



## 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

### **AValiação de Índices de escoabilidade de pós obtidos a partir da secagem de suspensões em leitos de jorro**

**ESCUDEIRO\*<sup>1</sup>, R. L.; FERREIRA<sup>2</sup>, M. C.**

<sup>1</sup>Aluno do DEQ/UFSCar    <sup>2</sup>Professora do DEQ/UFSCar  
Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos  
Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, 13565-905, SP  
Email: mariaf@ufscar.br

**RESUMO** – Os pós constituem uma importante gama de matérias-primas para muitas indústrias e problemas de escoamento e interrupções de fluxo podem implicar na diminuição da eficiência dos processos em que estão envolvidos. Desse modo, prever o comportamento de um determinado pó durante o escoamento é útil do ponto de vista tecnológico. Neste trabalho, o objetivo foi a determinação de propriedades físicas e de índices de escoabilidade de pós produzidos a partir da secagem de suspensões. Foram determinadas a distribuição granulométrica e o teor de umidade dos pós, fatores que afetam a escoabilidade, bem como o ângulo de repouso, as densidades *bulk* aerada e compactada e o índice de Hausner. Os materiais avaliados foram o ovo em pó, o carbonato de cálcio e um pó obtido a partir da secagem de resíduos de esgoto doméstico, com diâmetros entre 69,8 e 5,52  $\mu\text{m}$ . As densidades *bulk* aeradas variaram entre 0,285 e 0,387  $\text{g/cm}^3$  e as compactadas entre 0,437 e 0,689  $\text{g/cm}^3$ . De acordo com os índices de Hausner, entre 1,53 e 1,82, os três materiais foram classificados como de escoamento difícil. Porém com base nos ângulos de repouso, entre 44° e 50°, o pó de ovo foi classificado como de escoamento médio e os demais como de escoamento difícil.

Palavras chave: densidades *bulk*, ângulo de repouso, índice de Hausner.

### **INTRODUÇÃO**

Os produtos na forma de pós são matérias-primas muito utilizadas em diversos tipos de indústrias, como por exemplo, as alimentícias, farmacêuticas e de cerâmica. O correto dimensionamento de processos e equipamentos neles envolvidos depende diretamente do conhecimento das propriedades físicas dos sólidos particulados utilizados.

Por serem muitas vezes matérias-primas baratas e de baixo valor agregado, tais produtos atraem poucos investimentos em melhoria e inovação tecnológicas. Fitzpatrick e Ahrné (2005) avaliam que esta é uma visão equivocada, já que a melhoria no processamento seria o caminho para resolver problemas recorrentes em indústrias, aumentar a eficiência do processo e o valor agregado dos produtos.

\*Bolsista PIBIC/CNPq

Entre as propriedades físicas que caracterizam um material particulado podem se listar as associadas às partículas individuais, como dimensões e massa específica; e as associadas ao conjunto de partículas, como distribuição de tamanhos, densidades *bulk*, ângulo de repouso, condutividade térmica efetiva e capacidade calorífica, entre outras. O conjunto de partículas mais o espaço vazio entre elas - que pode ser preenchido por ar ou outro fluido qualquer - constitui o que denominamos um meio poroso. Tanto as propriedades das partículas como as do meio poroso (propriedades *bulk*) afetam operações importantes de processamento, tais como o transporte e descarga dos pós. O escoamento de um material particulado, por exemplo, só ocorrerá se as partículas que o compõem vencerem as forças de coesão e de atrito entre si. Essas forças variam de intensidade de acordo com as propriedades das partículas, como a forma, tamanho, distribuição de tamanhos, teor de umidade, e rugosidade superficial (Campos e Ferreira, 2013). Alguns critérios para avaliação da escoabilidade são baseados em propriedades que podem ser determinadas experimentalmente, a partir de medidas relativamente simples, como por exemplo o ângulo de repouso (Abdullah e Geldart, 1999) e as densidades *bulk* aeradas e compactadas, cuja razão define o índice de Hausner (Mallol *et al.*, 2008).

Neste trabalho, o objetivo foi avaliar propriedades de escoabilidade de diferentes pós obtidos no Centro de Secagem do DEQ/UFSCar a partir da secagem de suspensões em leito de jorro. As propriedades determinadas foram o ângulo de repouso, as densidades *bulk* aerada e compactada e o índice de Hausner. A distribuição granulométrica e teor de umidade de cada material também foram determinados, já que ambos influenciam a escoabilidade.

