

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS COEFICIENTES DE ATRITO NO ÂNGULO DE REPOUSO DE DIFERENTES PARTÍCULAS

J. P. F. CAMPOS¹, K. R. B. MELO¹ e G. C. LOPES¹

Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: jaofcampos@gmail.com

RESUMO – O acoplamento CFD-DEM tem sido um importante facilitador no desenvolvimento e compreensão de equipamentos e processos nas mais variadas áreas aplicadas de sistemas particulados, como na filtração e ventilação industrial. A calibração de parâmetros do material particulado tem grande impacto na precisão das simulações desta abordagem, e, dependendo da quantidade de variáveis, pode ser um procedimento custoso. O presente trabalho visa propor um método para avaliar a sensibilidade do ângulo de repouso de diferentes partículas em um sistema específico, variando-se os coeficientes de fricção da fase sólida. Para isso, foi utilizado o código computacional CFDEM@coupling. As simulações reproduziram experimentos que consistiram em um aglomerado de partículas esféricas que entra em colapso no interior de uma caixa e consequente aferição de seu ângulo de repouso. Ao final de uma análise de significância, concluiu-se que, para ambos materiais, Nenhum dos coeficientes de fricção pode ser descartado caso o sistema fosse calibrado, sendo a fricção de deslizamento partícula-parede a de maior impacto.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas sólido-fluido estão presentes em diversas áreas da indústria química. Neste contexto, é cada vez maior a importância de métodos computacionais para a compreensão das interações que ocorrem nesses sistemas. Uma das abordagens usadas para estudar este tipo de sistema é o acoplamento CFD-DEM, em que o fluido é modelado por técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) e a fase sólida pelo método dos elementos discretos (DEM).

Nessas simulações, a calibração de parâmetros do material particulado é tida com um obstáculo devido a imprecisões nos modelos de interação (Yan *et al.*, 2015), que podem produzir resultados incorretos para os valores inseridos. Um método de calibração é a comparação entre o comportamento experimental e simulado de aglomerados de material particulado (*bulk*), através da medida do ângulo de repouso, por exemplo (Marigo e Stitt, 2015; Lima, 2017). Este parâmetro é usado em aplicações variadas na indústria, como por exemplo, em medidas de escoabilidade de açúcares granulares.

No entanto, esse tipo de levantamento pode ser custoso quando há uma grande quantidade de coeficientes a serem testados, podendo ser otimizado quando as variáveis de impacto perceptível na resposta são conhecidas. Dessa forma, faz-se necessária uma análise

de significância de parâmetros. Diante disso, este trabalho teve como objetivo determinar o ângulo de repouso por experimentos e simulações. Além disso, avaliaram-se a significância dos coeficientes de fricção na resposta do ângulo de repouso a partir de um planejamento fatorial.

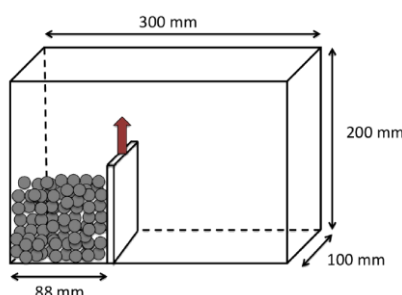
2. METODOLOGIA

2.1. Procedimento Experimental

Partículas de ABS (acrilonitrila butadieno estireno) com cerca de 6 mm de diâmetro foram usadas em sua forma natural, além de recobertas com uma camada fina de borracha, conforme o procedimento descrito por Lopes et al. (2018). Os parâmetros de módulo de Young e coeficiente de restituição medidos experimentalmente por Lopes et al. (2018) foram usados como dados de entrada nas simulações. A determinação do ângulo de repouso foi realizada em uma câmara de acrílico com as dimensões indicadas na Figura 1. Uma placa também de acrílico separou o compartimento das partículas do restante da câmara. Uma quantidade de partículas de aproximadamente 1 kg foi despejada neste compartimento e então, a placa de acrílico foi retirada, de modo que as partículas deslizassem e formassem um perfil unilateral.

