

# CAPÍTULO 14 – ENSAIOS EM MESAS OSCILATÓRIAS

## **João Alves Sampaio**

Engenheiro de Minas/UFPE, Mestre e Doutor em  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ  
Tecnologista Sênior do CETEM/MCT

## **Salvador Luiz Matos de Almeida**

Engenheiro Metalurgista/UFRJ, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral/EPUSP  
Pesquisador do CETEM/MCT

## **Antônio Odilon da Silva**

Técnico Químico/AFE - Associação Fluminense de Educação  
Técnico Químico do CETEM/MCT



## 1. INTRODUÇÃO

A concentração gravítica é um dos processos mais antigos de concentração de minérios utilizada pelo homem e permanece ainda como um importante método de concentração física.

O conhecimento dos fundamentos da separação gravítica não é suficiente para projetar corretamente um fluxograma de processo. Para tal, é necessária a realização de estudos detalhados em escalas de laboratório e piloto para determinação dos parâmetros necessários ao dimensionamento do circuito industrial. Esses estudos devem ser feitos de forma criteriosa, para assegurar o êxito de ambos, projeto e processo. Ademais, os resultados obtidos devem ser os mesmos, ou próximos àqueles a serem obtidos no processo industrial, finalidade maior dos estudos em escala piloto, que focam, com mais detalhes, os balanços de massa e metalúrgico, de água e estudos de bombeamento dos fluxos.

São raras as investigações, em escala piloto, incluindo o estudo do circuito de bombeamento. Isso somente é possível nos casos de estudos detalhados, nos quais são utilizados equipamentos maiores que proporcionam vazões capazes de alimentarem o circuito de bombeamento, portanto, são estudos que demandam maiores quantidades de minérios e, em especial, recursos financeiros. Aí está a questão básica dos estudos, em escala piloto, para separação gravítica, até que ponto os resultados obtidos justificam os recursos alocados (Mills, 1980 e Aubrey, 1986).

Os resultados oriundos de operações unitárias atendem parcialmente à exigência do projeto industrial. Tal lacuna nas investigações resulta em dificuldades constantes para o dimensionamento dos circuitos industriais, cuja solução deriva dos cálculos teóricos, com base em informações e/ou dados preexistentes.

Entretanto, as dificuldades mencionadas podem ser parcialmente superadas com a realização de testes unitários, aos quais são conferidos cuidados especiais, cujos resultados obtidos estão próximos daqueles resultantes dos estudos em circuitos contínuos. Para isso, uma equipe com disponibilidade de infra-estrutura e equipamentos adequados, além de

experiência comprovada na área, podem obter resultados confiáveis necessários a um projeto industrial de concentração gravítica.

## 2. PRINCÍPIO DE SEPARAÇÃO DA MESA OSCILATÓRIA

A separação torna-se mais eficiente quando os minerais leves e pesados possuem um critério de concentração maior que 2,0. Esse critério é definido como a razão entre as densidades dos minerais pesados e leves que se deseja separar, ambas diminuídas de 1,0. Entretanto, há casos em que minérios aparentemente inadequados à separação em mesa oscilatória, segundo esse critério, na prática, são ainda processados com sucesso nestes equipamentos. Isso decorre da forma e propriedades de superfície das partículas dos mesmos (Sampaio e Tavares, 2005).

Partículas com forma placosa, como mica, embora leves, não deslizam com facilidade e transversalmente ao tablado da mesa, por ação da corrente de água naquela direção. Tais partículas aderem-se parcialmente à superfície do tablado e dirigem-se para a área de coleta do concentrado ou da fração de pesados. Analogamente, partículas esféricas e densas podem mover-se na lâmina de água em direção à área de coleta dos minerais leves (Lins *et al.*, 2004 e Aplan, 2003).