## METODOLOGIA

As técnicas utilizadas para a determinação das propriedades desejadas são descritas a seguir.

### Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos materiais particulados foi obtida através da técnica de difração de laser, em equipamento Malvern Mastersizer MAF 5001, com dispersão dos pós em via úmida. As medidas foram realizadas em triplicatas para cada um dos materiais analisados.

### Teor de umidade

O teor de umidade em base úmida dos pós foi determinado pelo método gravimétrico, mantendo-se as amostras em estufa a 105°C por 24 h.

### Densidades *bulk* aerada e compactada

A densidade *bulk* aerada foi obtida pela deposição, por gravidade, de uma massa previamente determinada do material particulado no interior de uma proveta graduada. A densidade foi calculada através da razão entre a massa do material e o volume ocupado por ele. Para a determinação da densidade *bulk* compactada, após a deposição do material particulado dentro do recipiente, foram realizadas movimentações mecânicas para a sua compactação, utilizando o dispositivo mostrado na Figura 1.



**Figura 1 – Aparelho para medição das densidades *bulk***

A compactação do material foi feita elevando-se a proveta até a barra horizontal, e soltando-a em seguida, o que provocava sua queda até atingir a base da madeira. A posição da barra horizontal era fixa, de modo que a

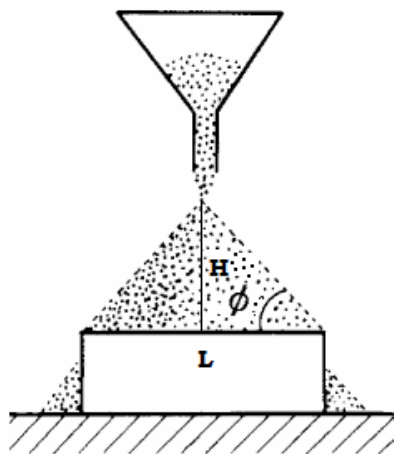
altura e intensidade das batidas foram, na medida do possível, padronizadas. O procedimento foi repetido até que não se observar mais alteração no volume do pó contido na proveta, e a densidade compactada foi calculada através da razão entre a massa e o volume ocupado.

### Índice de Hausner

O índice de Hausner foi calculado através da razão entre os valores das densidade *bulk* compactada e densidade *bulk* aerada.

### Ângulo de repouso

O ângulo de repouso foi medido usando um funil com orifício de descarga com 20 mm de diâmetro, cujo ângulo da parede era de 65°. O funil foi mantido a uma distância fixa de uma superfície lisa e os pós foram despejados por gravidade, conforme mostrado na Figura 2. Cada teste foi repetido 3 vezes.



**Figura 2 – Esquema de medição do ângulo de repouso dos pós.**

O diâmetro e a altura *H* do monte cônico formado foram medidos e o ângulo de repouso calculado pela equação:

$$\phi = \arctg \left( \frac{H}{D/2} \right) \quad (1)$$

Os critérios de classificação de escoabilidade segundo os ângulos de repouso são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Classificação da escoabilidade de pós com base no ângulo de repouso**

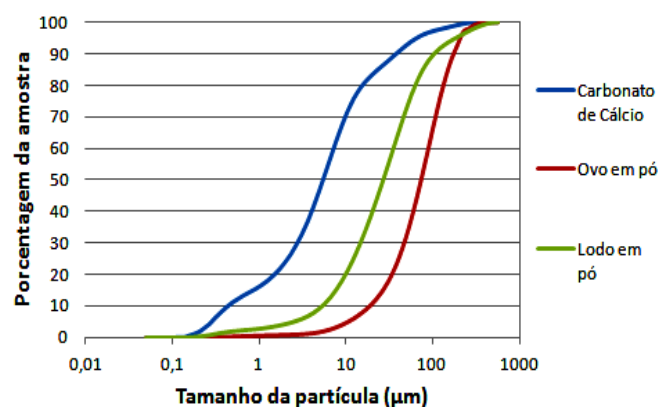
Ângulo de repouso (°)	Escoamento
25-30	Muito livre
30-38	Livre
38-45	Médio
45-55	Coesivo
Maior que 55	Muito difícil

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Distribuição Granulométrica

A distribuição obtida para cada um dos pós utilizando as médias das medidas está mostrada na Figura 3.

