



# MANUSEIO E ESTOCAGEM DE MINÉRIOS: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ESCOAMENTO ATRAVÉS DE TESTES EM ESCALA DE LABORATÓRIO\*

Rogério Ruiz<sup>1</sup>  
Francisco Cabrejos Marín<sup>2</sup>  
Douglas Batista Mazzinghy<sup>3</sup>

## Resumo

Atualmente os fabricantes de equipamentos e empresas de engenharia utilizam, na sua maioria, experiência em projetos anteriores para o dimensionamento de silos, chutes, pilhas de estocagem e outros equipamentos de manuseio e estocagem para a indústria mineira. O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia eficiente e mundialmente reconhecida para a solução e prevenção de problemas de fluxo de sólidos, utilizando método científico e comprovado. Os principais testes laboratoriais para obtenção de propriedades de escoamento dos materiais serão descritos. Os testes necessitam de pequenas quantidades de amostras representativas do material e os parâmetros levantados alimentam a metodologia de análise de escoamento de sólidos ou softwares de simulação numérica, e são essenciais para a correção de equipamentos defeituosos ou dimensionamento de novos equipamentos.

**Palavras-chave:** Silos; Chutes; Coesividade; Fluxo de sólidos; Propriedade de escoamento; Jenike.

## BULK SOLIDS HANDLING AND STORAGE: MEASUREMENT OF FLOW PROPERTIES IN LABORATORY SCALE

### Abstract

Nowadays, equipment manufacturers and engineering companies rely on their experience in previous projects for the design of silos, chutes, stockpiles and other equipment for handling and storage present in the mining industry. The objective of this paper is to present an efficient methodology, recognized worldwide, to prevention and solve solids flow problems, using a scientific and proven method. The main laboratory tests to obtain flow properties of materials are described. The tests require small quantities of representative samples of the solids, the properties obtained are input for the solid flow analysis or numerical simulation software, and are essential for the correction of problematic equipment or for the design of new equipment.

**Keywords:** Silos; Chutes; Cohesion; Flow properties; Flow of solids; Jenike.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, MSc, Engenheiro de Projetos, Jenike & Johanson, Vinhedo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, PhD, Gerente Técnico, Jenike & Johanson, Viña del Mar, Chile.

<sup>3</sup> Engenheiro de Minas, Doutor, Engenheiro Especialista, Desenvolvimento de Processo, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



## 1 INTRODUÇÃO

A mineração tem como característica a grande movimentação/transporte de minérios e insumos. Diariamente são manuseados milhões de toneladas de materiais com diferentes características físicas e químicas como distribuição granulométrica, forma, densidade, umidade, mineralogia, etc. Os materiais manuseados são armazenados e transportados através de diferentes equipamentos como silos, moegas, pilhas, chutes, alimentadores, transportadores de correia e outros.

Os operadores das plantas de processamento mineral geralmente enfrentam problemas com perda de produção devido aos bloqueios de fluxo nos equipamentos, segregação, desgaste e descarga não controlada. Devido aos enormes investimentos envolvidos em projetos de classe mundial, a indústria mineira é particularmente sensível a esses problemas.

O conhecimento das propriedades de fluxo de materiais permite projetar novas instalações ou modificar/otimizar equipamentos existentes, evitando paradas de produção devido à formação de obstruções em chute, arcos coesivos e/ou formação de canal (ratholes) em silos, que são as causas mais comuns de problemas de fluxo. A Figura 1a apresenta um exemplo de formação de canal que ocorre quando a descarga de material ocorre apenas em uma região de escoamento localizado acima da saída.



**Figura 1.** Problemas de fluxo: a) formação de canal; b) arco coesivo (reproduzido a partir de [www.jenike.com](http://www.jenike.com))

A formação de canal pode ser estável (zonas permanentemente mortas) ou instável, dependendo das propriedades de fluxo do material, e em condições especiais pode ocorrer a “inundação”, devido principalmente a uma queda brusca e repentina de todo o material que estava estagnado.

A Figura 1b mostra um exemplo de arco ou ponte que ocorre quando é formada uma obstrução em forma de arco acima da tomada de saída da moega e interrompe o fluxo. Um arco coesivo ocorre quando as partículas se unem, devido à sua resistência coesiva produzida pela umidade, concentração de finos, forma da partícula, temperatura, etc.

