



X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

“Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Universidade Severino Sombra
Vassouras – RJ – Brasil

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE METODOLOGIAS PARA A DETERMINAÇÃO DA ESCOABILIDADE DE BIOMASSAS VEGETAIS

SOUZA FILHO, W.B.*¹, H. R.; TANNOUS², K.

¹Aluno da FEQ/UNICAMP ²Professora da FEQ/UNICAMP
Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária “Zeferino Vaz”
Av. Albert Einstein, 500 - CEP 13083-852 - Campinas - SP – Brasil
email: katia@feq.unicamp.br

RESUMO - Tendo em vista a aplicação de biomassas como fonte energética e visando a estocagem e transporte destas matérias-primas aos processos de conversão, este trabalho tem como objetivo o estudo da escoabilidade de diversas biomassas, a saber: ouriço da castanha do Brasil, caroço do fruto do tucumã, jequitibá-rosa e caixeta. Os ensaios foram realizados com diâmetros médios entre 0,5 mm a 2,0 mm. Os métodos aplicados foram o índice de compressibilidade de Carr e razão de Hausner considerando as massas específicas aerada e batida; e os ângulos de repouso estático (com e sem base) e dinâmico (rotativo e mesa basculante). Os resultados experimentais mostraram uma escoabilidade boa para ouriço da castanha do Brasil e o caroço do tucumã, e uma escoabilidade pobre para o jequitibá-rosa e caixeta. Com relação ao efeito do recipiente, a razão de Hausner diminuiu com o aumento do volume do cilindro, devido a maior compactação da amostra, causando um decréscimo na massa específica batida.

Palavras chave: empacotamento – reaproveitamento - biomassa

INTRODUÇÃO

O uso de biomassas como insumo energético é visto como uma possibilidade de fonte renovável de energia. Nos processos de termoconversão, o armazenamento e o transporte são fundamentais para a eficiência de uma planta de geração de energia. A caracterização da escoabilidade é necessária para os projetos de silos e equipamentos de transporte. A literatura descreve duas formas de quantificar a escoabilidade dos sólidos: ângulo de repouso e razão de Hausner. Além destes, um índice conhecido como

compressibilidade de Carr pode auxiliar nesta análise. Estes indicadores são muito usados em indústrias farmacêuticas para sólidos finos, mas estão sendo aplicados com frequência por terem um baixo custo operacionalidade.

Ileleji e Zhou (2008) estudaram a escoabilidade mediante ângulo de repouso da palha de milho convencional e *staygreen* seca e úmida com três diâmetros de partículas, sendo estes: 1,6 mm, 3,2 mm e 6,4 mm. Para a determinação dos ângulos de repouso (AoR), os autores utilizaram três métodos: AoR sem e com base e AoR dinâmico (mesa basculante). O funil usado possuía um ângulo de 31,8° em

relação ao eixo vertical e um orifício de 32 mm. A altura de descarga do funil foi de 230 mm, para os métodos de ângulos de repouso (AoR), base fixa e sem base. Os autores observaram que o AoR do material seco foi significativamente menor com relação ao material úmido para as duas espécies de milho, independente do método usado. Os AoRs sem base e base fixa não foram significativamente diferentes, mas ambos foram muito menores que o ângulo de repouso dinâmico. Os ângulos de repouso sem base e base fixa diferiram do ângulo de repouso dinâmico por uma magnitude de 15° em média para o material seco e esta diferença aumentou para 23° para material úmido. A palha de milho mostrou um escoamento pobre, indicando tratar-se de uma biomassa de difícil escoabilidade. O ângulo de repouso sem base ficou na faixa de 36,2°-51,9°, o ângulo de repouso base fixa ficou na faixa de 38,2°-55,6° e o ângulo de repouso dinâmico (mesa basculante) ficou na faixa de: 49,2°-77,7°. Os autores consideraram uma classificação de escoabilidade (ângulo de repouso) para materiais secos: menor que 30° de fácil escoabilidade, entre 30° e 35° bom, acima de 35° de fluxo razoável, maior que 40° pobre e acima de 50° muito pobre.

