

ESCOABILIDADE DE GRANEIS ÚMIDOS

MILHOMEM, F.O.¹, LUZ, J.A.M.²

¹Universidade Federal de Ouro Preto. felipe.milhOMEM@hotmail.com

²Universidade Federal de Ouro Preto. jaurelio@demin.ufop.br

RESUMO

O escoamento de meios granulares densificados está presente em inúmeras instâncias das indústrias de processamento. Dentre os inúmeros parâmetros que afetam sua escoabilidade em condutos inclui-se a umidade, a qual está ligada a fenômenos de capilaridade e de reologia. No presente estudo, buscou-se quantificar o efeito que a umidade e a tensão interfacial da fase aquosa em contato com as partículas e o ar exercem sobre a escoabilidade de graneis em silos e condutos.

PALAVRAS-CHAVE: sistema particulado; reologia; silos.

ABSTRACT

Granular flow is present in countless industrial activities. Among factors that influence their flow, there are included moisture, linked with capillary and rheology. In this work, one analyzed the effect of moisture and interfacial tension on bulk solids flowability in silos and ducts.

KEYWORDS: particulate system; rheology; silos.

1. INTRODUÇÃO

Diz-se dos sistemas particulados densificados aqueles sistemas formados por aglomerados de partículas, usualmente de diferentes granulações, e que tal conjunto propicia o surgimento de características comuns do grupo, e únicas quando comparando com as propriedades dos estados básicos da matéria. Tais sistemas comportam-se como híbrido entre sólido e líquido: não possuem a mesma rigidez do primeiro (podendo assumir a forma a de seu recipiente) e nem a mesma fluidez do segundo, uma vez que mesmo no seu escoamento, as diferentes regiões do sistema podem apresentar distintas velocidades de escoamento (veja-se, por exemplo, Silva, 2010).

Dentre tantas operações devidas a esses sistemas, o manuseio e a estocagem figuram grande importância. Quanto à estocagem, Chaves (2012) enumera alguns aspectos da importância da mesma. Segundo ele, as razões para tal prática seriam: formação de reservas atendendo à sazonalidade da região; efeito “pulmão” normalizador de vazão para alimentação entre operações; aguardar a chegada do transporte e necessidade de homogeneização do material.

Com relação ao escoamento em silos, o mesmo pode ser de duas formas principais: mássico (*mass flow*) ou afunilado (*funil flow*). Durante o escoamento em massa, todo o material se movimenta quando qualquer parcela é retirada, tendo-se assim um escoamento uniforme. Já no segundo caso, somente uma parte do sólido flui quando se retira uma pequena porção, sem perturbar o material das laterais. O problema do comportamento em funil é que há a existência de zonas estacionárias, onde fica retido o material. Em algumas situações, recorre-se a vibração ou a impactos marteladas para proporcionar o escoamento do material retido em silo. Isto ocasiona, além de problemas de desgaste no equipamento, problemas para os trabalhadores, decorrente do barulho e riscos ocupacionais (Bradley *et al.*, 2011).