O objetivo deste artigo é apresentar uma solução eficaz para problemas de fluxo na indústria mineira, destacando um método científico comprovado utilizado para garantir o fluxo controlado e confiável de sólidos, com base na teoria de fluxo de sólidos e de testes em escala de laboratório desenvolvidos por Andrew Jenike [1].

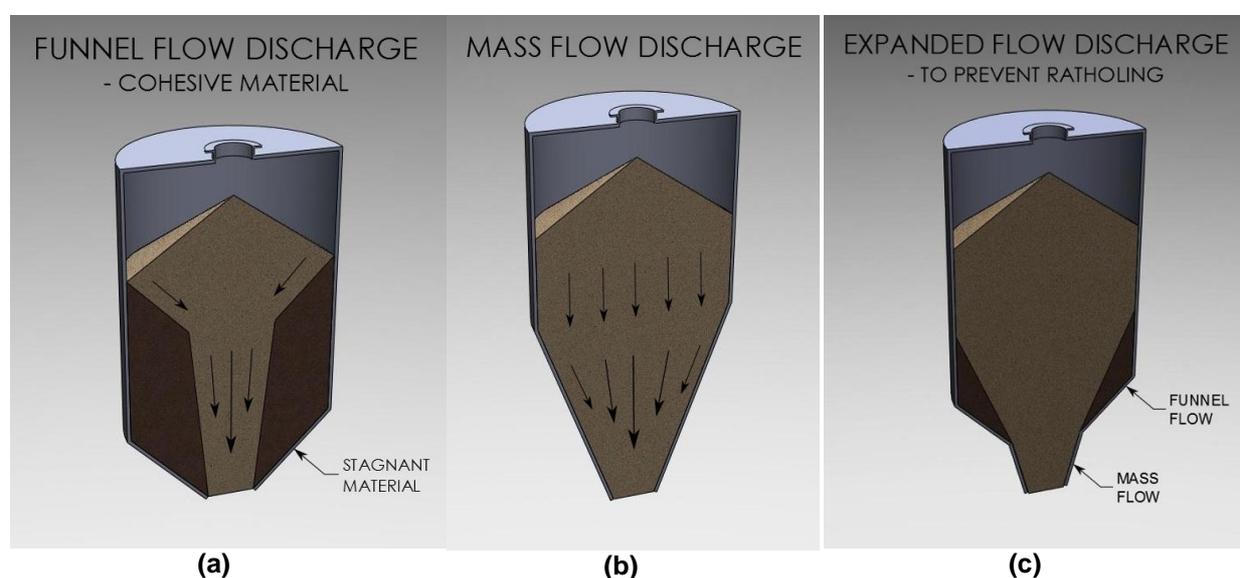
\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



## 2 TIPOS DE FLUXO

Existem três tipos de fluxo que podem ser desenvolvidos em silos e moegas ao manusear materiais sólidos:

- Fluxo Funil: ocorre quando a moega não é suficientemente íngreme e lisa para forçar o material a deslizar ao longo das paredes apenas pela gravidade ou quando a boca de saída da moega não é totalmente efetiva.
- Fluxo de Massa: ocorre quando uma moega é suficientemente íngreme e lisa para forçar o material a deslizar ao longo das paredes apenas pelo efeito de gravidade. Neste modelo, o material é descarregado de maneira uniforme e não existe material estagnado nas paredes.
- Fluxo Expandido: é a combinação dos dois padrões anteriores em que o Fluxo de Massa é desenvolvido por baixo de um silo de Fluxo Funil.
- A Figura 2 apresenta os três tipos de fluxo.



**Figura 2:** Padrões de Fluxo: a) Fluxo Funil; b) Fluxo de Massa; c) Fluxo Expandido (reproduzido a partir de [www.jenike.com](http://www.jenike.com))

## 3 PROPRIEDADES DE FLUXO

As propriedades de fluxo mais importantes, para garantir um correto dimensionamento de equipamentos de manuseio, são descritas a seguir [1-4].

