

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS NUMÉRICOS DEM

P. F. SILVA¹, R. J. BRANDÃO¹, C. R. DUARTE¹ e M. A. S. BARROZO¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: patrikmotafs@hotmail.com

RESUMO – O Método Dos Elementos Discretos (DEM) é uma ferramenta numérica importante utilizada para descrever fluxos granulares. No entanto, para que a técnica seja usada de maneira adequada é necessário o conhecimento de algumas propriedades do material e de interação entre eles, como os coeficientes de atrito de rolamento, restituição e ângulo de repouso. Desta forma, esse trabalho teve como propósito testar e validar metodologias experimentais para a determinação dos coeficientes de restituição, atrito de rolamento e ângulo de repouso, necessários no DEM. Os aparatos experimentais utilizados se mostraram adequados para a medição de cada um dos coeficientes. O valor do coeficiente de restituição mostrou-se dependente da espessura do material em que as partículas estão colidindo, enquanto que o ângulo de repouso foi influenciado pelo diâmetro e densidade do material granular. Os coeficientes de atrito de rolamento foram avaliados sobre diferentes rugosidades superficiais.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da capacidade computacional faz com que o uso de métodos numéricos se torne cada vez mais vantajoso. Paralelamente aos estudos experimentais, as simulações numéricas surgem como uma ferramenta complementar na investigação dos escoamentos granulares com o intuito de superar as limitações impostas por questões de segurança nos processos e custo na confecção de equipamentos. Em princípio, o procedimento numérico pode ser abordado sob duas diferentes formas, a Lagrangeana e a Euleriana.

Na abordagem Euleriana as diferentes fases são tratadas matematicamente como contínuas e interpenetrantes. De acordo com Duarte (2006), aparece o conceito de fração volumétrica das fases, visto que o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo volume das outras. As frações de cada fase são consideradas como contínuas no espaço e no tempo, e com soma igual a um.

O método numérico frequentemente utilizado para descrever o comportamento de fluxos granulares é o método dos elementos discretos (DEM). Este instrumento numérico resulta de um balanço de forças aplicado sobre cada partícula e utiliza a segunda lei de Newton para prever o movimento das partículas de modo individual. Sendo assim, a modelagem DEM é capaz de descrever os mecanismos que governam o escoamento granular como um todo e deste modo contribui para o estudo da dinâmica de partículas.

Um dos problemas que se destaca ao utilizar a modelagem DEM é a escolha dos parâmetros de entrada no modelo. Frequentemente os valores destes parâmetros são assumidos

sem que haja justificativas apropriadas, e seu significado físico muitas vezes é ignorado. Porém, se os parâmetros não forem devidamente medidos é necessário maior cuidado na interpretação dos resultados obtidos, a fim de garantir a concordância entre a simulação e o procedimento experimental (MARIGO & STITT, 2015).

Exposta a importância desses parâmetros, este trabalho tem como objetivo determinar os parâmetros numéricos DEM a partir de uma abordagem experimental, utilizando partículas com dimensões e propriedades físicas distintas.

2. METODOLOGIA

A medição experimental dos parâmetros numéricos empregados na modelagem DEM seguiu os procedimentos padrões descritos na literatura e cada medida foi realizada em quintuplicata. A caracterização das partículas esféricas utilizadas é apresentada na Tabela 1.

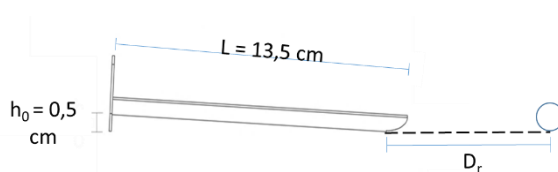
Tabela 1 – Caracterização das partículas

Partícula	Material	Diâmetro (mm)	Densidade (Kg\m³)
1	Aço 6 mm	6,0411±0,0262	7576,21±91,00
2	Aço 4 mm	4,5775±0,0117	7130,30±58,31
3	Vidro	6,5071±0,0989	2371,27±70,12
4	Plástico	6,1420±0,0517	1640,62±43,85

2.1 Coeficiente de Atrito de Rolamento

O coeficiente de atrito de rolamento foi medido conforme a norma ASTM G194-08 (2013). Por meio desta diretriz aferiu-se o coeficiente de atrito de rolamento das partículas para cada uma das superfícies. Para tal foi utilizado um dispositivo de soltura conforme é apresentado na Figura 1, no qual a partícula era inserida a partir do repouso, numa altura inicial de 0,5 cm. Devido a inclinação do dispositivo, a esfera tinha sua energia potencial convertida em energia cinética.