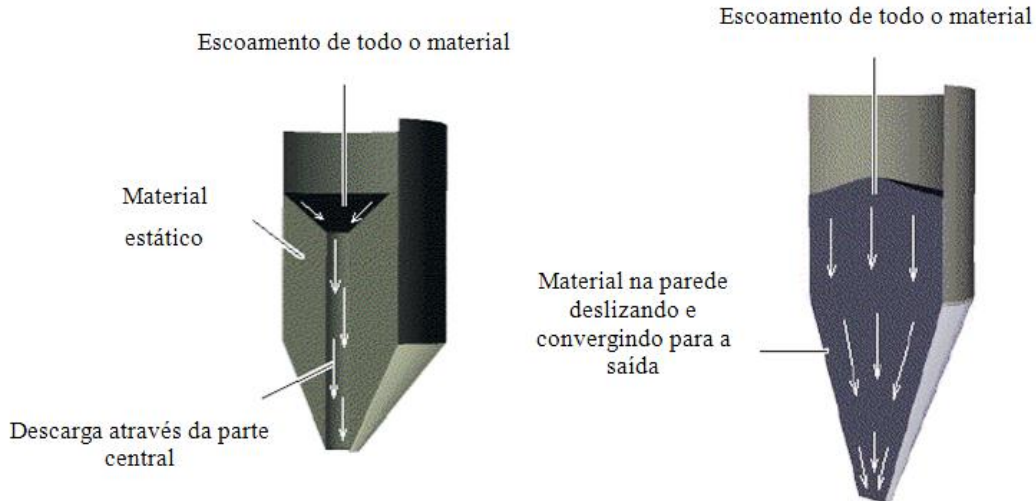


Figura 1. Escoamento em massa e afunilado. (Bradley *et al.*, 2011).

Segundo Ganesan *et al.* (2008), a menor presença de água, em especial para partículas mais finas, resulta em aumento da coesão entre os grãos. Isso pode dificultar o escoamento bem como levar a diferentes configurações de escoamento do material particulado.

Na indústria mineral, o manuseio de material particulado é uma constante, desde as operações frontais. Operações de ensilagem aparecem especialmente em etapas finais do processo ou no caso de operações realizadas a seco.

Assim, o intuito deste trabalho é realizar a análise da influência da umidade no escoamento em um silo, avaliando a vazão mássica do material com diferentes quantidades de água, bem como o ângulo de repouso nestas características.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na elaboração do trabalho, utilizou-se areia em na fração granulométricas – 0,595 mm + 0,420 mm. As amostras foram colocadas num silo e o mesmo foi montado num suporte universal. As características construtivas do silo seguem abaixo:

Tabela I. Dimensões do silo utilizado nos trabalhos.

Dimensões do silo [m]	
Altura total	$1,36 \times 10^{-01}$
Altura útil	$1,32 \times 10^{-01}$
Diâmetro interno	$5,61 \times 10^{-02}$
Altura da parte cilíndrica	$8,18 \times 10^{-02}$
Flecha do elipsoide oblato (fundo)	$2,50 \times 10^{-02}$
Diâmetro interno do orifício	$8,10 \times 10^{-03}$
Altura de descarga da areia	$1,2 \times 10^{-1}$

A caracterização da amostra consistiu na determinação da sua massa específica real, esfericidade, porosidade e no índice de Hausner. A metodologia de caracterização pode ser encontrada em Milhomem e Luz (2012). A figura 2, a seguir, ilustra aspectos morfológicos da areia estudada.

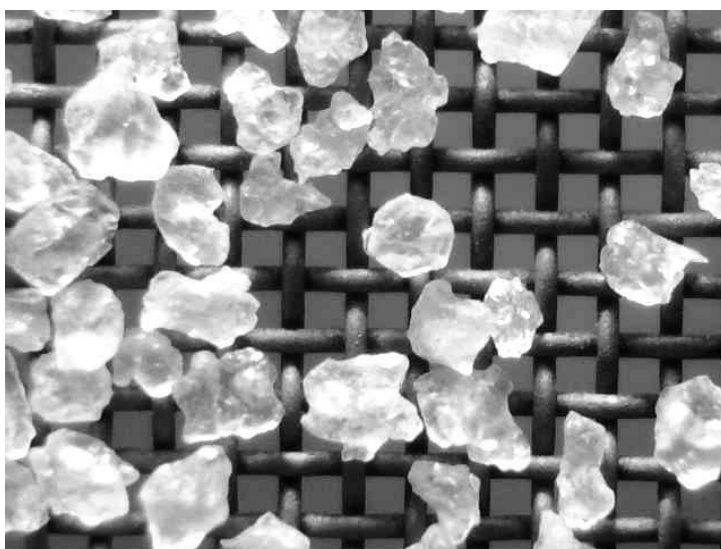


Figura 2. Micrografia da areia de quartzo bitolada entre 0,590 mm e 0,420 mm (sobre tela de abertura de 0,297mm, para efeito de escala).

