

# CAPÍTULO 16 – ENSAIOS EM ESPIRAIS CONCENTRADORAS

## **João Alves Sampaio**

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

## **Paulo Fernando Almeida Braga**

Engenheiro Químico/UFRRJ, Mestre em  
Engenharia Mineral/EPUSP  
Pesquisador do CETEM/MCT



## 1. INTRODUÇÃO

A espiral concentradora foi inventada por Ira Boyd Humphreys, em 1941, nos Estados Unidos da América e ficou conhecida como espiral de Humphreys. Na sua primeira versão, construída com anéis de pneus velhos, foram feitos os primeiros testes de concentração. Ainda naquela época, os modelos industriais foram construídos em ferro fundido, e cada espira pesava cerca de uma tonelada (Sampaio e Tavares, 2005). O equipamento sofreu aperfeiçoamentos, em termos de perfil e material de construção, para se chegar aos modelos modernos. Esses avanços resultaram num equipamento mais versátil, com um perfil que lhe associou uma eficiência mais elevada, quando usado na concentração de minérios.

No processamento mineral, a espiral concentradora é utilizada com sucesso, na concentração de minérios. Contudo, para a utilização deste equipamento, algumas propriedades físicas dos minerais devem ser consideradas, sobretudo a densidade, o tamanho e o formato dos grãos minerais (Aplan, 2003; Sampaio e Tavares, 2005).

A energia potencial contida na polpa, associada à força centrífuga decorrente do movimento circular da polpa, respondem pela eficiência no processo de separação. Isso decorre da forma helicoidal de sua calha semicircular, que propicia a esse equipamento uma eficiência de separação imbatível na faixa granulométrica de sua aplicação. Entretanto, para que ocorra a separação como processo de concentração, é necessário que a diferença entre as densidades do mineral valioso e da ganga seja igual ou superior a 1,0. Valores inferiores a 1,0 dificultam bastante a separação em espirais concentradoras, como por exemplo, a separação dos minerais calcita e fluorita (Burt, 1984; Kelly, 1982; Lins, 2004).

Nos dias atuais, a espiral concentradora substitui, com sucesso, a mesa oscilatória na maior parte das aplicações industriais. A razão disso está ligada aos seguintes fatores:

- (i) a espiral não possui partes móveis, entretanto, baixos custos de capital e manutenção;

- (ii) a sua construção, com materiais leves e duráveis, facilita o manejo do equipamento e demanda pequenos espaços para instalações.

Essas e outras vantagens fazem da espiral concentradora um equipamento competitivo e utilizado, com sucesso, em usinas de pequeno e grande porte. No processamento mineral, a espiral é empregada no beneficiamento de cromita, scheelita, cassiterita, minério de ferro, ouro, platina, diamante, fosfato, zirconita-rutilo-zircão e outros. No Brasil é utilizada na concentração de minério de ferro, cromita, cassiterita, bem como minerais pesados, como ilmenita, zirconita, rutilo e monazita.

Neste capítulo são discutidos os procedimentos operacionais para os ensaios unitários, em escala piloto, com espirais concentradoras, porque não há espiral em escala de laboratório.

## **2. MECANISMO DE FUNCIONAMENTO E DESCRIÇÃO DA ESPIRAL**

A polpa flui na espiral, isto é, num canal com seção semicircular modificada, onde cada partícula do minério é submetida a uma força centrífuga que, tende a arrastar a partícula na direção da periferia da calha, chegando às posições mais elevadas. Esta força centrífuga acumula a polpa com as partículas leves na borda externa da calha, até a corrente atingir um equilíbrio entre a força centrífuga e força gravitacional, que tende a mover as partículas baixas e na faixa interna da calha mais próxima da coluna central (Kelly, 1982; Burt, 1984; Sampaio e Tavares, 2005).

A velocidade da polpa na calha decresce com a profundidade, desde um máximo exatamente abaixo da superfície da polpa até o valor próximo de zero em contato com a superfície do canal. Esse movimento responde, em parte, pelo acúmulo das partículas grossas e pesadas (Mills, 1980).

O tanque está conectado a uma bomba horizontal GALIGER, modelo D-1S-VR-A-100, com 1½" x 1½", diâmetros de entrada e saída, acionada por um motor WEG de 5 hp e 1725 rpm. Um inversor de frequência instalado no circuito permite regular a velocidade da bomba com melhor precisão e conforto operacional.

O equipamento utilizado nos ensaios deste trabalho foi a espiral modelo 24-A-MRL, fabricada pela *Humphreys Engineering Company*, instalada na usina-piloto do CETEM. Esse equipamento, com 120° de inclinação da sua calha, está equipado com uma caixa de alimentação da polpa de minério acoplada à primeira seção da espiral, isto é, no topo do equipamento. A função principal dessa caixa é prover uma alimentação para a espiral, de forma contínua e sem turbulência.

Assim como a polpa, a água de lavagem é adicionada no topo da espiral, em um canal paralelo àquele interno à calha, pelo qual escoa a polpa. Esse canal possui rasgos que desviam a água de lavagem para o interior da calha, em uma operação de lavagem da polpa, daí o nome água de lavagem, conforme ilustrado na Figura 1.

Cada segmento da calha possui uma abertura próxima à borda interna da mesma com cerca de 5,0 cm de diâmetro. Nessas aberturas estão acoplados os desviadores de fluxo, com a função de conduzir, por meio de mangueiras, o material desviado até a tubulação central da espiral (Figuras 1 e 2).