Figura 1 – Dispositivo para medida do coeficiente de atrito de rolamento.



Após percorrer todo o dispositivo a esfera entrava em contato com a superfície cuja interação seria avaliada, perdendo energia gradativamente, retornando ao repouso. Utilizando a Equação 1 era então determinado o valor do coeficiente.

$$\mu_R = \frac{h_0}{D_r} \quad (1)$$



Sendo μ_R o coeficiente de atrito de rolamento, h_0 a altura inicial da esfera e D_r a distância percorrida pela partícula após deixar o dispositivo até atingir seu repouso.

A rugosidade das superfícies utilizadas é apresentada na Tabela 2.

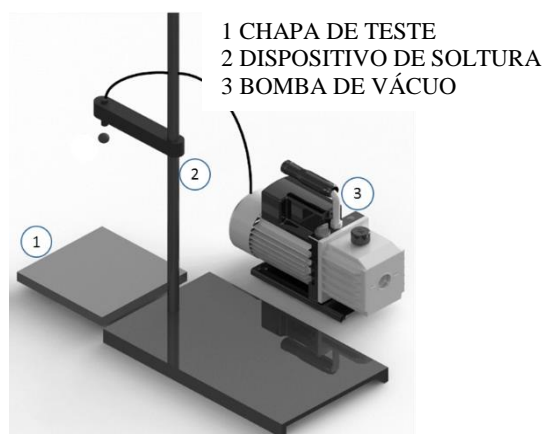
Tabela 2 – Rugosidade das superfícies utilizadas

Superfície	P40	P60	P80	P100	P120	P150	P180
Rugosidade (mm)	0,425	0,269	0,201	0,162	0,125	0,100	0,082

2.2 Coeficiente De Restituição

O coeficiente de restituição foi medido conforme a norma ASTM F1887-14 (2009). Para a realização da medida do coeficiente de restituição, utilizou-se o dispositivo apresentado na Figura 2, o qual era composto por uma chapa de teste (1), um dispositivo de soltura, composto por uma haste metálica com base quadrada (2) e na parte superior do dispositivo uma bomba de vácuo (3).

Figura 2 – Dispositivo para medida do coeficiente de restituição.



Ao interromper o vácuo, a partícula era abandonada em queda livre a uma altura fixa de 5 cm (h_1), para colidir diretamente com chapas de vidro, com espessuras que variavam de 3,0 mm até 19,0 mm.

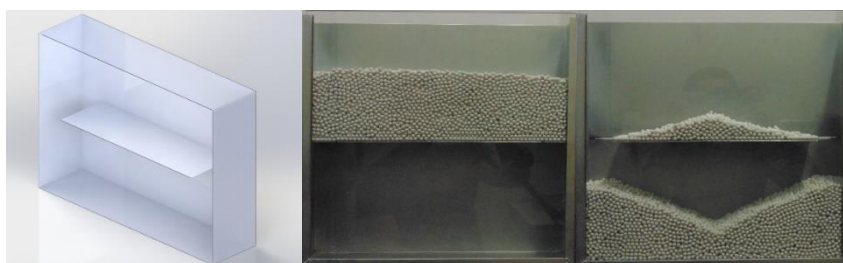
Com o auxílio de uma câmera de alta velocidade, com capacidade de captura de até 2000 quadros por segundo, todos os testes experimentais foram gravados e submetidos a análise de imagem utilizando o *software* Measure, permitindo assim a determinação da altura máxima das partículas (h_2) obtida após a colisão com as placas. Deste modo, os valores dos coeficientes de restituição (E_p) foram mensurados a partir do uso da Equação 2.

$$E_p = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (2)$$

2.3 Ângulo De Repouso

O ângulo de repouso é a inclinação medida da base de uma pilha de material granular sem que ocorra o deslizamento. Para a realização da medida do ângulo de repouso, utilizou-se a caixa de fluxo, cujo esquema é apresentado na Figura 3. Este dispositivo tem uma placa interior que divide a caixa ao meio, onde se forma a zona de estagnação de partículas. (Zhou *et al*, 1999). Nesta placa há duas saídas laterais para o escoamento de material granular. Inicialmente as partículas ficam dispostas na parte superior e o seu deslizamento para a parte inferior da caixa de fluxo ocorre quando as laterais são liberadas. Depois que o deslizamento das partículas era findado, o ângulo de repouso era aferido com o auxílio do *software* Measure. Na Figura 3 é apresentada a disposição inicial das partículas e as pilhas de material formadas.

