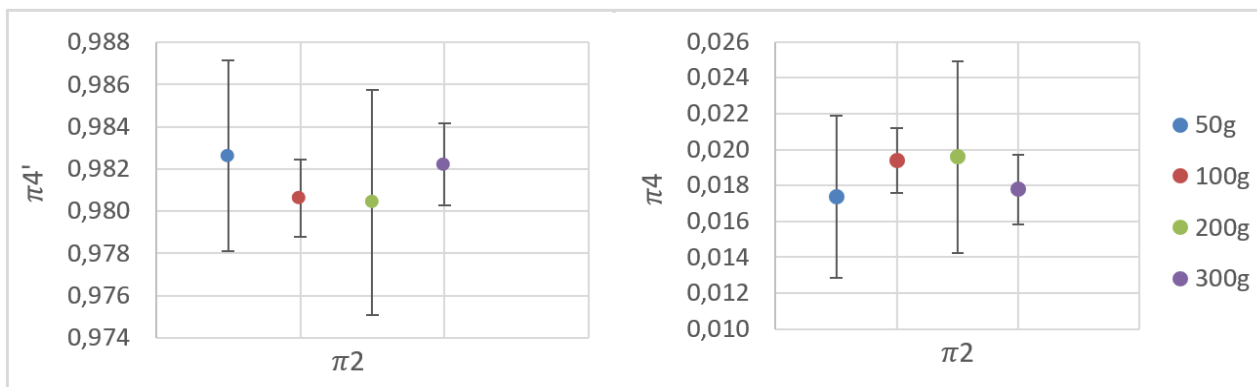


Figura 8. Análise dimensional π_4' e π_4 vs. π_2

Os resultados da condição de teste C4 (Tab. 2), onde o adimensional $\pi_3 = 4,6$, são mostrados na Fig. 9. Os adimensionais π_4 e π_4' mantêm-se constantes apresentando valores médios de 0,016 e 0,984 respectivamente, dentro das incertezas padrão.

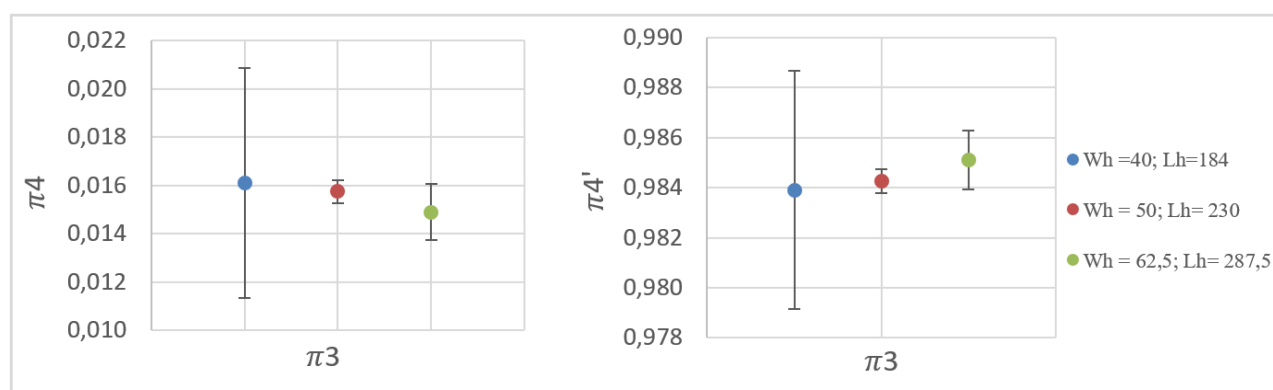


Figura 9. Análise dimensional π_4 e π_4' vs. π_3

Este comportamento permite afirmar que realizar testes em uma caixa rotativa com dimensões diferentes da norma é possível, quando o objetivo for utilizar um equipamento em escala reduzida (e.g., com dimensões menores). Isto resulta em menor custo ferramental para execução de ensaios em grandes proporções.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostram que os pellets atendem aos requisitos de qualidade, apresentando valores de durabilidade mecânica mínima de 98,5 e 98,4%, superiores ao valor de 97,5% requeridos pela norma técnica. Os valores numéricos dos adimensionais π_1 , π_4 e π_4' , em condições dimensionais diferentes da norma, indica variação numérica dentro da faixa de incertezas calculada, quando mantem-se constantes os adimensionais π_2 e π_3 . Isto permite afirmar que são resultados equivalentes, ou seja, com similaridade (ou semelhança) nos aspectos geométricos, cinemáticos e dinâmicos. Conclui-se que é possível realizar ensaios utilizando, por exemplo, menor tempo ou menor quantidade de massa ou menor geometria, e obter resultados consistentes e equivalentes com base na metodologia de análise dimensional.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal do Paraná, campus de Paranavaí, pela disponibilização da estrutura e materiais necessários a realização deste trabalho. E também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá, em nome dos autores.

7. REFERÊNCIAS

- Barreto, Eduardo José Fagundes; Rendeiros, G.; Nogueira, Manoel. Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia. LPT, MME, 2008.
- Basu, Prabir. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic press, 2010.
- Cao, Liang et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. *Bioresource Technology*, v. 185, p. 254-262, 2015.
- DS/EN 15210-1, Solid Biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. Dansk Standard- Eftertryk uden tilladelse forbudt, 2010
- ISO 17225-1:2014 - Solid biofuels - Fuel Specifications and classes - Part 1: general requirements
- ISO 17225-2: 2014 - Solid Biofuels – Fuel Specifications and classes – Part 2: Graded wood péletes.
- ISO 17225-6: 2014 - Solid biofuels - Fuels especification and classes - Part 6 - Graded non-woody pellets.
- Kobayashi N, Fan L-S. Biomass direct chemical looping process: a perspective. *Biomass Bioenergy* 2011;35:1252–62.
- Muazu, R.I.; Borrion, A.; Stegemann, J.A. Life cycle assessment of biomass densification systems. *Biomass and Bioenergy* 107, 384–397. 2017.
- Panwar, N. L.; Kothari, Richa; Tyagi, V. V. Thermo chemical conversion of biomass–Eco friendly energy routes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 4, p. 1801-1816, 2012.
- Peng, J. H. et al. Study on density, hardness, and moisture uptake of torrefied wood pellets. *Energy & Fuels*, v. 27, n. 2, p. 967-974, 2013.
- Ramamurthi, Pooja Vijay et al. Logistics cost analysis of rice residues for second generation bioenergy production in Ghana. *Bioresource technology*, v. 173, p. 429-438, 2014.
- Sokhansanj, Shahab; Cushman, Janet; Wright, Lynn. Collection and delivery of feedstock biomass for fuel and power production. 2003.
- White, Frank M. Mecânica dos fluidos. McGraw Hill Brasil, 1988.
- Xu R, Ferrante L, Briens C, Berruti F. Flash pyrolysis of grape residues into biofuel in a bubbling fluid bed. *J Anal Appl Pyrol* 2009; 86:58–65.
- Yang, W., Shimanouchi, T., Iwamura, M., Takahashi, Y., Mano, R., Takashima, K., Tanifuji, T., and KIMURA, Y. (2015). “Elevating the fuel properties of *Humulus lupulus*, *Plumeria alba* and *Calophyllum inophyllum* L. through wet torrefaction,” *Fuel* 146, 88-94.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.