Há diversas definições para o diâmetro médio das partículas de uma amostra de material particulado, mas a que foi utilizada como referência nesse trabalho foi o diâmetro no qual a amostra é dividida em duas: 50% das partículas são menores do que o diâmetro médio e 50% são maiores. As curvas mostram que o ovo em pó tem as partículas de maiores diâmetros, e o carbonato as de menor tamanho. De acordo com as distribuições apresentadas na Figura 4, o diâmetro médio do ovo em pó, do lodo em pó e do carbonato de cálcio são, respectivamente  $69,8 \pm 2,7 \mu\text{m}$ ,  $26,3 \pm 0,4 \mu\text{m}$  e  $5,52 \pm 0,1 \mu\text{m}$ .



**Figura 3 – Distribuições granulométricas dos pós.**

Também foi determinado para cada material o diâmetro de Sauter, que é importante para o dimensionamento de equipamentos e definido como o diâmetro de

uma esfera com a mesma relação volume/área superficial de uma partícula. Os valores obtidos para o ovo em pó, para o lodo em pó e para o carbonato de cálcio foram, respectivamente  $23,0 \pm 0,2 \mu\text{m}$ ,  $6,19 \pm 0,13 \mu\text{m}$  e  $1,45 \pm 0,03 \mu\text{m}$ .

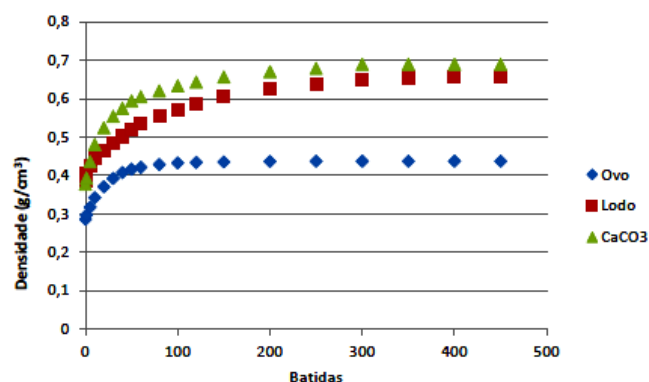
Tanto o tamanho da partícula quanto a sua distribuição granulométrica afetam diretamente os índices de escoabilidade de materiais particulados, como as densidades *bulk* aerada e compactada, o ângulo de repouso e a compactação do leito (Mohammed *et al.*, 2011). Isso ocorre porque quando duas partículas estão em contato, elas podem estar sujeitas a forças de capilaridade, forças eletrostáticas e forças de van der Waals (Campos e Ferreira, 2013). Para partículas menores, essas forças são mais intensas uma vez que há maior área superficial disponível para que ocorram as interações em questão. Dessa maneira, geralmente, pós constituídos por partículas menores têm escoamentos mais difíceis. Contudo, somente o conhecimento da distribuição granulométrica e do diâmetro médio pode não garantir uma correta previsão sobre a escoabilidade de determinado pó, pois as interações entre as partículas dependem também de outros fatores, como seu teor de umidade, teor de gordura, forma e rugosidade superficial (Roos *et al.*, 2007).

### Teor de umidade

Os teores de umidade em base úmida do ovo em pó, lodo em pó e carbonato de cálcio foram, respectivamente 1,16%, 1,25% e 0,12%. Todos os pós foram submetidos a processos de secagem e permaneceram armazenados em recipientes de vidro fechados por um período de aproximadamente 2 anos. Teunou e Fitzpatrick (1999) afirmam que a absorção de água pelos pós é uma função da temperatura e umidade relativa do ar e do tempo de armazenagem. Portanto, o armazenamento inadequado pode contribuir para o aumento do teor de umidade e consequente piora da escoabilidade. Os baixos valores indicam que eles foram armazenados de forma adequada, e bem protegidos de interações com o ambiente.

### Densidades *bulk* e índice de Hausner

As densidades *bulk* dos leitos formados por cada um dos pós em função do número de batidas estão apresentadas na Figura 4.