### 3.1 Resistência Coesiva

Do ponto de vista de manuseio de sólidos a granel, esta é a principal propriedade de fluxo dos sólidos. A metodologia de Jenike [1] permite medir o comportamento de fluxo do material, calculando o ângulo de atrito interno e obtendo a função de fluxo (resistência coesiva x pressão de consolidação). Com base nestes resultados, é possível determinar as dimensões críticas para serem utilizadas no dimensionamento de equipamentos evitando a formação de arcos e canal durante a descarga. A resistência coesiva dos materiais depende de vários fatores tais como: a pressão de consolidação determinada pelas dimensões do equipamento (altura da pilha ou geometria do silo), porcentagem de partículas finas, densidade e forma das

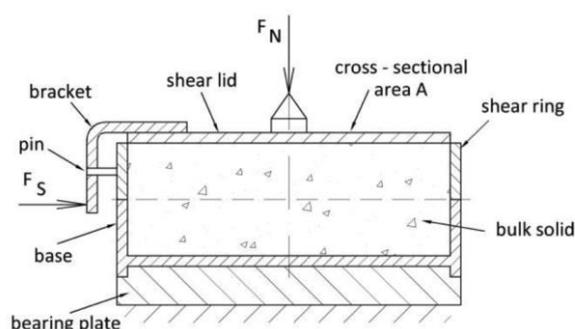
\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



partículas, umidade, tempo de armazenamento em repouso e sob pressão, aditivos, porosidade das partículas, temperatura, composição química, etc. Por exemplo, em aplicações onde é necessária a descarga de material particulado fino com auxílio de ar comprimido ou por fluidização, a resistência coesiva é consideravelmente diminuída ao ponto que o material flui como um “líquido”. Por outro lado, um minério britado e estocado em pilhas ou silos pode ganhar resistência coesiva devido às altas pressões de consolidação envolvidas, e a formação de canal ou arcos coesivos durante a descarga pode ocorrer em equipamentos com projeto inadequado.

A resistência coesiva de um material para uma dada situação pode ser determinada utilizando a Função de Fluxo, que mostra a resistência à falha não confinada, como função do esforço principal de consolidação [1]. Em termos gerais, a Função de Fluxo mostra a capacidade do material de resistir à falha (causando o fluxo) após uma dada força de compressão ser aplicada ao mesmo. Esta resistência coesiva deve ser menor do que a tensão produzida pela combinação da gravidade e da geometria do equipamento, a fim de obter fluxo. Se a tensão for menor do que a resistência, o resultado é uma situação de ausência de fluxo, devido à formação de arco ou canal.

Este conceito pode ser explicado pela analogia com o ensaio de compressão uniaxial [5], onde uma amostra do material é confinada dentro de um cilindro (com paredes sem atrito) e submetida a uma força de pré-consolidação vertical; em seguida o cilindro é removido e uma força de compressão vertical é aplicada até que o material falhe ou colapse. Este procedimento é repetido para diferentes forças de pré-consolidação formando uma base de dados das condições de falha. Infelizmente, no teste de compressão uniaxial é difícil medir as tensões no plano de falha além da dificuldade em realizar o teste em um cilindro de paredes sem atrito. Portanto, Jenike [1] propôs um método alternativo que utiliza um ensaio de cisalhamento uniaxial e o círculo de Mohr de tensão para determinar as condições de falha que determinam a Função do Fluxo do material, conforme mostrado na Figura 3.



**Figura 3:** Teste de cisalhamento uniaxial de Jenike (reproduzido a partir da norma ASTM D-6128 [6])

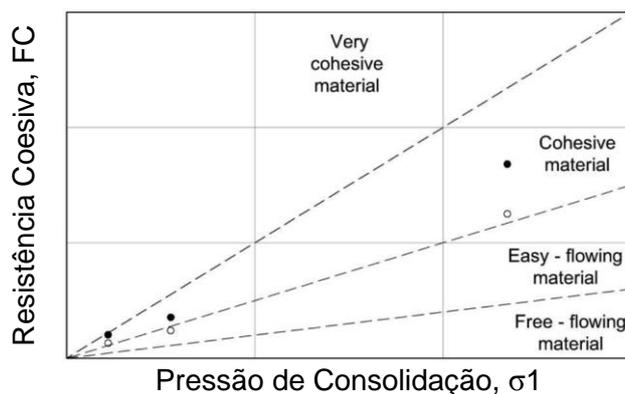
Este método tem sido aceito pela Sociedade Americana de Ensaios de Materiais (“American Society for Testing Materials, ASTM) e hoje é conhecida como a norma ASTM D-6128 [6]. Ao contrário de outros métodos existentes para medir a capacidade de escoamento dos materiais, este método mede tensões médias no plano de medição, apresenta boa reprodutibilidade, considera as tensões de compressão do material e o efeito de tempo sob consolidação.