Figura 3 – Geometria utilizada na análise dos ângulos de repouso e disposição das partículas de poliacetal.

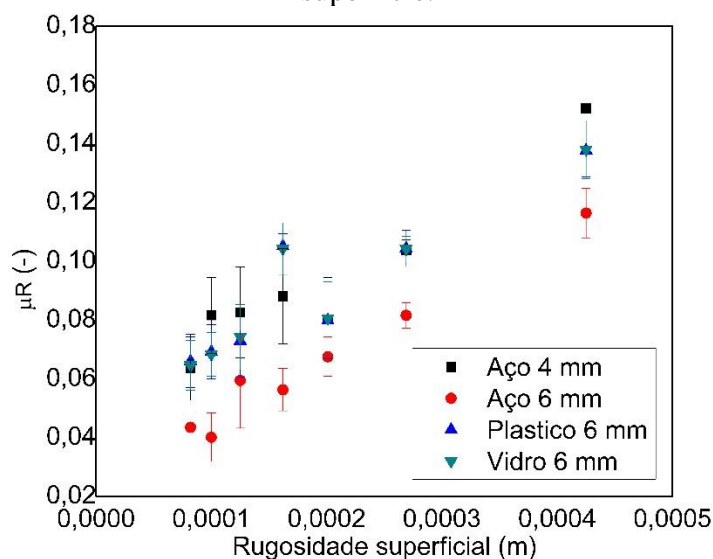


3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Coeficiente De Atrito De Rolamento

Na Figura 4 é apresentada os comportamentos do coeficiente de atrito de rolamento em função da rugosidade superficial das superfícies, para cada partícula.

Figura 4 – Comportamento do coeficiente de atrito de rolamento frente a rugosidade da superfície.

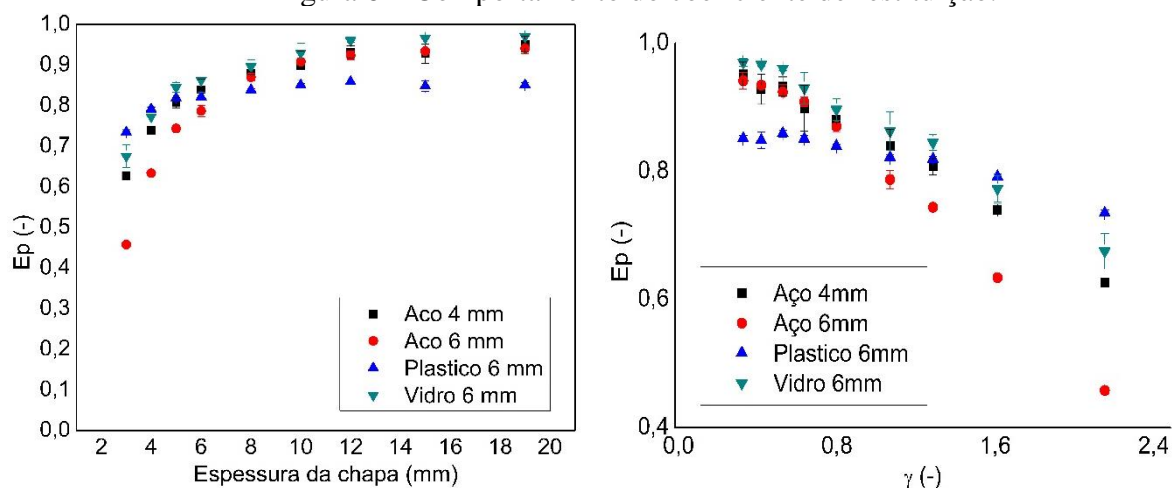


Como pode ser observado, o atrito de rolamento μ_R aumenta com o aumento da rugosidade superficial. Isto ocorre devido ao aumento da irregularidade da superfície rugosa, oferecendo maior resistência ao rolamento da partícula e consequentemente aumentando a dissipação de energia.

3.2 Coeficiente De Restituição

É possível observar que pelas informações apresentadas na Figura 6-a, as partículas tiveram comportamento semelhante entre si. Além disso, as partículas de aço e vidro tendem assintoticamente a um valor de restituição próximo de 1 para maiores espessuras, ou seja, apresentando menor dissipação de energia durante o impacto.