**Figura 4 – Densidade *bulk* dos pós em função do número de batidas.**

A densidade *bulk* aerada é aquela medida para o pó que não sofreu compactação ( $N=0$ ) e a densidade *bulk* compactada é aquela obtida após um número muito grande de batidas ( $N \rightarrow \infty$ ), quando não é mais observada variação do volume do leito com a compactação. Nota-se na Figura 4 que a compactação do pó de ovo foi alcançada com cerca de 250 batidas, enquanto para o lodo e carbonato de cálcio foram necessárias cerca de 400 batidas. A cinética de compactação depende da eliminação dos poros no interior do leito à medida que o leito é vibrado, e a forma como isto ocorre depende da estrutura do leito e das propriedades das partículas (Mallol *et al.*, 2008).

A Tabela 2 mostra os valores das densidades *bulk* obtidos para cada um dos pós, bem como os respectivos índices de Hausner (HR).

**Tabela 2 - Densidades *bulk* aerada ( $\rho_A$ ), compactada ( $\rho_c$ ) e índices de Hausner (HR) dos pós.**

Material	Ovo	Lodo	CaCO <sub>3</sub>
$\rho_A$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,285	0,387	0,377
$\rho_c$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,437	0,657	0,689
HR	1,53	1,70	1,84

Na Tabela 2 observa-se que a densidade *bulk* aerada do ovo foi aproximadamente 30% menor do que as densidades dos pós de lodo e

de carbonato de cálcio, cujos valores apresentaram pouca diferença entre si. Para pós constituídos de partículas de quartzo, cujo empacotamento foi feito de forma padronizada, Mallol *et al.* (2008) observaram que a densidade aerada aumentou com o aumento do tamanho médio da partícula. Contudo, os pós analisados aqui, além de possuírem tamanhos diferentes, também diferem na composição química, e possivelmente, na forma e textura superficial. Sabe-se que a densidade *bulk*, além de ser influenciada pela forma de empacotamento, também é afetada pelo formato, rugosidade superficial e composição das partículas (German, 1989). O pó de ovo, em particular, foi obtido a partir da secagem de uma pasta de ovo homogeneizada, cuja composição consiste de 12,5% de proteína, 2% de açúcares e 9,5% de gorduras (Nascimento, 2013). Já o pó de lodo é constituído essencialmente de biomassa orgânica, mas sua composição exata não é conhecida (Almeida, 2009). A presença de açúcares e gordura no pó de ovo é um diferencial em relação aos demais e pode ter contribuído para a sua menor densidade inicial. Nota-se que em todos os casos houve uma compactação considerável do leito, mesmo para o ovo, que apresentou a menor variação de densidade entre os três pós.

De acordo com a classificação baseada no índice de Hausner (Hayes, 1987), os três pós podem ser classificados como coesivos, e de escoamento muito difícil, já que os valores de HR foram superiores a 1,4 em todos os casos.

Desse modo, armazenar grandes quantidades desses materiais pode ocasionar problemas de compactação nas camadas inferiores, que estão sujeitas à ação de maior força peso. Por exemplo, no caso do carbonato de cálcio, a sua densidade aumentou em cerca de 80 % com a compactação, resultando em diminuição dos espaços vazios e aumento das forças de interação entre as partículas, o que não é o ideal quando se deseja escoar um pó.

### **Ângulo de repouso**

Os ângulos de repouso determinados para o ovo em pó, para o lodo em pó e para o carbonato de cálcio foram  $44\pm1^\circ$ ,  $50\pm3^\circ$  e  $48\pm2^\circ$ , respectivamente. De acordo com a

classificação sugerida pela Tabela 2 (Woodcock e Mason, 1987), o ovo em pó pode ser classificado como um material de escoamento intermediário entre livre e coesivo, enquanto os outros dois pós são materiais coesivos, de escoamento difícil.

O fato dos materiais serem classificados de forma diferente, dependendo da metodologia empregada deve-se ao fato de que cada uma caracteriza a escoabilidade em condições distintas: o índice de Hausner leva em conta a compactação do pó, enquanto este fenômeno não é considerado na medida do ângulo de repouso estático. Assim, as medidas não podem ser comparadas entre si.

