



DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO COMO PARÂMETRO DE ENTRADA EM SIMULAÇÃO DEM DE UM MOINHO DE BOLAS.

I. F. M. MEDEIROS¹, M. V. C. MACHADO¹, C. R. DUARTE¹, M. A. S. BARROZO¹.

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: ignacio.felipe72@gmail.com

RESUMO – O uso de simulações numéricas para a representação de fenômenos físicos tem sido empregado em vários campos da sociedade, dentre eles a engenharia. A abordagem DEM, ou Lagrangeana se mostra bastante útil no contexto da Engenharia Química, considerando que seus modelos contribuem para estimar parâmetros de desempenho de equipamentos industriais. Para o bom funcionamento desse tipo de simulação, são demandados parâmetros de entrada, dentre os quais se encontra o coeficiente de restituição (COR), uma medida dissipação de energia envolvida na colisão entre dois corpos. Esse trabalho visa determinar experimentalmente o coeficiente de restituição e avaliar sua influência na simulação numérica da dinâmica de corpos moedores de um moinho simulado via abordagem Lagrangeana usando o resolvidor LIGGGHYS. Usando-se a metodologia da queda livre, foi observada a diminuição do COR com o aumento da altura de soltura e a influência do mesmo nos níveis de energia em uma simulação DEM.

1. INTRODUÇÃO

As simulações computacionais vêm se tornando cada vez mais comuns por conta do crescente progresso na capacidade de processamento dos computadores. Por meio dessas simulações é possível, por exemplo, representar fenômenos físicos por meio da simulação numérica de modelos, o que permite analisar elementos críticos e estimar medidas de desempenho.

O Método dos Elementos discretos (DEM) é uma abordagem bastante empregada quando se pretende avaliar o comportamento de partículas de forma individual. Também conhecida como abordagem Lagrangeana, esse tipo de simulação considera um número finito de partículas, onde cada uma de suas interações, seja com outras partículas ou com a região de contorno, são acompanhadas, sendo aplicado o respectivo balanço de forças por meio de um algoritmo de *time-stepping*. Dessa maneira, é possível obter informações importantes, qualitativas e quantitativas, a nível macro e microscópico do processo (Santos *et al.*, 2016).

Contudo, o DEM necessita da especificação de parâmetros entrada nos modelos numéricos, como, por exemplo, o coeficiente de restituição (COR). Este parâmetro é uma medida da energia dissipada após uma colisão e a obtenção deste parâmetro é possível por meio de um processo de calibração. No entanto, este é um processo exaustivo e os valores resultantes podem não apresentar uma coerência física (Chung, Ooi, 2008). Dessa forma, observa-se a necessidade da obtenção experimental dos mesmos para uma maior confiabilidade nos resultados da simulação.

A adequada especificação do coeficiente de restituição é de grande importância em processos de elevada interação entre as partículas. O processo de moagem é um excelente exemplo onde a dissipação de energia vai afetar o desempenho da operação. O evento de quebra será resultado da quantidade de colisões eficientes e energéticas, capazes de fraturar o material (Metzger, Glasser, 2013). Normalmente, a moagem é realizada em moinhos cilíndricos, onde a colisão entre os corpos moedores e o material a ser moído é também função de condições operacionais, como velocidade de rotação, entre outros.

Sendo assim, este trabalho objetivou medir experimentalmente o coeficiente de restituição de esferas empregadas como corpos moedores com diferentes diâmetros, aplicando-se a técnica de soltura em queda-livre para diferentes alturas de soltura. Com os valores de COR obtidos, foi investigado como estes influenciaram no número de colisões e na energia de colisão no interior de um moinho de bolas.

2. METODOLOGIA

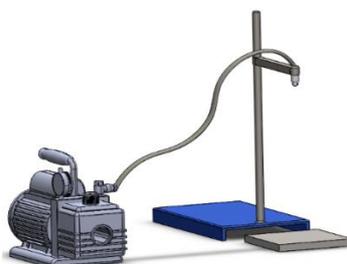
2.1 Medida do COR experimental por queda livre

Neste trabalho foi utilizada a metodologia de queda livre para a determinação experimental do COR, que consiste no abandono da partícula de uma determinada altura sobre uma superfície plana, conforme a conceito de raio infinito (Foerster *et al.*, 1994) Considerando que a resistência do ar pode ser desprezada e as respectivas conversões de energia potencial gravitacional em energia cinética, antes e após o impacto, obtém-se a correlação representada na equação 1:

$$e = \sqrt{\frac{H_1}{H}} \quad (1)$$

sendo H a altura em que a partícula é abandonada e H₁ altura máxima que a mesma atinge após o impacto. A Figura 1 apresenta o aparato experimental utilizado para a medida do COR por queda livre, no qual a altura com relação à superfície de impacto (H) foi variada entre 50, 100, 150 e 200 mm.