## 3. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Há muito tempo, várias modificações foram introduzidas na mesa oscilatória, especificamente no tablado, nos sistemas de taliscas (*riffles*), com o objetivo de promover o melhor desempenho do equipamento, conforme ilustram as Figuras 1 e 2. Entretanto, os princípios básicos da operação permanecem inalterados. Outro avanço significativo foi a construção de mesas com deques múltiplos, isto é, deques sobrepostos na forma de pilha. Esses equipamentos possuem maior capacidade em virtude da elevada razão área/capacidade, todavia perdem, parcialmente, a sua flexibilidade de controle (Kelly, 1982 e Burt, 1984).

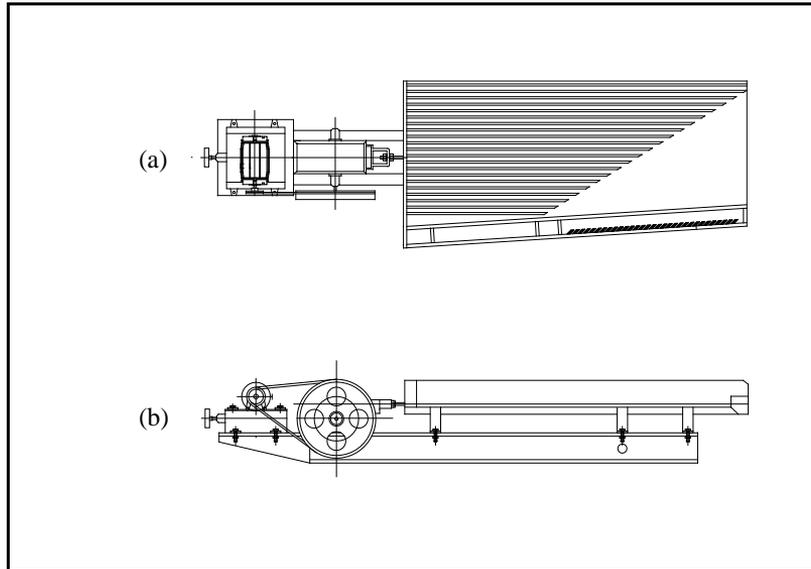


Figura 1 – Desenho ilustrativo do tablado da mesa oscilatória e sistema de acionamento na extremidade esquerda do diagrama.

O tamanho dos equipamentos varia muito, porém dados confiáveis de separação podem ser obtidos com equipamentos pequenos (45x100 cm) utilizados em laboratórios. No entanto, para dimensionamento de circuitos industriais, recomenda-se a geração de dados em circuito contínuo de escala piloto, com equipamentos maiores.

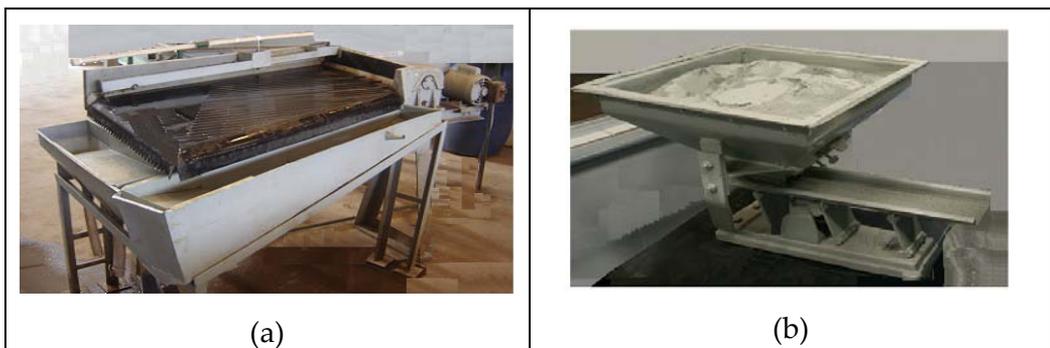


Figura 2 – Em (a), foto ilustrativa de uma mesa oscilatória e, em (b), foto do alimentador vibratório, ambos usados nos ensaios de mesagem do CETEM.

No mercado são disponibilizados dois modelos de mesas oscilatórias, o pneumático e o hidráulico, que é o mais usado. Neste trabalho encontram-se as instruções necessárias para realização de teste piloto e unitário em mesa oscilatória a úmido.

A amplitude da pulsação varia entre 10 a 25 mm ou mais e a velocidade varia entre 240 a 325 pulsações/min.