A posição das partículas antes e após a retirada da placa de contenção foi fotografada e o ângulo de repouso foi medido com auxílio do software ImageJ. A altura das partículas foi integrada numericamente ao longo da posição horizontal, obtendo-se uma curva ajustada para um polinômio de grau dois. A equação foi derivada em relação a posição horizontal produzindo uma equação linear, para a qual o arcotangente do coeficiente angular corresponde ao ângulo de repouso aproximado.

Figura 1. Representação do aparato experimental



2.2. Procedimento Numérico

O procedimento experimental foi reproduzido nas simulações, as quais foram feitas no software aberto CFDEM[®] coupling que consiste em um acoplamento entre os códigos abertos OpenFoam[®] (CFD) e LIGGGHTS[®] (DEM). O pós-processamento dos dados e geração de imagens da massa de partículas colapsada foram realizados no código aberto ParaView. As características elásticas das paredes foram consideradas iguais as das partículas, apresentadas na Tabela 1 juntamente com as propriedades do fluido que preenche a caixa.

Tabela 1 – Propriedades físicas e elásticas dos materiais inseridos na simulação.

	Densidade (kg/m ³)	Diâmetro (mm)	Módulo de Young (Pa)	Coefficiente de restituição
ABS sem Recobrimento	1965	5,87	7,44x10 ⁸	0,779
ABS com Recobrimento	1913	5,96	5,67x10 ⁸	0,735
Ar	1,230	-	-	-

Fonte: Lopes *et al.*, 2018

Um planejamento experimental fatorial foi construído para efetuar a análise estatística. Cada tipo de partícula teve quatro fatores avaliados: os coeficientes de fricção de deslizamento partícula-partícula e partícula-parede, e os coeficientes de fricção de rolamento partícula-partícula e partícula-parede. Cada fator recebeu 2 subníveis, resultando em 16 simulações para cada material. A Tabela 2 contém os subníveis definidos de cada coeficiente, em que PP indica as interações partícula-partícula e PW, as interações partícula-parede.

Tabela 2 – Subníveis de cada fator analisado.

Partícula	Subnível	Fricção de Desl. PP	Fricção de Desl. PW	Fricção de Rol. PP	Fricção de Rol. PW
Sem recobrimento	Superior	0,4	0,4	0,080	0,080
	Inferior	0,1	0,1	0,003	0,003
Com recobrimento	Superior	0,6	0,6	0,100	0,100
	Inferior	0,1	0,1	0,003	0,003

O passo de tempo utilizado foi de 10⁻⁵ s para a fase Lagrangiana e 10⁻³ s para a Euleriana, ocorrendo o acoplamento a cada 100 passos de tempo do LIGGGHTS em 2 s de simulação. A malha foi gerada a partir de subdivisões de igual espaçamento, sendo um total de 30 ao longo do comprimento, 17 na largura e 45 na altura, resultando em 22950 células.

As imagens geradas (após o colapso) foram analisadas de modo semelhante aos ensaios experimentais utilizando o software livre ImageJ, que forneceu dados de altura das partículas ao longo do comprimento em pixels para que o perfil do aglomerado de material fosse obtido. Em seguida, a altura das partículas foi integrada numericamente ao longo da posição horizontal, resultando em uma curva que se aproxima de um polinômio de grau dois. Os resultados foram tratados no software STATISTICA®, obtendo-se dados da contribuição dos efeitos de cada fator a um nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

Os ângulos de repouso aferidos experimentalmente são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Ângulo de repouso experimental de cada material.

	ABS sem recobrimento	ABS com recobrimento
Ângulo de repouso (°)	9,8 ± 1,1	20,1 ± 1,2

O ângulo consideravelmente maior das partículas com recobrimento indica que possivelmente os coeficientes de atrito envolvidos são superiores aos das partículas não recobertas.

Os coeficientes de atrito de cada simulação do planejamento e os respectivos ângulos de repouso obtidos são apresentados nas Tabelas 3 e 4 para as partículas sem e com recobrimento, respectivamente. Nestas tabelas, PP indica as interações partícula-partícula e PW, as interações partícula-parede.