Foram feitos quatro tipos de ensaio de escoamento: utilizando areia seca, areia levemente umedecida com aspersão de água, areia levemente umedecida com água e presença de espumante (óleo de pinho) e areia umedecida com água e coletor (sulfonato de petróleo). O intuito da

utilização de reagentes foi verificar como seria o comportamento do escoamento do material umedecido, apresentando, contudo, diferentes valores de tensão superficial. Os ensaios dos ensaios foram analisados em função do ângulo de repouso, determinando-se assim, sua maior ou menor facilidade de escoamento. A baixa umidade estudada buscou simular casos comuns em saída de secadores industriais, os quais não apresentam secagem completa no ponto econômico ótimo.

Para o primeiro ensaio, a amostra foi seca em estufa por 20 minutos a 100° C. Em seguida foi pesada, colocada no silo pela sua parte superior e em seguida a sua abertura inferior foi liberada, deixando-se o material escoar somente pelo efeito da gravidade. Simultaneamente, o cronômetro foi ativado. O cronômetro era zerado quando não havia mais escoamento do material pelo silo.

A seguir, novos ensaios foram conduzidos, desta vez com adição de menos água. Utilizando-se um borrifador, aspergiu-se água sobre a areia, fazendo-se simultaneamente a homogeneização da mesma. Em seguida foram realizados novos ensaios de cálculo do ângulo de repouso. O valor de umidade alvo inicial foi de 0,4 %. Tentou-se também realizar os ensaios com umidade de 2 %, entretanto, não houve escoamento do material pelo silo (talvez devido às dimensões reduzidas do mesmo, ou se haver atingido o ponto crítico de formação de pontes de líquido no retículo intersticial, ditadas pela ação capilar).

Para verificar a influência da tensão interfacial no escoamento, misturou-se água com pequena quantidade de óleo de pinho (da Sulfal) e sulfonato de petróleo (Aero 825 promoter, da Cyted), e borrifou-se, de forma semelhante à anterior. A medição da tensão interfacial foi feita por meio do método do anel, conforme explicitado por Luz e Lima (2007). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

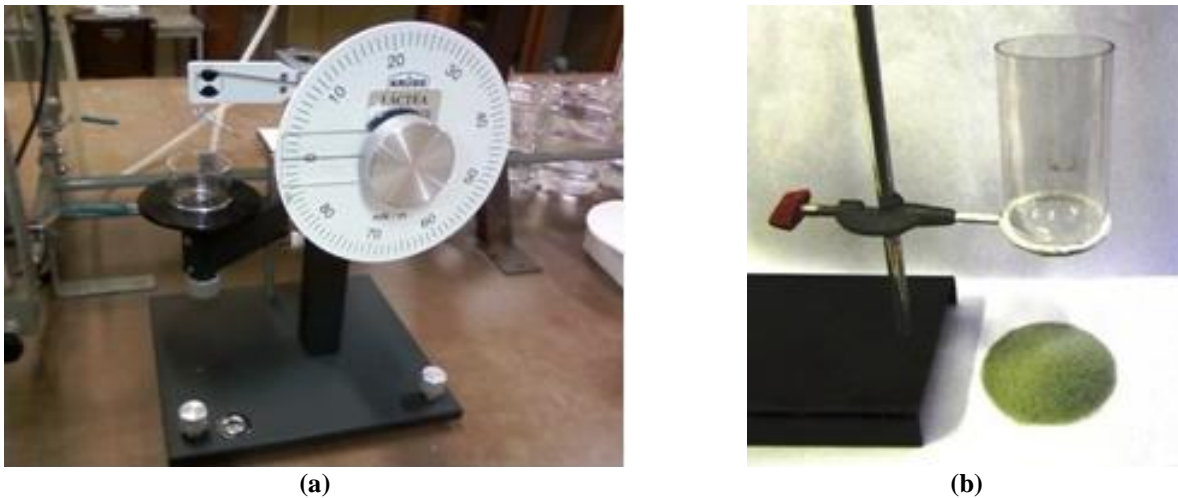


Figura 3. Equipamentos utilizados nos ensaios: a) tensiômetro; b) suporte universal com silo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quanto a caracterização da amostra, os resultados encontram-se na tabela II, a seguir.

Tabela II. Resultados da caracterização da areia.