Uma análise final dos resultados mostra que, no caso do índice de Hausner, os valores aumentaram com a diminuição do tamanho das partículas e que o pó de comportamento menos coesivo foi o ovo, seguido pelo pó de lodo e carbonato de cálcio. Embora o teor de umidade do carbonato de cálcio seja aproximadamente 10 vezes menor do que os teores de umidade dos demais pós, o fato de seu tamanho médio ser bem inferior aos demais foi preponderante na escoabilidade. Da mesma forma, observou-se um aumento do ângulo de repouso com a redução do tamanho das partículas. O ângulo de repouso do ovo foi inferior aos demais, já os do pó de lodo e do carbonato não diferiram entre si quando se considera as incertezas da medida. A piora da escoabilidade com a redução do tamanho é um comportamento esperado pois a intensidade das forças de interação interpartículas aumenta com a diminuição do seu tamanho, devido à maior área disponível em um mesmo volume. Outro ponto a ser levantado aqui, e que não foi investigado neste trabalho, são as interações do material particulado com as paredes dos reservatórios em que ele está escoando. Existem vários trabalhos na literatura relatando a interferência do material de construção de silos no escoamento de pós (Fitzpatrick *et al.* 2004). No caso dos pós analisados, observou-se que o ovo em pó tendia a aderir nas paredes do funil de vidro utilizado, o que sugere a existência de forças de adesão associadas à composição química deste material.



## CONCLUSÕES

As técnicas utilizadas permitiram a determinação das propriedades relacionadas à escoabilidade dos três pós investigados. A partir dos resultados pôde-se verificar que, dentre eles, o carbonato de cálcio, de menor diâmetro médio ( $d_p=5,52 \mu\text{m}$ ) e menor teor de umidade (0,12%) foi o pó de escoamento mais difícil. O pó de ovo ( $d_p=69,8 \mu\text{m}$ ), com teor de umidade de 1,16% foi o de escoamento mais fácil, mas ainda assim pode ser caracterizado como um pó coesivo, assim como o pó de lodo, com  $d_p=26,3 \mu\text{m}$  e teor de umidade de 1,25%. Ressalta-se que, em condições de processamento, propriedades como teor de umidade podem variar ao longo do tempo e interferir na escoabilidade.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, E. C.; GELDART, D. (1999), "The use of *bulk* density measurements and flowability indicators". Powder Technology, vol. 102, pp. 151-165.
- ALMEIDA, A.R.F. (2009), Análise da Secagem de Pastas em Leitos de Jorro. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP (tese de doutorado), 165 p.
- CAMPOS, M. M.; FERREIRA, M. C. (2013), "A comparative analysis of the flow properties between two alumina-based dry powders". Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 519846, 7 pages
- FITZPATRICK, J. J.; AHRNÉ, L. (2005), "Food powder handling and processing: Industry problems, knowledge barriers and research opportunities". Chemical Engineering and Processing, vol. 44, p. 209-214.
- FITZPATRICK, J. J.; BARRINGER, S. A.; IQBAL, T. (2004), "Flow property measurement of food powders and sensitivity of Jenike's hopper design methodology to the measured values". Journal of Food Engineering, vol. 61, pp. 399-405.
- GERMAN, R. M. (1989), Particle Packing Characteristics. Princeton: Metal Powder Industries Federation.
- HAYES, G. D. (1987), Food Engineering Data Handbook. New York: Wiley, p. 83..
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LEVINE, A. S. (2008), Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. Eduardo Mach Queiroz; Fernando Luiz Pellegrini Pessoa (Trad.). 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643p.
- MALLOL, G.; AMORÓS, J. L.; ORTS, M. J.; LLORENS, D. (2008), "Densification of monomodal quartz particle beds by tapping". Chemical Engineering Science, vol. 63, pp. 5447-5456.
- MOHAMMED, S. A.; ABDULLAH, E. C.; GELDART, D.; RAMAN, A. A. A. (2011), "Measuring powder flowability with a modified Warren Spring cohesion tester". Particuology, vol. 9, p. 148-154.
- NASCIMENTO, B. S. (2013), Análise do Efeito da Composição Química na Secagem de Pasta em Leito de Jorro. PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, SP (tese de doutorado), 112 p.
- ROOS, Y. H., FITZPATRICK, J. J., BARRY, K., CERQUEIRA, P. S. M., IQBAL, T., O'NEILL, J. (2007), "Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders". International Dairy Journal, vol. 17, p. 383-392.
- TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J. (1999), "Effect of relative humidity and temperature on food powder flowability". Journal of Food Engineering, vol. 42, p. 109-116.
- WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. (1987), Bulk Solids Handling - An Introduction to the Practice and Technology. Leonard Hill, Glasgow.