Um exemplo de uma função de fluxo de um material qualquer, em dois diferentes níveis de umidade, é mostrada esquematicamente na Figura 4, em que a resistência

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



coesiva, FC, é representada graficamente em função da pressão de consolidação,  $\sigma_1$ .



**Figura 4:** Gráfico de uma Função de Fluxo genérica em duas condições de fluxo

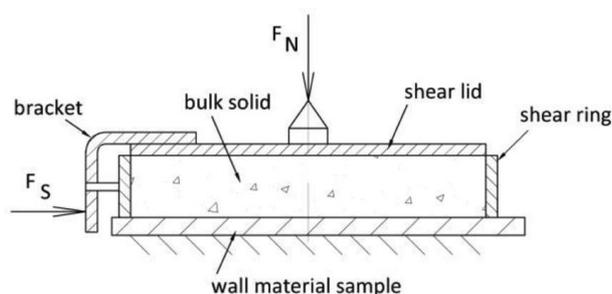
Aqui, o comportamento do fluxo é afetado pelo aumento de umidade no material. Além disso, a figura mostra as diferentes zonas que permitem classificar a característica de fluidez do material, tal como proposto por Jenike [1].

Materiais podem se comportar de maneira diferente em aplicações industriais, dependendo da pressão de consolidação atuante, a faixa de variação de umidade, as condições de fluxo (vazão instantânea ou fluxo reiniciado após um período de tempo e período de tempo de armazenamento em repouso e sob pressão), entre outros fatores.

### 3.2 Atrito na Parede

A medição do atrito na parede permite determinar as dimensões do equipamento necessárias para assegurar a descarga segura através do desenvolvimento de um padrão de fluxo de massa. Por exemplo, sabendo que as propriedades de atrito do material contra as paredes é possível determinar o ângulo mínimo de uma moega para forçar o material a deslizar ao longo de suas paredes pela ação da gravidade apenas; conseqüentemente, impedindo a formação de zonas com material estagnado e eventual bloqueio do equipamento.

Esta propriedade também é utilizada para o cálculo das cargas sobre as superfícies e para o projeto de alimentadores. Jenike [1] propôs um procedimento de teste de atrito na parede, conforme mostrado na Figura 5, modificando o seu método de teste de cisalhamento uniaxial.



**Figura 5:** Medição do atrito na parede a partir do teste de cisalhamento de Jenike (reproduzido a partir da norma ASTM D-6128 [6])

O teste determina a força para cisalhamento do material,  $F_S$ , contra a superfície de uma amostra do material da parede do equipamento, para diferentes valores de

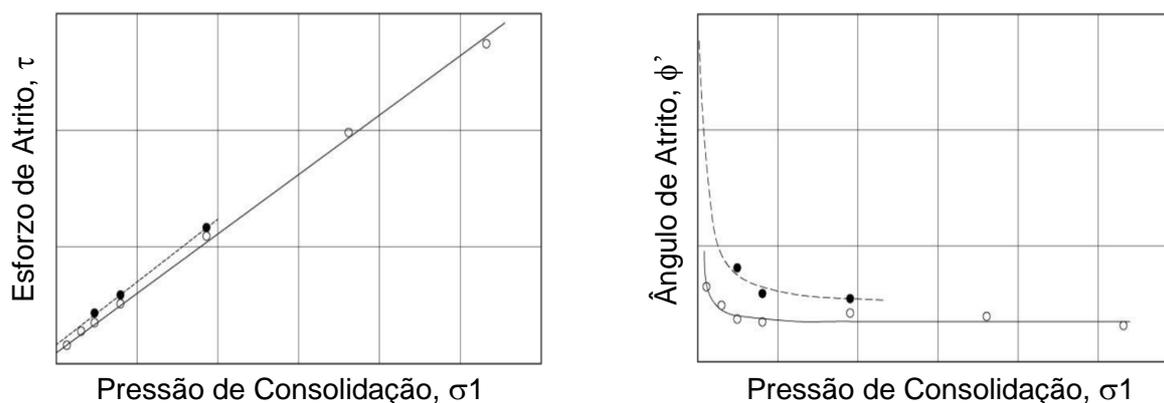
\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



força normal, FN, aplicada sobre a amostra. A inclinação da curva de tensão de cisalhamento,  $\tau$ , em função da tensão normal,  $\sigma$ , define o coeficiente de atrito,  $\mu$ , e consequentemente o ângulo de atrito na parede,  $\phi'$ , pode ser definido através da Equação 1.

$$m = \tan(\phi') \quad (1)$$

Os valores do ângulo de atrito de parede variam tipicamente entre 10° e 40° dependendo da rugosidade da superfície da parede, condições de fluxo, características do material, temperatura, etc. A Figura 6 mostra um exemplo de resultados dos testes de atrito na parede de um material em duas condições de fluxo (instantâneos e após um período de tempo de armazenamento em repouso e sob pressão) mostrando o incremento desta propriedade para reiniciar o fluxo após algum tempo de armazenamento em repouso e sob pressão.