Amostra	Massa específica real [kg.m ⁻³]	Massa específica aparente [kg.m ⁻³]	Porosidade	Esfericidade	Índice de Hausner
Areia	2690	1520	0,476	0,75	1,07

Quanto ao ângulo de repouso, os resultados encontram-se na tabela III.

Tabela III. Resultados para determinação do ângulo de repouso da areia.

	Sem reagente	Areia umedecida sem reagente	Óleo de Pinho		Sulfonato de Petróleo	
	Areia Seca	Tensão 72 mN/m	Tensão 41,25 mN/m	Tensão 31,5 mN/m	Tensão 41 mN/m	Tensão 36,2 mN/m
Ângulo de repouso	34,51	33,05	34,09	33,49	34,7	33,69
Umidade	0,0	0,40	0,40	0,43	0,29	0,12

Para os casos com leve presença de umidade, percebe-se um ligeiro aumento para o ângulo de repouso, entretanto a quantidade de água não foi suficiente para atrapalhar no escoamento. Todavia, é perceptível que uma redução na tensão interfacial provocou uma queda, mesmo que ínfima, no ângulo de repouso do material.

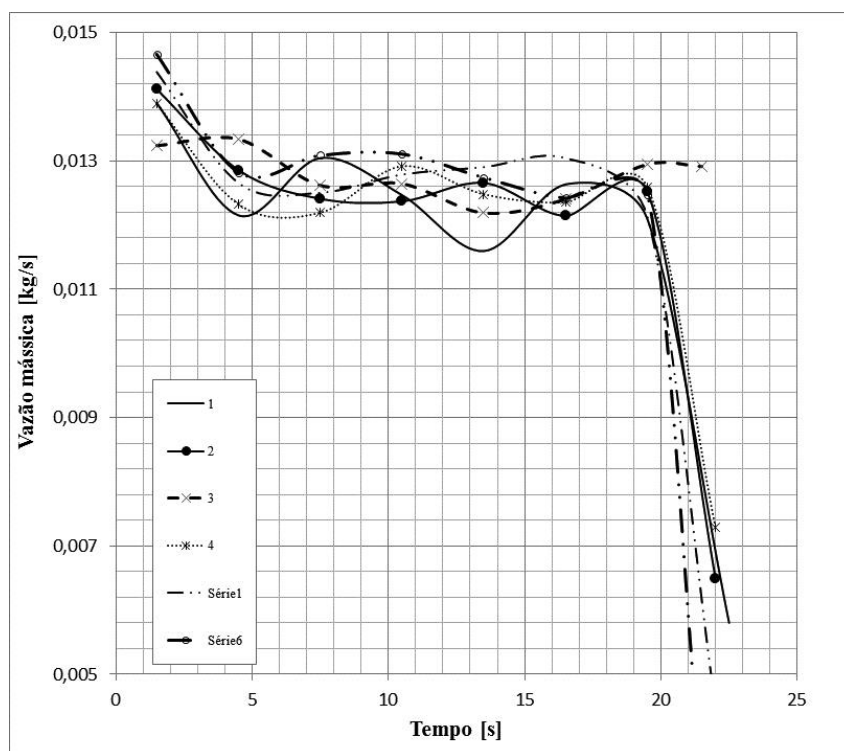


Figura 4. Vazão mássica versus tempo de descarregamento.

Legenda da figura:	Umidade [%]	C. V. [%]
1 A seco	0,00	4,32
2 Água destilada	0,40	4,02
3 Solução de óleo de pinho com tensão de 41,2 mN/m	0,40	4,17
4 Solução de óleo de pinho com tensão de 31,5 mN/m	0,40	4,72
5 Solução de sulfonato com tensão de 41,0 mN/m	0,29	3,50
6 Solução de sulfonato com tensão de 36,2 mN/m	0,12	3,84

C. V. – coeficiente de variação (desvio padrão/média)

Quanto às diferenças entre o escoamento entre areia seca e úmida (sem reagente), a diferença nos valores é pequena. Para se verificar a hipótese de homogeneidade estatística das condições, foi feita

uma análise de variância e uma análise da homogeneidade das variâncias das médias dos ensaios, cujos resultados estão sumarizados nas tabelas IV e V a seguir.