Mello e Tannous (2012) estudaram a fibra e o pó de coco (203µm-677µm) a fim de determinar os ângulos de repouso mediante quatro métodos experimentais: ângulo de repouso estático (com e sem base fixa) e ângulo de repouso dinâmico (mesa basculante e cilindro rotativo). Os autores notaram que com o aumento do diâmetro da partícula, há um aumento do ângulo de repouso estático sem base e base fixa. No entanto, para o ângulo de repouso do pó de coco em base fixa houve uma diminuição do ângulo com o aumento no diâmetro da partícula, o que pode ser explicado pela fração de fibra impregnada ao pó, tornando-o mais pesado e acomodando-o de forma diferenciada sobre a base. O pó de coco apresentou uma boa escoabilidade (30°-35°) usando o método sem base, e uma fluidez deficiente (52°-62°) usando o método base fixa. A fibra apresentou uma fluidez muito limitada, obtendo ângulos entre 44°-55° para o AoR sem base, e uma boa escoabilidade (28°-30) usando o método base fixa. No cilindro rotativo, o ângulo de repouso

do pó diminuiu com o aumento do tamanho das partículas, enquanto que com a fibra ocorreu o contrário. Usando este método, o pó apresentou boa escoabilidade (26°-37°) e a fibra apresentou uma fluidez muito limitada (115-135°). Na determinação dos ângulos usando uma mesa basculante, os autores perceberam que o aumento no tamanho da partícula aumentava o ângulo de repouso. O pó de coco apresentou uma escoabilidade muito limitada (59°-69°), mas para a fibra não foi possível sua determinação, pois a fibra só se despreendeu do compartimento do aparelho, quando o mesmo estava inclinado a mais de 90°.

Além disso, os mesmos autores determinaram a massa específica aparente solta e batida para obtenção do RH e ICC. Foram usados dois cilindros com mesmo diâmetro, sendo um com altura de 47 mm (H/D=1) e outro com altura de 94 mm (H/D=2). Para o cilindro I, os autores notaram uma diminuição na razão de Hausner com o aumento no diâmetro da partícula, o que confirma a ideia de que o aumento no tamanho da partícula é acompanhado pela diminuição da coesão do material. Para o cilindro II, notaram que o aumento no diâmetro da partícula é acompanhada por um discreto aumento na razão de Hausner. Os autores atribuíram este fato pela maior quantidade de fibras e conseqüentemente uma maior quantidade de espaços interpartículas, levando a uma diminuição da massa batida e aumento da razão de Hausner.

Farias (2012) estudou a escoabilidade de seis biomassas, a saber: caixeta, casca de arroz, bagaço de cana, fibra de coco, ouriço da castanha do Brasil e jequitibá-rosa. Os diâmetros médios estudados foram entre 0,5 mm-3 mm, massa específica real entre 1450 kg/m³-1720 kg/m³ e esfericidades entre 0,20-0,42. A análise da escoabilidade foi definida mediante a razão de Hausner e compressibilidade de Carr, bem como ângulo de repouso com base. O autor propôs uma nova classificação sobre a escoabilidade: classe 1- boa (RH: 1-1,30; ICC: 5%-15%; AoR: 10°-30°), classe 2- razoável (RH: 1,30-1,50; ICC:15%-25%; AoR : 30°-45°), classe 3- baixa (RH:1,50-1,80; ICC:25% - 35%; AoR: 45°-55°) e classe 4/5 difícil (RH: > 1,80; ICC: >35%; AoR: >55°).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais e características físicas

As biomassas estudadas foram: caixeta, jequitibá-rosa, caroço do fruto do tucumã e ouriço da castanha do Brasil (Farias, 2012; Nascimento, 2012) e suas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 1.

Os diâmetros médios de Sauter (peneiramento) ficaram entre 500 μm e 2018 μm . A massa específica aparente foi obtida por porosimetria de mercúrio (Aminco, N.5-7118, EUA) sendo entre 440 Kg/m^3 e 1115 Kg/m^3 . A esfericidade (ϕ) das biomassas foi determinada segundo Riley (1941). As partículas foram pertencentes às categorias A, B e D da classificação de Geldart.