Tabela 3 – Coeficientes de atrito e ângulo de repouso de cada simulação para as partículas sem recobrimento

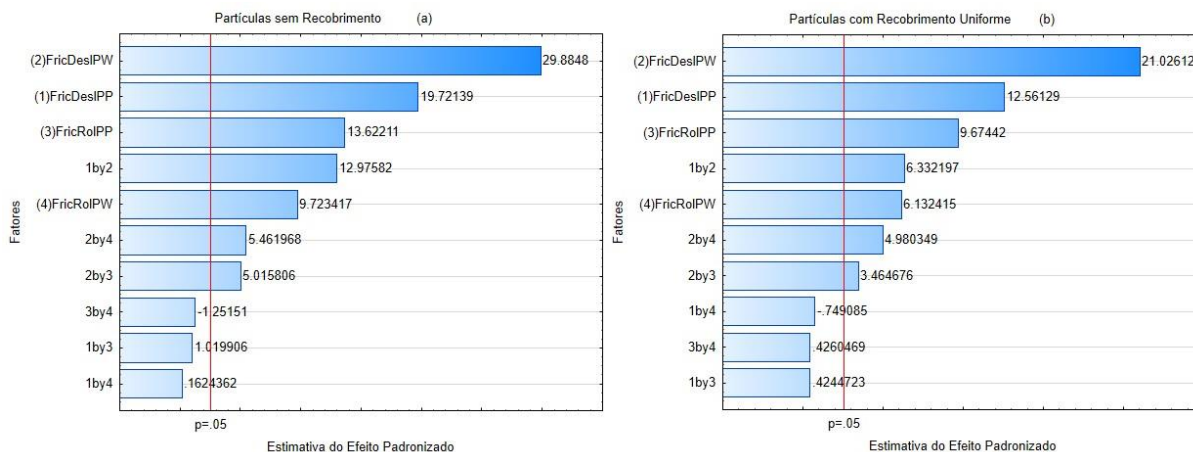
Exp	FricDeslPP	FricDeslPW	FricRolPP	FricRolPW	Ângulo (°)
1	0,1	0,1	0,003	0,003	5,17
2	0,4	0,1	0,003	0,003	6,59
3	0,1	0,4	0,003	0,003	6,53
4	0,4	0,4	0,003	0,003	12,24
5	0,1	0,1	0,080	0,003	7,02
6	0,4	0,1	0,080	0,003	8,33
7	0,1	0,4	0,080	0,003	10,14
8	0,4	0,4	0,080	0,003	15,68
9	0,1	0,1	0,003	0,08	6,42
10	0,4	0,1	0,003	0,08	7,37
11	0,1	0,4	0,003	0,08	9,65
12	0,4	0,4	0,003	0,08	14,94
13	0,1	0,1	0,080	0,08	7,61
14	0,4	0,1	0,080	0,08	8,75
15	0,1	0,4	0,080	0,08	12,01
16	0,4	0,4	0,080	0,08	18,86

Tabela 4 - Coeficientes de atrito e ângulo de repouso de cada simulação para as partículas com recobrimento uniforme

Exp	FricDeslPP	FricDeslPW	FricRolPP	FricRolPW	Ângulo (°)
1	0,1	0,1	0,003	0,003	5,01
2	0,1	0,1	0,100	0,003	6,89
3	0,1	0,1	0,003	0,100	6,01
4	0,1	0,1	0,100	0,100	7,33
5	0,1	0,6	0,003	0,003	6,94
6	0,1	0,6	0,100	0,003	11,00
7	0,1	0,6	0,003	0,100	10,49
8	0,1	0,6	0,100	0,100	14,17
9	0,6	0,1	0,003	0,003	7,01
10	0,6	0,1	0,100	0,003	9,32
11	0,6	0,1	0,003	0,100	7,22
12	0,6	0,1	0,100	0,100	9,05
13	0,6	0,6	0,003	0,003	13,29
14	0,6	0,6	0,100	0,003	15,97
15	0,6	0,6	0,003	0,100	15,29
16	0,6	0,6	0,100	0,100	20,42

As Figuras 2a e 2b expõem os resultados da análise de influência de cada fator na forma de diagramas de Pareto. A linha vertical vermelha representa um nível de significância de 5% e os fatores denotados por “XbyY” indicam a interação entre dois coeficientes de fricção.