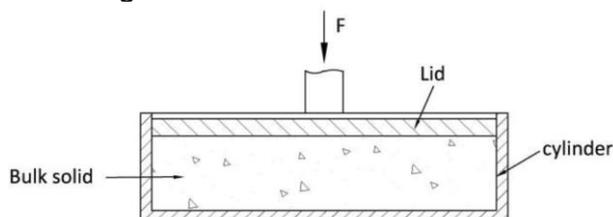


**Figura 6:** Exemplo de coeficiente e ângulo de atrito em duas condições de fluxo.

### 3.3 Compressibilidade

Na maioria das aplicações industriais com manipulação de materiais sólidos, a densidade do material a granel varia em função da pressão de consolidação a qual este está submetido. A densidade aparente é definida como o peso de material por unidade de volume ocupado, incluindo o ar e a umidade existente entre as partículas. Um exemplo da variação de densidade pode ser observado em uma pilha pulmão de estoque de minério, onde a densidade aparente aumenta com a altura da coluna de material (pressão de consolidação).

De acordo com a norma ASTM D-6683 [7], a compressibilidade dos sólidos a granel pode ser medida com o preenchimento de um cilindro com uma amostra do material e registrando a mudança de densidade conforme uma força normal é aplicada, conforme mostrado na Figura 7.



**Figura 7.** Teste de compressibilidade (reproduzido a partir da norma ASTM D-6683 [7]).

A Equação 2 mostra a relação entre a densidade aparente,  $\gamma$ , e a pressão de consolidação,  $\sigma_1$ , resultando em uma linha reta em um gráfico log-log; onde o grau

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



de compressibilidade é representada pelo coeficiente  $\beta$ , e as constantes  $\gamma_0$  e  $\sigma_0$  são valores empíricos.

$$g = g_0 \left( \frac{S}{S_0} \right)^b \quad (2)$$

A densidade aparente varia com vários fatores como: umidade, tamanho e forma das partículas, temperatura, elasticidade das partículas, etc. Esta propriedade é utilizado para calcular a capacidade de armazenamento de um silo ou moega, nos cálculos das dimensões mínimas das tomadas e saída de material para evitar problemas de fluxo, as cargas sobre o equipamento e a capacidade dos equipamentos de transporte, tais como alimentadores, transportadores de correia, roscas alimentadoras, elevadores de caneca, etc.

### 3.4 Permeabilidade

Permeabilidade de sólidos é a capacidade do material em permitir o fluxo de ar entre as partículas e tornar-se gaseificado e/ou fluidizado. Esta propriedade depende das características do material (como o tamanho e forma das partículas, umidade e temperatura) e o grau de compactação do material. Geralmente, particulados secos finos e poeiras apresentam uma resistência elevada à passagem de ar, podendo dificultar o controle do fluxo de descarga desses materiais.

Esta propriedade pode ser definida com a lei de Darcy [2-3], com o fator de permeabilidade,  $K$ , através da Equação 3, determinado em uma coluna de leito fluidizado, como mostrado na Figura 8.

$$K = K_0 \left( \frac{g}{g_0} \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

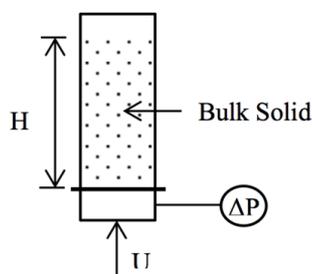


Figura 8: Coluna de fluidização para teste de permeabilidade.

A razão entre a queda de pressão pela altura ( $\Delta P / H$ ), necessária para arejar e/ou fluidizar o material, é medida em uma função da velocidade do ar,  $U$ , conforme mostrado na Equação 4.

$$U = K \left( \frac{\Delta P / H}{g} \right) \quad (4)$$

Os coeficientes  $\alpha$ ,  $\gamma_0$  e  $K_0$ , na Equação 3, são valores empíricos. A relação entre o fator de permeabilidade,  $K$ , em função da densidade aparente,  $\gamma$ , é representada em uma linha reta em um gráfico log-log.