Tabela 1. Propriedades físicas das biomassas

Material	$\bar{d}_p (\mu\text{m})$	$\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	$\phi (-)$
Caixeta	500	440,00	0,48
	1006		0,54
	1993		0,64
Jequitibá rosa	494	770,01	0,32
	986		0,32
	2008		0,33
Ouriço da castanha do Brasil	496	853,95	0,74
	989		0,68
	2080		0,72
Caroço do fruto do tucumã	499	1115,01	0,81
	995		0,85
	2018		0,89

Metodologias adotadas

Massa específica aparente do leito:
Para a determinação das massas específicas aparentes utilizou-se três cilindros de

81,5 cm^3 , 161,5 cm^3 e 285,3 cm^3 , e um funil de dimensões: diâmetro superior de 180 mm, diâmetro inferior 23 mm e ângulo com a horizontal de 59°. O aparato foi montado de forma que o orifício do funil estivesse a 20 cm da base do cilindro. As séries utilizadas para a determinação da massa específica batida foram: 10 séries com 5 batidas, 5 séries com 10 batidas, 5 séries com 20 batidas e 14 séries com 30 batidas, totalizando 620 batidas. A Tabela 2 apresenta um resumo das massas utilizadas.

As massas específicas aparentes, aerada (ρ_{bA}) e batida (ρ_{bB}), foram calculadas de acordo com a Equação 1:

$$\rho_{bA \text{ ou } bB} = \frac{M_{\text{bio aerada ou } M_{\text{bio batida}}}{V_{\text{cil}}} \quad (1)$$

onde, $M_{\text{bio aerada}}$ e $M_{\text{bio batida}}$ refere-se às massas das partículas no cilindro antes e após a compactação, respectivamente, e V_{cil} é o volume do cilindro.

Índice de Compressibilidade de Carr e Razão de Hausner: O índice de compressibilidade de Carr (ICC) (Carr, 1965) exprime o grau de compactação de pós-metálicos ou materiais granulados em forma percentual e é definido pela razão entre massa específica aparente do leito, aerada e batida, conforme a Equação 2:

$$ICC = 100 * \left(1 - \frac{\rho_{bA}}{\rho_{bB}}\right) \quad (2)$$

Os limites de escoabilidade considerados pelo autor foram: 5 % a 16 % (excelente), 18 % e 21 % (boa), 23 % a 35 % (pobre) e 33 % a 38 % (muito pobre).

Tabela 2: Massas de biomassa utilizadas para determinação das massas específicas de leito

Cilindro	$d_{p_peneira} (\mu\text{m})$	Ouriço da castanha do Brasil	Ouriço do fruto do tucumã	Caixeta	Jequitibá-rosa
I	500	50 g	50 g	9 g (10 séries de 0,9 g)	9 g (10 séries de 0,9 g)
	1015		60 g		
	2030				
II	500	100 g	120 g	18 g (20 séries de 0,9 g)	18,9 g (21 séries de 0,9 g)
	1015		150 g		
	2030				
III	500	145 g	200 g	31,5 g (35 séries de 0,9 g)	36 g (40 séries de 0,9 g)
	1015				
	2030				

Outro índice similar foi proposto por Hausner (1967) referente à classificação da escoabilidade, também através das massas específicas do leito, conforme a Equação 3:

$$RH = \rho_{bB}/\rho_{bA} \quad (3)$$

Os limites de escoabilidade considerados pelo autor correspondem a: <1,25 (boa) e >1,5 (difícil) e intermediário, com necessidade de aditivos.

Ângulo de Repouso: As metodologias foram baseadas em: Geldart et al. (2006), Mello e Tannous (2012) e Farias (2012).

- Ângulo de Repouso Estático Sem Base: este parâmetro foi obtido considerando as partículas de biomassa caindo sob o efeito da gravidade e formação de um cone estável. A altura entre o orifício do funil e o plano de referência foi de 20 cm. As massas adicionadas para cada experimento foram de 0,9 g para as madeiras e 150 g cada o ouriço da castanha do Brasil e caroço do fruto do tucumã. Após a formação do cone foram registradas imagens (quatro vistas), mediante uma máquina fotográfica digital cyber-shot da marca Sony modelo DSC-W35/W55 (Sony Co., São Diego/USA) e os ângulos foram determinados pelo programa MB-Ruler (versão 4.0). Todos os ensaios foram feitos em duplicata.