Figura 6 – Comportamento do coeficiente de restituição.



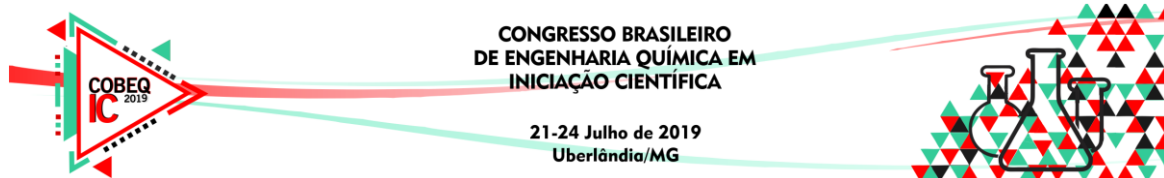
De acordo com a Figura 6-b nota-se que com o aumento de γ (razão entre o diâmetro da partícula e a espessura (L) da placa) o coeficiente de restituição diminui. Segundo Sondergaard *et al.* (1990) isso acontece porque valores de γ altos, fazem com que a energia cinética total da placa seja convertida totalmente em ondas elásticas, aumentando a dissipação de energia, diminuindo assim o coeficiente de restituição.

3.3 Ângulo De Repouso

O ângulo de repouso medido para cada uma das partículas é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado dos ângulos de repouso medidos

Partícula	Material	Ângulo de repouso
1	Aço 6 mm	$12,92 \pm 1,95$
2	Aço 4 mm	$17,42 \pm 0,75$
3	Vidro	$22,82 \pm 1,21$
4	Plástico	$15,20 \pm 1,80$



Analisando os ângulos de repouso das partículas 1 e 2, observa-se o efeito que o tamanho tem sobre esta propriedade. Quanto menor o tamanho das partículas maior o ângulo de repouso. Zhou *et al* (2002) sugerem que o efeito do tamanho está relacionado com fatores como força de coesão das partículas, atrito de rolamento, e atrito de deslizamento.

Uma provável explicação para a diferença no ângulo de repouso das partículas 1,3 e 4, que apresentam tamanhos semelhantes, reside no fato de que essas partículas apresentam coeficientes de atrito de rolamento e atrito de deslizamento diferentes. Ainda segundo Zhou *et al* (2002), os atritos de rolamento (partícula-partícula / partícula-parede) são importantes no controle do ângulo de repouso. Isso porque que um coeficiente de atrito de rolamento grande implica numa força de resistência ao movimento rotacional das esferas, diminuindo a energia cinética e interrompendo o movimento das partículas, o que leva à formação de uma pilha mais alta.

4. CONCLUSÃO

Os valores de coeficiente de restituição sofreram influência da espessura do material em que ocorria as colisões, demonstrando a necessidade do conhecimento não apenas das propriedades físicas do equipamento como também suas dimensões

O atrito de rolamento apresentou um comportamento linear com o aumento da rugosidade superficial, fenômeno justificado pela intensificação das irregularidades, o que promove mais dissipação de energia.

A força de coesão e os atritos de rolamento e deslizamento (partícula-partícula e partícula-parede) são fatores com grande influência no controle do movimento de translação e rotação das partículas, e, portanto, influenciam diretamente na formação da pilha. O ângulo de repouso aumenta com a diminuição do tamanho da partícula e também aumenta com o aumento dos coeficientes de atrito de rolamento e deslizamento.

5. REFERÊNCIAS

- DUARTE, C.R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro. PPGEQ/Faculdade de Engenharia Química da UFU, Uberlândia-MG. (Tese de Doutorado), 194 p., 2006.
- MARIGO, M.; STITT, E. H. Discrete element method (DEM) for industrial applications: Comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 32, n. 32, p. 236–252, 2015.
- SONDERGAARD, R.; CHANEY, K.; BRENNEN, C. E. Measurements of Bouncing Off Flat Plate. *Journal of Applied Mechanics*, v. 112, n. 90, p. 694–699, 1990.
- ZHOU, Y.C., XU, B.H., YU, A. B., ZULLI, P. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. *Elsevier. Powder Technology* 125. pp. 45-54, 2002.
- ZHOU, Y.C.; WRIGHT, B. D.; YANG, R. Y.; XU, B. H.; YU, A. B. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation. *Powder Technology*, Australia, Vol. 269, pp. 536-553, 1999.