Figura 1 - Aparato experimental para determinação do COR



Uma câmera de alta velocidade, com capacidade de captura de até de 2000 quadros/s foi utilizada na determinação das alturas de soltura, do momento do impacto e da altura máxima após o ressalto. Além disso, visando analisar as influências do tamanho do material no COR, variou-se tanto os diâmetros das esferas utilizadas no experimento, quanto a espessura das superfícies planas, conforme representado na Figura 2:

Figura 2 - a) Esferas de aço-cromo, b) Superfícies planas de aço-cromo



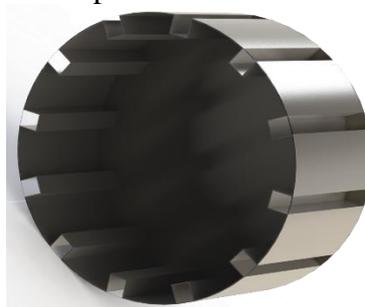
Os testes foram realizados entre os diâmetros de partícula e espessura de superfície plana de mesmo valor, com 5 repetições para cada altura de soltura (H).

2.2. Simulação: Método dos Elementos Discretos (DEM)

A metodologia DEM baseia-se na aplicação da Segunda Lei de Newton para descrever a posição e a trajetória de cada partícula, e em uma lei de força-deslocamento para quantificar as forças de interação/contato que causam o movimento das mesmas. O modelo não-linear de Hertz-Mindlin foi modelo de contato utilizado neste trabalho e mais detalhes sobre a formulação deste modelo pode ser encontrado no estudo de Di Renzo e Di Maio (2004).

Após a obtenção dos valores de COR medidos por queda livre, foi avaliada a influência desse parâmetro na quantidade de colisões e na energia despendida no processo de moagem em tambor rotatório. Para isto, foi simulado um moinho com 12 suspensores, conforme indicado na Figura 3, preenchido com 20% do seu volume total com esferas de aço-cromo com dimensões e propriedades físicas equivalentes às utilizadas na medida experimental do COR. Considerou-se nas simulações numéricas valores de coeficiente de restituição na faixa entre o maior e o menor valor de COR obtido experimentalmente à diferentes alturas de soltura. Estas medidas foram tomadas em velocidades de rotação iguais a 10, 30 e 50 rpm. O software EDEM[®] foi empregado na realização das simulações.

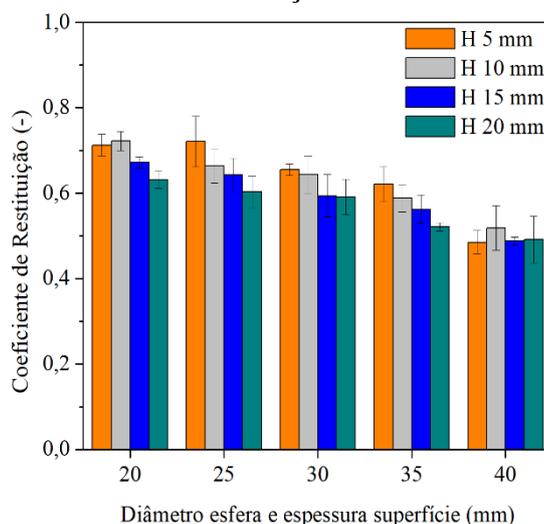
Figura 3 - Moinho cilíndrico utilizado nas simulações DEM, com diâmetro de 30 cm e comprimento de 10 cm.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia da queda livre permitiu a obtenção do COR para as colisões entre esferas cujo diâmetro é igual à espessura da superfície plana, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 - COR medidos das esferas de aço-cromo à diferentes alturas de soltura