- Ângulo de Repouso Estático Com Base: as amostras foram despejadas através do funil caindo sob o efeito da gravidade, sobre uma base cilíndrica de 70 mm de diâmetro e altura de 67 mm. A biomassa depositada sobre a base formou um cone estável cujo ângulo de repouso foi determinado pela média de oito ângulos. As massas adicionadas para cada experimento foram de 0,9 g para as madeiras e 150 g para o ouriço e o caroço à uma altura de 20 cm do funil. Todos os ensaios foram feitos em duplicata.

- Ângulo de Repouso Dinâmico(mesa basculante): a mesa basculante consistiu em um recipiente de dimensões de 99,5mm x 99,5mm x 29 mm, acoplada a um transferidor. A biomassa foi depositada em um funil cuja

base estava a 20 cm de altura de modo que a gravidade atuasse sobre a deposição da biomassa. Depois do material despejado sobre a mesa, este foi nivelado com a borda do recipiente usando um nivelador e tomando o devido cuidado para que não houvesse compactação. Em seguida, a mesa foi levantada até que o material deslizesse e o ângulo fosse anotado. Dois ângulos foram medidos: para o jequitibá-rosa, caixeta e ouriço da castanha: o primeiro, caracterizado pelo início do escorregamento; e o segundo, quando uma quantidade maior de massa fosse deslizada. Destaca-se que para o caroço do fruto do tucumã foi determinado apenas o primeiro ângulo devido à facilidade de escoamento dessa biomassa. Todos os ensaios foram feitos em duplicata.

- Ângulo de Repouso Dinâmico (cilindro rotativo): o cilindro rotativo consistiu em material acrílico de 102 mm de diâmetro e 20 mm de profundidade, acoplado a um transferidor fixado em um suporte de madeira. O material foi inserido dentro do cilindro até a metade do compartimento. Primeiro, o equipamento foi girado 10 vezes até uma linha central na posição horizontal e assim nivelada. Na sequência, o cilindro foi girado lentamente com velocidade constante a fim de verificar dois efeitos: primeiro e segundo ângulos de tombamento (jequitibá e a caixeta) e primeiro e segundo ângulos de deslizamento (ouriço da castanha do brasil e caroço do fruto do tucumã). Todos os ensaios foram feitos em triplicata.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Índice de Compressibilidade de Carr (ICC) e Razão de Hausner (RH)

Os resultados de RH e ICC estão apresentados na Tabela 3, onde se observa que estes indicadores têm efeitos diferenciados com relação ao diâmetro da partícula. Observa-se que as razões de Hausner da caixeta, do ouriço da castanha do brasil e do caroço do fruto do tucumã podem ser consideradas constantes (variação decrescente ou crescente $\leq 5\%$). Já para o jequitibá, no cilindro III manteve-se praticamente constante, e os cilindros I (aumento de 28,6%) e II

(aumento de 7,6%) houve influência na compactação das partículas. O índice de compressibilidade de Carr teve variações significativas em todos os casos, exceto para a caixeta nos cilindros I e III com variação menor de 4%.

Ângulos de repouso (AoR)

A partir dos resultados obtidos (Tabela 3), observou-se que os ângulos de repouso dinâmico (mesa basculante e cilindro rotativo) são maiores que os ângulos de repouso estático (sem base e base fixa). Isso pode ter ocorrido, pois na determinação do ângulo de repouso estático, as biomassas são descarregadas livremente ocasionando uma maior compactação da pilha.

Na análise da influência do diâmetro de partícula sobre o ângulo de repouso, observou-se que: o jequitibá-rosa apresentou um comportamento variado a depender do método usado, podendo ser atribuído ao fato das partículas serem alongadas interagindo de diferente maneira para cada cilindro usado; a caixeta teve os AoR estáticos praticamente constantes, comportamento decrescente (10%) no AoR dinâmico (mesa basculante) e constante no cilindro rotativo (1,25%); ouriço da castanha do Brasil, os ângulos de repouso estático mantiveram-se quase constantes (<6%), enquanto os AoR dinâmicos apresentaram uma tendência crescente (<11%); para o caroço do fruto do tucumã, os ângulos de repouso estático apresentaram um aumento de 12% e os ângulos de repouso dinâmico mantiveram-se constantes (<3%).