Figura 2 – Efeitos de cada fator sobre o ângulo de repouso



Pelos gráficos de pareto, observam-se que todas as forças de fricção são significativas, sendo o coeficiente de atrito de deslizamento partícula-parede o de maior influência para os dois tipos de material. Como a massa de partículas está confinada em uma caixa, grande parte delas estão em contato constante com as paredes ao longo de seu colapso resultando no impacto significativo desta força. Nesta situação, nenhum dos coeficientes avaliados poderia ser descartado em um estudo de calibração das simulações.

Os fatores cujos efeitos ficaram à esquerda do nível de significância foram desconsiderados nos modelos de regressão linear do ângulo de repouso em função de variáveis codificadas (entre -1 e 1), apresentados nas Equações 1 (partículas sem recobrimento) e 2 (partículas com recobrimento). As variáveis μ_x correspondem aos coeficientes de fricção conforme enumeração apresentada nos gráficos de Pareto.

$$A^\circ = 9.83287 + 1.76436\mu_1 + 2.67362\mu_2 + 1.21869\mu_3 + 0.869897\mu_4 + 1.16087\mu_1\mu_2 + 0.448735\mu_2\mu_3 + 0.48856\mu_2\mu_4 \quad (1)$$

$$A^\circ = 10.3379 + 1.85776\mu_1 + 3.10966\mu_2 + 1.4308\mu_3 + 0.906955\mu_4 + 0.936502\mu_1\mu_2 + 0.512409\mu_2\mu_3 + 0.73657\mu_2\mu_4 \quad (2)$$

A partir dos modelos de regressão é possível inferir a variação do ângulo de repouso com cada parâmetro. A resposta do ângulo é diretamente proporcional aos coeficientes de fricção, e aumenta com maior intensidade conforme aumenta-se o coeficiente de fricção de deslizamento partícula-parede.

A comparação dos resultados do ângulo de repouso das simulações com os valores obtidos nos testes experimentais indica que a simulação de número 7 (para as partículas sem recobrimento), e a simulação de número 16 (para as partículas recobertas) apresentaram resultados mais próximos aos experimentais. Este resultado aponta que a camada de borracha aplicada teve grande influência nos coeficientes de atrito do material, já que as características

físicas dos dois tipos de partícula não tiveram grande variação. O estudo de Yan *et al.* (2015) apontou que o módulo de Young e o coeficiente de restituição não são significativos na resposta do ângulo de repouso em simulações feitas no LIGGGHTS, por isso estes parâmetros não foram investigados no presente estudo.

4. CONCLUSÕES

O procedimento para estimar estatisticamente a significância de parâmetros mostrou-se simples em relação ao custo necessário para realizar a calibração de todos os coeficientes de um sistema hipotético. Para o caso analisado, nenhum dos fatores incluídos no planejamento pôde ser descartado para eventuais calibrações do sistema que mostrou uma forte dependência dos coeficientes de fricção, sendo o fator de atrito de deslizamento partícula-parede o de maior influência para o sistema estudado.

As simulações foram capazes de produzir resultados próximos aos observados experimentalmente em algumas combinações dos coeficientes de fricção. Isso não indica, no entanto, que esses são os valores reais desses parâmetros, uma vez que outras forças que não as de atrito podem ter influenciado no experimento, como forças de adesão para as partículas recobertas por borracha, por exemplo.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - Projeto 2016/06548-6.

6. REFERÊNCIAS

- LOPES, G. C.; BI, X.; EPSTEIN, N.; BALDWIN, S.; GRACE, J. R. Hydrodynamic characteristics of particles with different roughness and deformability in a liquid fluidized bed. *Chem. Eng. Sci.*, v. 185, p. 50-63, 2018.
- YAN, Z.; WILKINSON, S. K.; STITT, E. H.; MARIGO, M. Discrete element modeling (DEM) input parameters: understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Comp. Part. Mech.*, v. 2, p. 283-299, 2015.
- 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 Part. J.*, v. 32, p. 236-252, 2015.
- LIMA, R. M. Estudo da dinâmica de partículas em tambores rotatórios empregando a abordagem numérica lagrangeana. Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia – UFU. Uberlândia/MG, 2017.