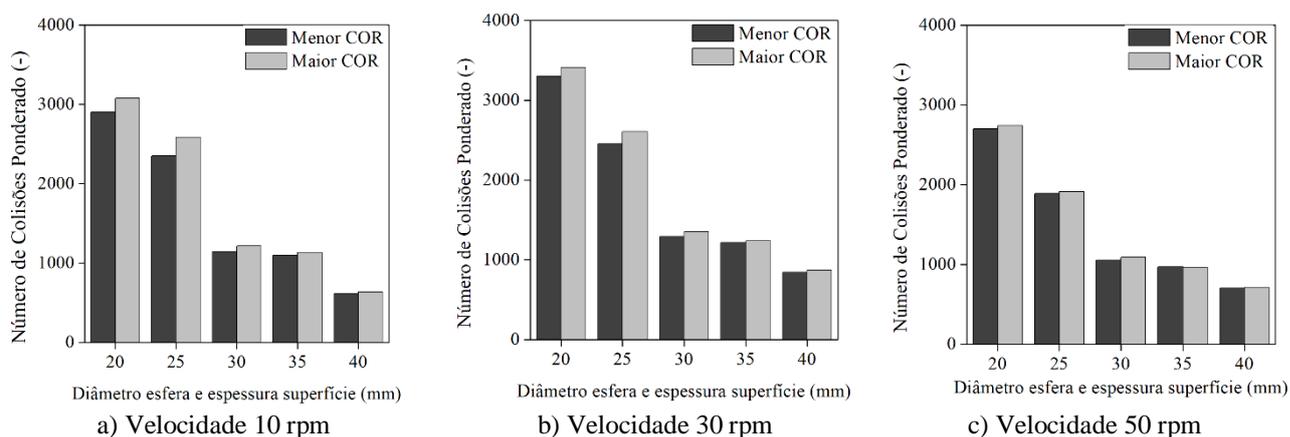


É possível perceber a influência da altura de soltura nas combinações de diâmetro de esferas e espessura de superfícies de 20mm a 35mm, sendo que o aumento de H implica diretamente numa leve diminuição do COR, o que não acontece para a combinação de 40mm, cujo COR se mantém constante para as variações de H.

Analisando-se uma mesma altura de soltura H, pode-se notar uma tendência de redução do COR com o aumento gradativo da espessura da superfície e diâmetro da esfera. Os trabalhos de Aryaei *et al.* (2010) e Sondergaard *et al.* (1990) abordam a deformação plástica da superfície mais eficiente como um mecanismo de dissipação de energia, dessa forma, partículas com maior diâmetro tendem a apresentar um menor COR em razão da diminuição da energia restaurada na restituição da partícula.

Simulações DEM foram realizadas a fim de verificar como os valores medidos de COR influenciam na eficiência da moagem, através da análise do número de colisões e na energia de colisão dos corpos moedores. Estas respostas foram analisadas na interação das esferas entre si e com a parede interna do moinho. A Figura 5 apresenta os resultados de número de colisões totais ponderado pela quantidade de esferas para um mesmo enchimento, a diferentes velocidades de rotação.

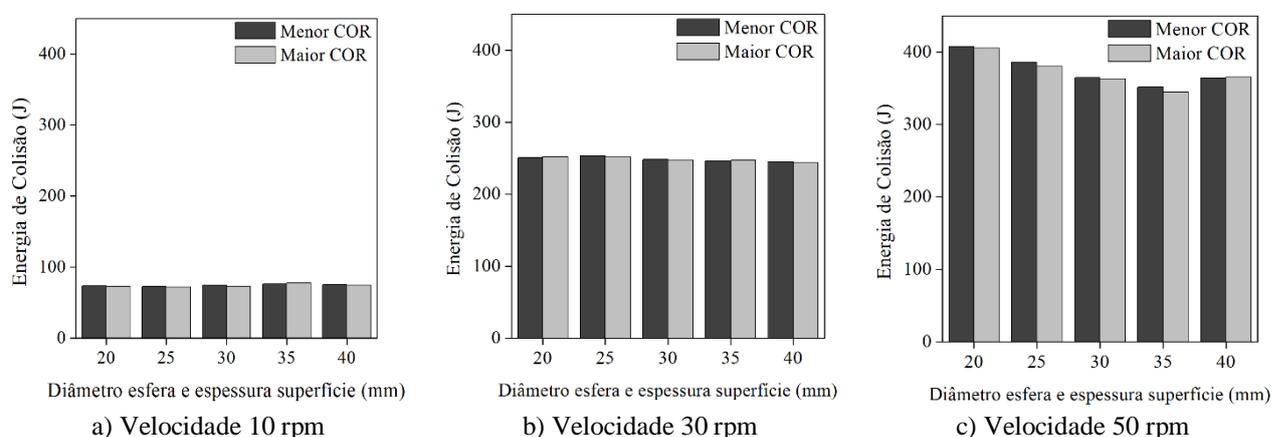
Figura 5 - Número de colisões ponderado considerando o maior e menor valor de COR medidos.