A profundidade das taliscas decresce desde a área de alimentação até a descarga dos pesados. Isso favorece a remoção das partículas leves do minério, além de dividir a ação do fluxo transversal de água sobre a superfície do tablado. O espaçamento entre as taliscas é função da granulometria do minério e do teor que se deseja obter no rejeito. Por essas e outras razões, há um certo grau de liberdade nas dimensões e distribuição das taliscas sobre o tablado das mesas oscilatórias. Quando a mesa é utilizada no processamento de minério grosso, se utiliza um sistema de taliscas mais extensivo, ou seja, que recobre maior área do tablado, sendo as taliscas mais altas. No caso da mesa utilizada para o processamento de minério fino, usa-se um sistema de taliscas mais baixas, com a finalidade de evitar distúrbios no leito das partículas finas, favorecendo a remoção das partículas leves do minério. Em geral, o sistema de taliscas da mesa tem por finalidade:

- (i) assegurar a estratificação das partículas sobre a superfície do tablado;
- (ii) agrupar as partículas pesadas para ação do movimento da mesa;
- (iii) favorecer maior ação da água de lavagem após a estratificação.

#### **4. QUANTIDADE E GRANULOMETRIA DO MINÉRIO**

Para realização de ensaio unitário em escala piloto são necessários, pelo menos, 50 kg de uma amostra representativa do minério. Isso é válido quando se trata de um minério complexo, e o circuito de concentração não exige etapas de moagem, deslamagem, limpeza, entre outras.

A granulometria da amostra deve estar compreendida na faixa de 2,0 mm até 37  $\mu\text{m}$ . Minérios com elevada quantidade de finos provocam uma perda parcial na eficiência do processo de mesagem, por isso, é aconselhável o

descarte da fração abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Em termos quantitativos deve-se eliminar a fração fina, quando esta atinge valores superiores a 5% da alimentação. O excesso da fração fina provoca aumento na viscosidade da polpa, reduzindo, de forma significativa, a recuperação do processo. Conclui-se que há necessidade de remover os finos, porém esse procedimento não deve comprometer a recuperação do mineral útil. A produção de finos, quando há etapa de moagem, não só aumenta o consumo de energia na cominuição e no bombeamento como também diminui a eficiência da separação.

## 5. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O teste unitário em escala piloto inicia-se com a secagem da amostra, seguida da britagem em dois estágios para evitar a produção de finos. Para tanto, recomenda-se a utilização de britadores de mandíbulas no primeiro estágio e o uso de britador de rolos no segundo, seguindo-se a remoção da fração fina, se existente. Reserva-se este procedimento aos minérios compactos. No caso de minério com granulometria de liberação até 37  $\mu\text{m}$ , recomenda-se cuidados especiais na etapa de cominuição para evitar a sobreemoagem. Desse modo, minimiza-se, de forma considerável, a quantidade da fração abaixo dessa granulometria.

Na etapa seguinte procede-se à homogeneização da mostra em pilha, para coleta de alíquotas representativas da amostra global, necessárias à execução dos testes. Recomenda-se a leitura do Capítulo 1 deste livro, bem como Goes *et al.*, 2004.

No caso de minérios com lamas, sua remoção deve ser feita após a cominuição da amostra. Essa etapa, dependendo da complexidade do minério, pode ser feita com peneiras, caso mais simples com pequenas quantidades de amostras, ou com auxílio de hidrociclones. Em algumas situações, várias etapas, como cominuição, classificação por hidrociclones ou outros classificadores e mesagem, fazem parte de um circuito piloto, com o objetivo de estudar o processo, evitando os efeitos causados pelas operações unitárias. Nesses estudos deve ser considerados a recirculação da água, cuja lama residual pode crescer no circuito e prejudicar a separação.

## 6. CONTROLE OPERACIONAL DA MESA OSCILATÓRIA

O controle operacional do processo de mesagem, associado aos tipos de equipamentos e/ou circuito, responde, de modo significativo, pela capacidade do equipamento (kg/h) e pela eficiência do processo. No caso de teste unitário em unidade piloto, o controle inicia-se com a preparação da amostra, escolha do tipo de mesa em harmonia com o objetivo do estudo e da natureza do minério.