Geralmente, materiais finos (como poeiras de precipitadores eletrostáticos) tendem a apresentar uma taxa de descarga de fluxo limitada e a medição das propriedades de compressibilidade e de permeabilidade permitem determinar se o material compactado apresentará uma taxa de descarga crítica por gravidade dada uma

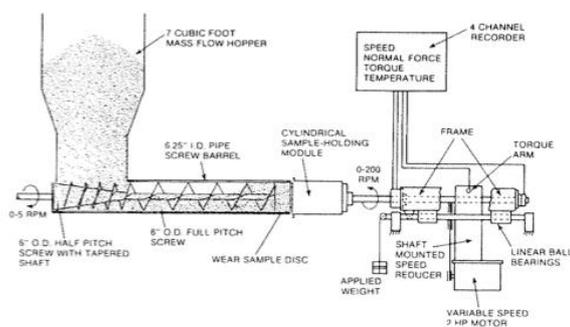
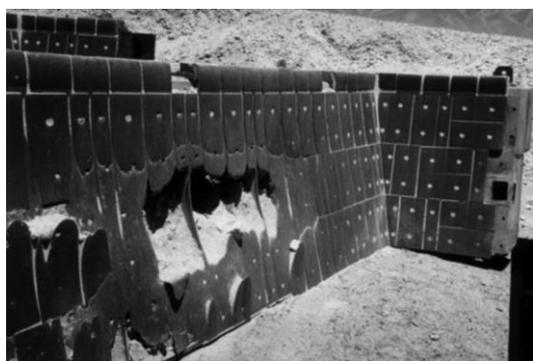
\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



combinação de altura efetiva (pressão de consolidação) e tamanho da tomada de descarga. Para resolver um problema de taxa de descarga insuficiente, a dimensão da tomada de descarga do equipamento deve ser aumentada ou o material pode ser arejado e/ou fluidizado.

### 3.5 Desgaste

O desgaste pode estar presente em equipamentos industriais, seja desgaste abrasivo ou por impacto, especialmente durante o manuseamento de materiais duros e abrasivos, como os minérios, e pode tornar-se um problema dispendioso [3]. Esta propriedade pode ser afetada pela dureza das partículas, seu tamanho e forma, umidade do material, velocidade e pressão contra a parede, temperatura e de presença de corrosão [2,8]. Essa propriedade pode ser medida por testes de deslizamento ou de impacto, e os resultados permitem determinar materiais de revestimento mais apropriados para aplicações específicas, por exemplo, nas paredes de uma moega acima dos alimentadores, conforme mostrado na Figura 9.



**Figura 9:** a) Exemplo de desgaste abrasivo numa moega e; b) esquema de teste de desgaste abrasivo desenvolvido pela Jenike & Johanson.

### 3.6 Segregação

Produtos sólidos com variação no tamanho das partículas tendem a se separar ou segregar durante o manuseamento e descarga em processos industriais [9]. O mecanismo de segregação mais comum é denominado “sifting segregation”; onde as partículas finas tendem a concentrar-se abaixo do ponto de descarga, enquanto que as partículas maiores tendem a rolar para a lateral da pilha, conforme mostrado na Figura 10.



**Figura 10.** Exemplo de segregação do tipo “Sifting” em um modelo de demonstração 2D (reproduzido a partir de Cabrejos e del Campo [9]).

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



Em certas aplicações a segregação pode ocorrer quando as partículas finas permanecem em suspensão na parte superior do silo, enquanto que as partículas mais grossas se precipitam rapidamente e se depositam no fundo, esse tipo de segregação é denominado “fluidization segregation”. Há outros mecanismos de segregação dependendo da aplicação, no entanto, todos eles podem causar desperdício de produtos e/ou matéria-prima, maior necessidade de manutenção, baixa eficiência do equipamento, qualidade deficiente dos produtos além de desperdício com investimentos mais elevados. Este fenômeno pode ser influenciado por fatores como o tamanho das partículas, sua forma, distribuição granulométrica, umidade, resistência coesiva, padrão de fluxo desenvolvido (funil ou de massa), vibrações, efeitos magnéticos e eletrostáticos, etc.