Tabela IV. Análise das vazões médias: probabilidade bicaudal de mesma variância.

<i>Condição de ensaio</i>	<i>Teste F</i>	<i>Relação de médias</i>	<i>Umidade [%]</i>
Seco/água	75,41 %	0,987	0,40%
Seco/óleo de pinho com tensão de 41,25 mN/m	19,43 %	0,983	0,40%
Seco/óleo de pinho com tensão de 31,5 mN/m	56,14 %	0,990	0,43%
Seco/sulfonato com tensão de 41,0 mN/m	90,71 %	0,972	0,29%
Seco/sulfonato com tensão de 36,1 mN/m	96,86 %	0,962	0,12%

Tabela V. Análise das vazões médias: teste t-de-Student para a igualdade das médias das massas.

<i>i</i>	<i>Comparação com ensaio a seco</i>	$(m_{seco}-m_i)$ <i>máximo</i>	$(m_{seco}-m_i)$ <i>mínimo</i>	μm_i	<i>Rejeitar a hipótese nula?</i>
1	Seco/água	0,0051	-0,0061	-0,0005	Não
2	Seco/óleo de pinho com tensão de 41,25 mN/m	0,0045	-0,0058	-0,0006	Não
3	Seco/óleo de pinho com tensão de 31,5 mN/m	0,0053	-0,0060	-0,0004	Não
4	Seco/sulfonato com tensão de 41,0 mN/m	0,0047	-0,0069	-0,0011	Não
5	Seco/sulfonato com tensão de 36,1 mN/m	0,0046	-0,0075	-0,0015	Não

A função estatística da planilha eletrônica Excel chamada TESTE.F foi empregada para se obterem os dados constantes na segunda coluna da tabela IV. Ela fornece a probabilidade bicaudal de que as vazões comparadas apresentem a mesma variância populacional. O resultado na segunda linha (referente à comparação do ensaio seco com aquele com solução de óleo de pinho com tensão de 41,25 mN/m), foi algo anômalo acusado sugerindo fortemente o descarte da hipótese nula (a da igualdade entre as variâncias). Devido ao caráter inusitado desse resultado, e considerando que várias das funções intrínsecas da planilha citada, apresentam ocorrência de erros, optou-se por fazer-se manualmente um teste de t-de-Student, que veio a consubstanciar a tabela V.

Na tabela V, μm_i refere-se à diferença entre a média de massas amostrais do ensaio a seco e as das demais condições (ensaios). Correspondentemente, a segunda e a terceira coluna da tabela V são as diferenças limites entre as médias comparadas das massas amostrais, em um teste usando-se o parâmetro t-de-Student com grau de confiança de 95 %, isto é: se μm_i extrapolar aqueles limites, a hipótese nula deve ser descartada. A hipótese nula, aqui, refere-se à igualdade entre as médias entre os ensaios em branco (a seco) e cada um daqueles na condição genérica i ($i = 1, 2, \dots, 5$).

Pelos resultados desse teste, vê-se que para nível de significância de 5 %, não se pode descartar a hipótese nula. Ou seja, pelo menos nas condições ensaiadas e com o grau de informação do sistema, deve-se considerar que, em princípio os fatores não foram significativos. Curioso, entretanto, que os valores de vazão do material umedecido foram maiores que o ensaio em branco (a seco), fato evidenciado pela razão entre as vazões médias constante na tabela IV.

4. CONCLUSÕES

Foi realizada neste estudo a avaliação do escoamento em silos, de acordo com valores de umidade e presença de tensoativos, que proporcionam mudança na tensão superficial do líquido. Esta mudança com nível baixo de umidade (inferior a 0,5 %), típico de saída de secadores industriais, não foi suficiente para reduzir o grau de agregação entre o líquido e o sólido e, por conseguinte, afetar a escoabilidade do mesmo.