Neste trabalho são descritos os procedimentos para obter o controle operacional de todo o teste, além de resultados consistentes oriundos da sua operação. Assim, o ajuste adequado das variáveis necessárias ao controle de uma operação eficiente é necessário à obtenção de resultados consistentes. O sucesso desse controle depende da experiência e habilidade do operador, já que se trata de algo empírico. Mesmo assim, as recomendações a seguir podem auxiliar nos procedimentos práticos dos testes de mesagem.

**A alimentação** ideal seria aquela em que há formação de uma monocamada na superfície da mesa. Entretanto, a prática revela a formação de um leito estratificado de partículas sobre a superfície da mesa, conferindo ao equipamento maior capacidade sem perda da sua eficiência. A otimização da taxa (kg/h) de alimentação é realizada durante o teste e depende, entre outros fatores, da habilidade e experiência do operador.

**A razão sólido/líquido** da polpa deve permanecer constante, e a água de lavagem deve favorecer a formação de uma lâmina de água sem turbulência sobre a superfície da mesa, bem como manter constante o balanço entre as correntes mesa abaixo e aquela transversal ao equipamento. O consumo de água no processo de mesagem depende da granulometria do minério na alimentação e do tipo de circuito, isto é, se há operações de *rougher* e limpeza. Nas operações *rougher*, o consumo varia entre 2.500 a 3.800 L/t de minério tratado, enquanto, nas operações de limpeza exige-se um consumo em torno de 2.800 L/t. No caso de minérios com lama, o consumo varia entre 2.200 a 2.800 L/t. Uma quantidade adicional de água, cerca de 25% do total da água usada na mesa, chamada de água de lavagem, é adicionada à mesa, com a finalidade de assegurar o transporte do minério sobre a superfície da mesa.

**A amplitude e a velocidade de pulsação** ou frequência são variáveis interdependentes. Quando se alimenta minério com granulometria grossa, exige-se maior amplitude na pulsação com menor velocidade; a situação oposta é utilizada para minérios com granulometria fina. Quando há pouca diferença de densidade, entre os minerais pesados e leves, em torno de 1 ou menos, recomenda-se a operação com menor amplitude. Os equipamentos mais avançados permitem a operação com maior velocidade, resultando em maior mobilidade das partículas sobre a mesa, maior capacidade (kg/h) e aumento da eficiência da separação.

**A inclinação do deque** deve ser ajustada pelo operador, de modo a obter boa distribuição do minério sobre a mesa. Entretanto, o seu aumento excessivo provoca maior descarga de minério na área de coleta do rejeito, bem como baixa a eficiência do processo. Somente os ensaios práticos e a habilidade do operador são capazes de determinar a inclinação ótima da mesa. No entanto, cada situação possui suas singularidades.

## **7. PROCEDIMENTO PARA EXECUÇÃO DE UM TESTE DE MESAGEM**

A operação da mesa oscilatória é um processo empírico e depende da natureza do minério e da complexidade do circuito. Portanto, a experiência e habilidade do operador são fundamentais para o êxito do processo. Mesmo assim, há procedimentos práticos que auxiliam, em muito, a operação desse equipamento e que favorecem a obtenção de resultados consistentes.

Na operação da mesa oscilatória com dimensões piloto, o operador deve conferir se todos os equipamentos estão disponíveis e em perfeito funcionamento. No Quadro 1 constam os materiais e equipamentos básicos à realização do teste piloto e unitário de mesagem.

Quadro 1 – Materiais e equipamentos essenciais à realização de um teste piloto e de mensagem.