Na indústria de mineração, uma concentração das partículas finas em pontos de descarga pode causar a formação de arcos coesivos e canal “ratholes” (em silo e pilhas cônicas), aumento no consumo de energia (devido à flutuações de distribuição de tamanho de partículas), entre outros problemas. Estes problemas podem ser minimizados ou evitados, alterando o processo, modificando o material, ou com o dimensionamento adequado dos equipamentos (com base nas propriedades de fluxo dos materiais) a fim de garantir um padrão de Fluxo de Massa [9].

### 3.7 Ângulo de Chute

A medição da inclinação mínima para manter o fluxo dos materiais após o impacto, sobre uma superfície de uma parede plana, permite projetar corretamente chutes de transferência entre transportadores de correias na indústria de mineira. Este ângulo é chamado “ângulo de chute” e, para uma dada superfície, é função da pressão de impacto na parede. O ângulo de chute pode ser determinado com o teste mostrado na Figura 11.

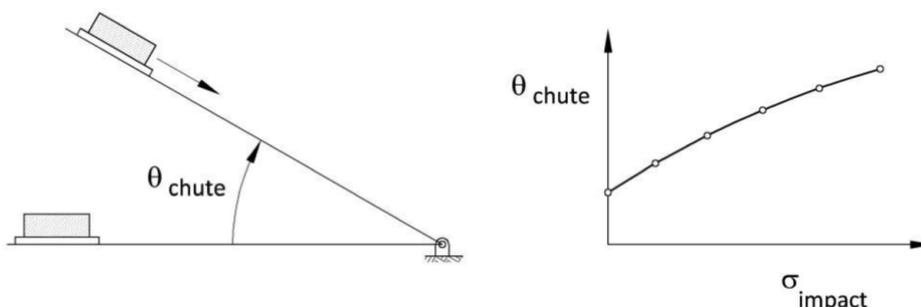
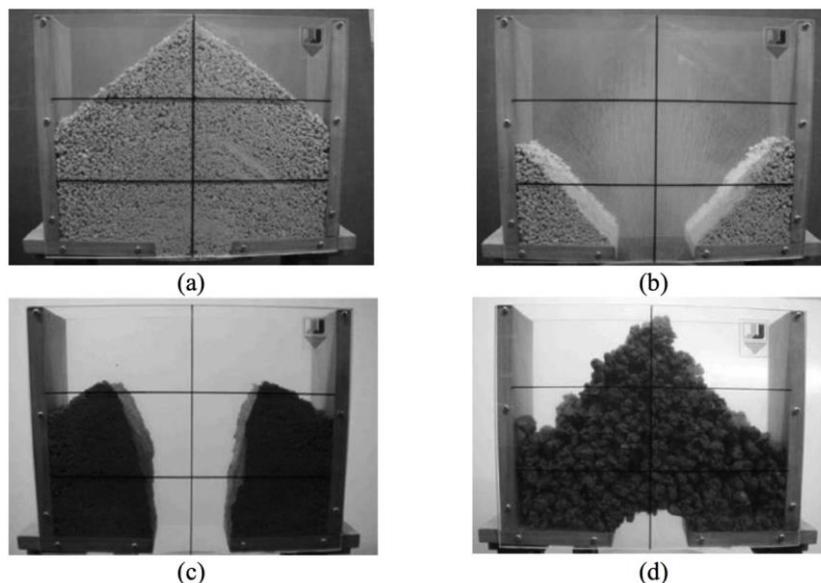


Figura 11. Princípio do teste de rampa e exemplo de resultado

### 3.8 Ângulo de Repouso e de Descarga

O ângulo de repouso é a inclinação da pilha formada pelo material quando é empilhado sobre uma superfície plana, enquanto que o ângulo de descarga é a inclinação do material estagnado deixada em uma pilha ou silo de fundo plano após a sua descarga, conforme mostrado na Figura 12.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



**Figura 12.** Teste de ângulo de descarga em um modelo de demonstração 2D, com minério britado e aglomerado de cobre com diferentes teores de umidade

Estes ângulos não fornecem informação sobre a capacidade de escoamento dos materiais, no entanto, eles são importantes para o cálculo da capacidade de armazenamento em silos, moegas e pilhas cônicas. Produtos sólidos têm a capacidade de resistir a tensões de cisalhamento mesmo quando em repouso, o que explica a formação do ângulo de formação. A medição do ângulo de repouso é normalmente erroneamente associada à capacidade de escoamento do material, e é um teste com resultados dependentes do equipamento de teste e/ou do operador, tendo assim uma pobre repetibilidade [5]. Os valores de ângulo de repouso variam normalmente entre 35° e 40° (medido a partir da horizontal), ao passo que o ângulo de descarga depende da resistência coesiva e pode variar entre 35° (para materiais de fluxo fácil) até 90° (para materiais coesivos, formando canal “ratholes”).