Pela Figura 5, é possível observar que o aumento do valor do COR, leva a um aumento no número de colisões. Isto é explicado pela menor quantidade de energia que é dissipada por um elevado valor de COR, no qual as esferas terão mais energia disponível para se movimentarem e, conseqüentemente, se colidirem mais. Além disso, nota-se que à medida que se aumenta o tamanho das esferas, o número de colisões diminui, já que partículas menores apresentam uma maior área superficial em comparação com um volume igual de esferas maiores (Puyvelde *et al.*, 1999). Observa-se também que a velocidade tem pouca influência no número de colisões, pois todas as esferas encontram-se no mesmo regime de escoamento a cada velocidade, a saber rolamento, cascata e catarata, respectivamente.

A Figura 6 apresenta os resultados da energia de colisão das esferas de moagem num mesmo enchimento e a diferentes velocidades de rotação.

Figura 6 - Energia envolvida em todas as colisões considerando o maior e menor valor de COR medidos.



Através da Figura 6, pode-se verificar que somente a velocidade de rotação influencia claramente na energia de colisão, dado que a maior velocidade de 50 rpm resulta numa maior energia de colisão. Isto é explicado pelo fato de que nesta velocidade as esferas encontram-se no regime de catarata e são cada vez mais arrastadas pelos suspensores a maiores alturas, caindo sobre o leito com maior energia. Ainda, observa-se que o COR não apresenta uma influência nítida na energia de colisão entre os corpos moedores entre si e com a parede do moinho. Da mesma forma, o tamanho da esfera parece não afetar na energia de colisão.

4. CONCLUSÃO

Utilizando a metodologia da queda livre, foi possível estabelecer experimentalmente valores de COR para combinações de esferas e superfícies planas cujos diâmetros e espessuras possuem o mesmo valor. Percebe-se uma leve redução do COR com o aumento da altura de soltura H, exceto para a o par de 40mm. Além disso, observa-se a diminuição do COR com quando se aumenta o diâmetro das partículas e espessura da superfície plana.

Ademais, foi analisado como os valores de COR obtidos experimentalmente influenciaram no número de colisões totais e na energia de colisão dos corpos moedores no interior de um moinho de bolas. Pôde ser observado que os diferentes valores de COR não influenciaram na energia de colisão, mas apenas no número de colisões, no qual o maior valor de COR resultou em um maior número de colisões. Isto evidencia o cuidado que deve ser tomado ao especificar o COR, parâmetro de entrada na simulação DEM, para que este represente a



realidade do ambiente interno do moinho de bolas e não mascare resultados importantes ao desempenho da moagem.

5. REFERÊNCIAS

- ARYAEI, A.; HASHEMNIA, K.; JAFARPUR, K. Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37 (10) p.1037-1044, 2010.
- CHUNG, Y.C.; OOI, J.Y. Influence of discrete element method parameters on bulk behavior of a granular solid under confined compression. *Particulate Science and Technology*, v. 26, n. 1, p.83-96, 2008.
- DI RENZO, A.; DI MAIO, F.P. Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. *Chemical Engineering Science*, v. 59, n. 3, p. 525–541, 2004
- FOERSTER, S.F.; LOUGE, M.Y.; CHANG, H.; ALLIA, K. Measurements of the collision properties of small spheres. *Physics of Fluids*, v. 6, n. 3, p. 1108-1115, 1994.
- METZGER, M.J.; GLASSER, B.J. Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill, *Powder Technology*, v. 237, p.286-302, 2013.
- SANTOS, D.A.; BARROZO, M.A.S.; DUARTE, C.R.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM. *Advanced Powder Technology*, v. 27, p. 692-703, 2016.
- SONDERGAARD, R.; CHANEY, K.; BRENNEN, C. E, Measurements of bouncing off flat plate. *Journal of Applied Mechanics*, Vol 112 (90), p. 694–699, 1990.
- VAN PUYVELDE, D.R.; YOUNG, B.R.; WILSON, M.A., SCHMIDT.; S.J. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis, *Powder Technology*, v. 106, p. 183–191, 1999.