<p><b>Limpeza da área</b></p> <p>Proceder à limpeza de toda a área de trabalho, bem como dos equipamentos a serem utilizados nos testes. Ao final de cada teste, deixá-los todos limpos e em perfeitas condições operacionais.</p>
<p><b>Suprimento de água</b></p> <p>Verifica-se a água adicionada na mesa é adequada ao processo e se molha por completo a superfície da mesa, assim como, se não há turbulência na lâmina de água, pois são condições fundamentais para o sucesso da separação. Além disso, verificar se a água é limpa o suficiente para o teste. É indispensável a instalação de rotômetros para medidas dos fluxos de água.</p>
<p><b>Amostra</b></p> <p>Verificar se a quantidade da amostra é suficiente para o teste, bem como se a sua granulometria está adequada ao teste.</p>
<p><b>Cronômetro</b></p> <p>O operador precisa cronometrar, entre outros, os tempos de amostragens e de duração do teste.</p>
<p><b>Detergentes</b></p> <p>Em geral, usa-se reagente para lavagem do tablado da mesa que deve estar limpo, a fim de que a água molhe por completo o mesmo. A finalidade dessa lavagem é remover da superfície do tablado algum produto que possa torná-la hidrofóbica.</p>
<p><b>Mesa oscilatória</b></p> <p>Disponibilidade de um equipamento, conforme ilustrada na Figura 1, com todos os compartimentos para coleta dos produtos e circuito hidráulico. O operador deve ligar a mesa só com água e verificar se o tablado está completamente molhado, caso contrário, recomenda-se nova lavagem do mesmo. Verificar se a pulsação e inclinação da mesa estão adequadas ao teste.</p>
<p><b>Alimentador vibratório</b></p> <p>O equipamento mais adequado é aquele com vibrador eletromagnético, conforme ilustrado na Figura 2. Na ausência desse equipamento, utiliza-se o método manual de alimentação, alternativa pouco recomendada, em decorrência da sua imprecisão.</p>
<p><b>Materiais e equipamentos acessórios</b></p> <p>São necessários baldes graduados para coleta de amostras e tonéis para coleta dos fluxos finais do concentrado, do misto e do rejeito. Assim, torna-se possível não só o cálculo dos balanços de massa e metalúrgico, bem como a repetição do ensaio, quando há escassez de amostra para o teste. Certificar se todos os equipamentos e acessórios estão nos seus devidos lugares e em condições de uso.</p>

Normalmente, a amostra seca é adicionada no alimentador vibratório e, em seguida, alimenta-se a mesa. O minério também pode ser alimentado sob a forma de polpa com percentagem de sólidos da ordem de 50%. A alimentação da amostra seca é preferida, diante da flexibilidade operacional. A taxa de alimentação é uma variável do processo e sua otimização faz parte do estudo a ser feito pelo pesquisador responsável pela pesquisa e, na prática, quantificada pelo operador. Nessa situação a mesa deve operar com sua capacidade máxima. Para isso, a taxa de alimentação (kg/h) e a percentagem de sólidos, devem ser maximizadas. Esses são exemplos de fatores básicos que favorecem a viabilidade econômica do processo, tornando-se possível atingir a produção desejada no circuito industrial, com o menor número possível de equipamentos.

Antes de iniciar os trabalhos de execução do teste, o operador deve conferir se há disponibilidade de todos os materiais e equipamentos listados no Quadro 1 e se os equipamentos estão funcionando corretamente. Verificar se o tablado e o sistema de taliscas da mesa não se encontram danificados, bem como limpos, isto é, sem graxa, óleo, ou outro produto que venha causar obstáculo à operação.

Ao conferir essas condições, o operador deve ligar o alimentador vibratório, cuja intensidade de vibração controla a taxa de alimentação, e o seu valor máximo determina a capacidade da mesa, objeto da etapa de otimização do ensaio. Ao adicionar o minério à mesa, há formação da polpa, que deve se espalhar por completo sobre a superfície do equipamento.

O ajuste das vazões do minério e da água é visual e depende muito da experiência e habilidade do operador. Este deve medir essas vazões com o devido cuidado, por certo, são dados importantes do processo. Na prática, as mesas trabalham com polpas diluídas, isto é, com 20-25% de sólidos. Valores mais elevados são usados no processamento de carvão. Quando a mesa entra em regime, coletam-se amostras dos produtos usualmente conhecidos como: pesados (em geral o concentrado), mistos e leves (usualmente o rejeito).