A Figura 12 mostra fotos tiradas durante um testes para medição do ângulo de rebaixamento, com um modelo demonstrativo 2D, com minério de cobre britado e aglomerado em diferentes umidades. De acordo com a classificação de fluidez na Figura 4, o material nas fotografias (a) e (b) é de fluxo fácil (“easy flowing”), enquanto que os materiais nas fotos (c) e (d) são coesivos (“cohesive”). Nas duas últimas fotos, pode-se ver a tendência de um material coesivo em formar canal “ratholes” e arcos coesivos respectivamente. Nota: Devido às pequenas pressões de consolidação envolvidas nesses modelos, o objetivo deste teste foi de apenas ilustrar o comportamento de descarga desses materiais ao invés de obter medições precisas desses ângulos para o projeto de equipamentos.

## 4 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta as principais propriedades de fluxo de sólidos que afetam o armazenamento e manuseio de materiais em plantas de processamento mineral. Além disso, o trabalho descreve uma abordagem científica comprovada para medir essas propriedades em laboratório, de modo a permitir o correto dimensionamento de equipamentos de manuseio de materiais particulados (como silos, moegas, pilhas cônicas, calhas ou chutes, alimentadores, válvulas rotativas, transportadores de

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



correia, roscas alimentadoras, elevadores de canecas, transportadores pneumáticos, etc.), com capacidade útil bem definida e fluxo de descarga confiável e controlada.

A medição e interpretação correta dos resultados de propriedades de fluxo dos materiais pode garantir um projeto adequado do equipamento, evitando problemas de fluxo que, se não resolvidos, podem levar a redução da capacidade de produção e/ou altos custos de manutenção e produção, causada por bloqueios de fluxo, segregação, descarga não controlada, desgaste de equipamentos, equipamentos inoperantes, atrasos na produção, etc. O projeto de um equipamento é exclusivo para cada material ou condições de operação do sistema, pois cada material se comporta de forma diferente dependendo de suas propriedades, características, composição e natureza.

A medida de coesividade e propriedades de atrito fornecem os parâmetros de projeto de equipamentos de manuseio e armazenamento de sólidos, enquanto que as propriedades como compressibilidade e permeabilidade ajudam a determinar as taxas de descarga para uma dada geometria. Outras propriedades como desgaste do material de construção do equipamento, segregação, ângulo de repouso, de descarga e ângulo de chute, fornecem informações importantes para a manipulação segura e adequada de produtos sólidos nas operações industriais de mineração.

## REFERÊNCIAS

- 1 Jenike, "Storage and Flow of Solids", Engineering Experiment Station Bulletin No. 123, University of Utah, 1964.
- 2 O. Angulo, F. Cabrejos, "Preventing Copper Loss Production and Flow Problems by Measuring the Materials Flow Properties", presented in Copper 2013, 1 - 4 of December, Santiago, Chile, 2013.
- 3 Carson J and J. Marinelli, "Characterize Bulk Solids to Ensure Smooth Flow", Chemical Engineering, McGraw-Hill, 1994, 78-90.
- 4 J. Carson, Pittenber B, "Bulk Properties of Powders", Jenike & Johanson Inc., AMS, Powdered Metals, 1998.
- 5 Schulze D. Powders and Bulk Solids - Behaviour, Characterization, Storage and Flow, Springer Berlin Heidelberg, Wolfsburg, Germany, 2008.
- 6 ASTM Standard D 6128-06: "Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell", ASTM International, www.astm.org.
- 7 ASTM Standard D 6683-01: "Standard Test Method for Measuring Bulk Density Values of Powders and Other Bulk Solids", ASTM International, www.astm.org.
- 8 Carson J, Royal T, "Measuring and Use of Wear Properties for Predicting Life of Bulk Solids Materials Handling Equipment", Bulk Solids Handling, 1992; 2(3): 517-523.
- 9 Cabrejos F, Campo A "¿Porqué se segregan los materiales?", Revista Minería Global, Marzo 2013, 5-13.

---

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*