O baixo coeficiente de variação das medidas individuais (entre 3,5 % a 4,7 %) mostrou que ensaios em triplicada permitem exarar conclusões (resultando coeficientes de variação das médias no intervalo de 2 % a 2,7 %), mesmo realizando-se ensaios de pequena escala, caráter de relevância quando esse tipo de análise é feito em fase de projeto de um empreendimento industrial que manuseie particulados, quando – por vezes – a disponibilidade de amostras é baixa.

Conforme se pôde ver, a redução da tensão superficial no líquido que entrou em contato com areia proporcionou uma leve redução no ângulo de repouso. Ângulos menores indicariam escoamento mais fácil do material particulado.

O trabalho aqui apresentado faz parte de uma linha de investigação que vem sendo seguida (vejam-se, a esse respeito os trabalhos publicados por Valadares e Luz, 2004; Luz e Silva, 2004 e 2005; Luz e colaboradores, 2006) e que ainda se encontra em andamento. Os resultados apresentados não mostraram impacto significativo da tensão superficial no escoamento, ao menos nas condições em questão. Talvez isso possa ter acontecido em virtude excessivo bitolamento granulométrico. Novos trabalhos deverão ser realizados para verificar de forma mais incisiva sobre a presença de umidade no escoamento de graneis. Além disso, o uso de silos maiores, que proporcionem um estudo experimental mais próximo da prática industrial também deve ser levado em conta para trabalhos futuros. Pretende-se realizar também trabalhos futuros com e maiores valores de umidade podem ser realizados, a fim de avaliar em condições de maior umidade o alegado impacto que a presença de tensoativos possa vir a ter no escoamento em silos.

5. REFERÊNCIAS

BRADLEY, M.S.A.; BERRY, R.J. and FARNISH, R.J. (2011) Methods for design of hoppers. Silos, bins and bunkers for reliable gravity flow, for pharmaceutical, food, mineral and other applications. In: Bulk Solids India 2011, 6-8 April 2011, Mumbai, India. (Unpublished).

CHAVES, A.P. 2012. Teoria e prática do tratamento de minérios 5 - Manuseio de sólidos granulados. 384 p.

GANESA, V.; ROSENTRATER, K.A. e MUTHUKUMARAPPANA, K. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders – a review with implications for DDGS. Biosystems engineering. 101, 2008, p. 425-435.

LUZ, J.A.M. e LIMA, R.M.F. Medida da tensão superficial. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. e BRAGA, P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2007. p. 473-488.

LUZ, J. A. M.; MELIS, L. S. V.; SILVA, J. M. Escoamento em Meios Granulares não Coesos. In: Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales, 2006, San Juan. Actas de las VIII Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. San Juan: EFU, 2006. v. 1. p. 189-201.

LUZ, J. A. M. & SILVA, J. M. Rheological Behavior of Dense Granular Media. In: COBEM 2005 - 18th. International Congress of Mechanical Engineering, 2005, Ouro Preto. Proceedings of the COBEM 2005. Rio de Janeiro: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2005. v. 01. p. 01-08.

MILHOMEM, F.O. e LUZ, J.A.M. Moisture evolution in granular media under vibration. In: 9th International Mineral Processing Conference – PROCEMIN 2012.

MONTEIRO, M.H. & FERREIRA, M.C. Investigação sobre o escoamento gravitacional de sólidos na descarga de silos. VI congresso brasileiro de engenharia química em iniciação científica. 2005.

SILVA, A. C. Simulação computacional da redução direta de minério de ferro em fornos Midrex (tese de doutoramento). Ouro Preto: Ufop. 2010. 159 p.

SILVA, J. M.; LUZ, J. A. M. Aspectos Reológicos do Escoamento de Sistemas Granulares. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa - ENTMME, 2004, Florianópolis. XX ENTMME - Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Criciúma: UNESC, 2004. v. 02. p. 243-250.

THOMSON, F.M. Storage and flow of particulate solids. In: Handbook of powder science and technology. Fayed, M.E. e Otten, L. 1997.

VALADARES, T. N.; LUZ, J. A. M. Porosidade de Sistemas Polidispersos Compactados. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa - ENTMME, 2004, Florianópolis. XX ENTMME - Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Criciúma: UNESC, 2004. v. 2. p. 235-242.