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicaram que o caroço do fruto do tucumã e o ouriço da castanha do Brasil são biomassas que apresentam boa escoabilidade. No entanto, a caixeta e o jequitibá-rosa são biomassas que possuem problemas de fluxo, apresentando baixa escoabilidade. Mediante a classificação proposta por Farias (2012), para análise da escoabilidade, tanto para RH e ICC, quanto para AoR, nem todas as classificações confirmaram essa observação empírica. Essa discordância se dá pela falta de uma padronização das metodologias e falta de uma

classificação diferenciada para cada indicador.

REFERÊNCIAS

- CARR. R. L. (1965), Classifying flow properties of solids. *Chemical Engineering*, 72 (2), 69-72.
- FARIAS, F. O. M. (2012), “Caracterização De Biomassas Brasileiras para Fins de Aproveitamento Energético”, FEQ/UNICAMP, Campinas-SP (dissertação de mestrado), 93p.
- GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; HASSANPOUR, A.; NWOKE, L. C.; WOUTERS, I.(2006), Characterization of Powder Flowability using Measurement of Angle of Repose, *China Particuology*, 4 (3-4), 104-107.
- HAUSNER, H. H. (1967), Friction Conditions is a Mass of Metal Powders. *International Journal of Powder Metallurgy*, 3 (4), 7-13.
- ILELEJI, K. E.; ZHOU B. (2008), The Angle of Repose of Bulk Corn Stover Particles. *Powder Technology*, 187, 110–118.
- MELLO, F.S.B.; TANNOUS. K. (2012) “Aproveitamento da Casca de Coco Verde (*Coco nucifera* L.) – Caracterização e Escoabilidade”, *Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, 31, 2011, Vassouras. 353-362.
- NASCIMENTO, V. F. (2012), Caracterização de Biomassas Amazônicas - Ouriço da Castanha do Brasil, Ouriço de Sapucaia e Caroço do Fruto do Tucumã em Processos de Termoconversão, FEQ/UNICAMP, Campinas-SP (dissertação de mestrado), 128p.
- RILEY N. A. (1941), Projection Sphericity. *Journal of Sedimentary Research*, 11, 94-95.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos os colegas do LaProM, e ao CNPq/PIBIC pela bolsa concedida.

Tabela 3: Dados experimentais dos índices de escoabilidade e ângulo de repouso

Biomassa	\bar{d}_p (μm)	Índices						Ângulo repouso estático ($^\circ$)		Ângulo repouso dinâmico ($^\circ$)			
		Razão de Hausner (-)			Índice de Carr (%)			Sem Base	Com base	Mesa Basculante		Cilindro Rotativo	
		Número dos cilindros						Tombamento ou Deslizamento					
		I	II	III	I	II	III			1 $^\circ$	2 $^\circ$	1 $^\circ$	2 $^\circ$
Caixeta	500	1,37	1,39	1,35	26,95	27,91	26,18	51,2	52,4	74,0	80,8	73,1	89,3
	1006	1,35	1,36	1,35	25,75	26,36	25,88	50,7	54,3	69,8	77,5	73,1	88,6
	1993	1,39	1,32	1,35	27,97	24,31	26,19	48,0	52,9	65,0	76,2	74,3	90,1
Jequitibá Rosa	494	1,54	1,58	1,85	35,06	36,81	45,92	55,9	52,1	70,4	80,3	83,2	93,1
	986	1,66	1,68	1,68	39,66	40,33	40,50	59,7	65,1	76,3	84,9	74,2	95,7
	2008	1,98	1,70	1,61	49,52	41,50	37,84	51,2	64,0	78,9	82,2	90,7	109,0
Ouriço da Castanha do Brasil	496	1,24	1,19	1,21	18,61	15,73	17,19	38,0	31,9	48,7	53,3	53,1	63,4
	989	1,22	1,18	1,16	17,74	15,10	13,92	39,0	34,2	51,5	55,8	54,0	64,4
	2080	1,17	1,13	1,16	14,40	11,86	13,94	40,1	30,1	53,8	61,5	58,2	68,3
Caroço do fruto do Tucumã	499	1,17	1,15	1,17	14,43	13,11	14,38	27,3	28,8	44,5	-	43,9	53,3
	995	1,15	1,12	1,16	13,19	10,48	13,68	31,5	30,3	43,5	-	42,3	52,4
	2019	1,11	1,09	1,13	9,85	7,85	11,46	31,2	33,1	42,8	-	43,4	54,8