A quantidade de amostra de cada produto depende da natureza do minério, da complexidade do circuito, das análises químicas, dentre outros fatores. Para o caso dos mistos estes variam de 5 a 15% em peso da alimentação.

Quando os mistos coletados estão liberados, recomenda-se a sua recirculação. Caso contrário, procede-se a sua remoagem seguida do reprocessamento, ainda na mesa, desde que os limites granulométricos de operação da mesa permitam. Desse modo, fica assegurada maior recuperação ao processo de separação.

## **8. AMOSTRAGEM DO CIRCUITO**

O processo de amostragem, no teste de mensagem, deve ser feito após a sua otimização, ou seja, quando a mesa opera na sua capacidade máxima e nas condições de equilíbrio, com todos os fluxos constantes. A finalidade da amostragem é obter informações para cálculos dos balanços de massa e metalúrgico, análises químicas dos produtos, entre outras. A amostragem compreende as seguintes etapas.

A coleta de alíquotas simultâneas das vazões: de água (L/h), alimentação (kg/h), bem como dos produtos: concentrado, misto e rejeito todos em kg/h. Esses dados são essenciais para o cálculo da relação sólido/líquido, análises químicas, bem como dos balanços de massa e metalúrgico, dentre outros.

Após a amostragem, todos os produtos devem ser secados e pesados para os cálculos dos balanços de massa e metalúrgico. Também serão tomadas alíquotas representativas dos mesmos para análises químicas e mineralógicas. O bom procedimento do teste recomenda a execução do mesmo com o menor número possível de produtos. Esse procedimento só é viável quando a natureza do minério e a complexidade do circuito permitem. Dessa forma, facilita-se a execução de ensaio sob o aspecto de sua amostragem e da sua simplicidade operacional. Aconselha-se a coleta, sempre que possível, de todos os produtos do teste, principalmente, quando se trata de amostra muito pequena. Assim, é possível a repetição do teste quando a amostra tratada é muito reduzida.

## 9. COMENTÁRIOS

Aconselham-se cuidados especiais com os equipamentos, em particular com o tablado e o sistema de taliscas. O revestimento do tablado não deve ser danificado e a sua superfície deve sempre estar ausente de graxas, gorduras ou outros produtos químicos que a tornem a superfície da mesa hidrofóbica. A altura das taliscas deve permanecer constante, a modificação das mesmas é objeto de estudos, em geral, para atender casos especiais. Para tanto, as mesas devem sempre ser bem guardadas, com o propósito de mantê-las conservadas. Esta é a tarefa de um operador cuidadoso, caracterizado, mais ainda, pela execução espontânea dessas tarefas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aplan, F. F. The Gravity concentration. In: Fuerstenau, M. C. E Han, K. N. (Ed.) Principles of Mineral Processing. SME, 2003, p.185-219.
- Aubrey Jr, W. M. e Stone, R. L. Laboratory testing for gravity concentration circuit design. In: Mular, A. e Baphpu e Anderson, A. (Ed.). Design and installation of concentration and dewatering circuits. SME, 1986, p.433-453.
- Burt, R. O. Gravity concentration technology. Amsterdam: Elsevier, 1984, p.184-220.
- Goes, M. A. C.; Luz, A. B. e Possa, M. V. Amostragem. In: Luz, A. B., Sampaio, J. A. e Almeida, S. L. M. (Ed.). Tratamento de minérios.4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.19-54.
- Kelly, E. G. e Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.250-273.
- Lins, F. A. F. Concentração gravítica. In: Luz, A. B., Sampaio, J. S. e Almeida, S. L. M. (Ed.) Tratamento de Minérios.4ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004, p.241-270.
- Mills, C. Process design, scale up, and plant design for gravity concentration. In: Mular, A. e Bhappu, R. B. (Ed.) Mineral processing plant design. AIME, 1980, p.404-436.
- Sampaio, C. H. e Tavares, L. M. M. Beneficiamento gravimétrico. Porto Alegre: UFRGS Editora, 2005, p.411-458.