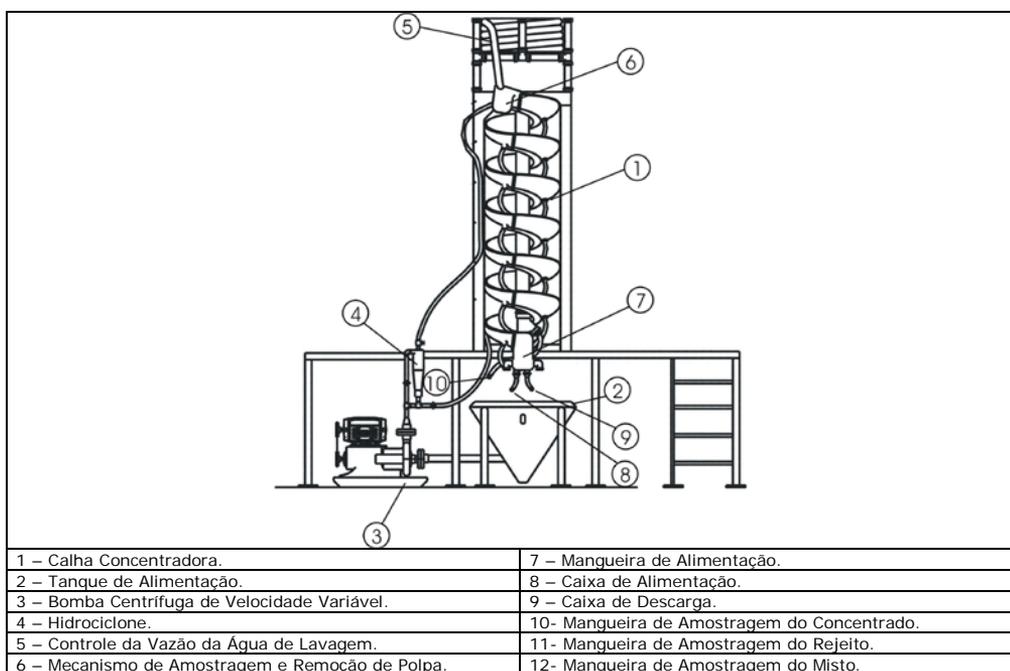


Figura 1 – Desenho esquemático do circuito para ensaios unitários, em espiral concentradora.

Na extremidade inferior da espiral, encontram-se as mangueiras de conexão dos produtos com o tanque de alimentação e assim pode-se coletar:

- (i) o concentrado, desviado da tubulação central para o tanque de alimentação;
- (ii) o rejeito, fluxo da calha que não foi desviado para a tubulação central da espiral;
- (iii) os mistos, parte do fluxo da calha que é recolhido separado em alguns modelos de espiral.



Figura 2 – Vista panorâmica das espirais concentradoras existentes na unidade piloto do CETEM.

### **3. PROCEDIMENTO DOS TESTES**

Os testes com espiral devem ser feitos, segundo o circuito das Figuras 1 e 2. Trata-se de um circuito fechado que utiliza uma quantidade de material da ordem de 10 kg (base seca) e uma percentagem de sólidos (%S) que varia com a natureza e granulometria do minério. As variáveis operacionais mais significativas do processo são a taxa de alimentação e a percentagem de sólidos na polpa de alimentação, dentre outras (Aubrey, 1986).

### **Taxa de Alimentação**

A taxa de alimentação é a principal variável do processo. O seu controle e otimização respondem, em particular, pelo desempenho do equipamento, em termos de produção e eficiência. A operação possui uma taxa ótima de alimentação específica para cada tipo de minério. Quando se atingem valores acima daqueles otimizados, isto é, quando o circuito opera com sobretaxa, ocorre um aumento na velocidade do fluxo na calha da espiral. Em decorrência, as partículas finas dos minerais pesados e as mistas são dirigidas ao fluxo das leves. Dependendo da vazão, pode ocorrer turbulência no leito de escoamento. Na prática são recomendadas vazões de polpa na faixa de 50 a 100 L/min e para a água de lavagem, os valores estão na faixa de 15 a 50 L/min. Diante disso, observa-se que as vazões da polpa e da água de lavagem variam segundo faixas muito amplas. Há, portanto, necessidade de otimização, mediante a execução de testes programados, o que, constitui o objeto da pesquisa, tarefa conferida ao responsável direto pela pesquisa. Nos estudos em escala piloto, a espiral deve trabalhar sempre com sua capacidade máxima e no estado de equilíbrio para então se registrar os dados necessários ao *scale up*. Do contrário, os dados serão irrealis.

### **Porcentagem de Sólidos (%S) na Polpa de Alimentação**

A porcentagem de sólidos na alimentação responde pelo desempenho do equipamento e eficiência da separação. Seus valores são dependentes da densidade e da granulometria do minério. Na prática, é comum o uso de porcentagens de sólidos na faixa de 20 e 30%. Para minérios com granulometria grossa, esses valores podem chegar até 50%. Para aqueles com granulometria fina é usual trabalhar com polpas diluídas, em especial, com os minerais pesados. A porcentagem de sólidos na polpa constitui um dos propósitos de estudo, cujo encargo compete ao pesquisador responsável pelas investigações.

### **Granulometria e Forma dos Grãos do Minério**

As espirais concentradoras trabalham com minérios, cuja faixa varia desde 3,0 mm até 37  $\mu$ m. A densidade do mineral pesado que se deseja recuperar responde, de forma significativa, pela amplitude dessa faixa granulométrica. Os melhores resultados são obtidos na faixa granulométrica

entre 1,0 mm e 74  $\mu\text{m}$ . Entretanto, para faixa muito ampla recomenda-se a operação em duas faixas, uma grossa e outra fina, cuja definição é também objeto de estudo. No circuito fechado de unidade piloto, recomenda-se a utilização de amostras com granulometria abaixo de 3,0 mm, para facilitar a operação de bombeamento da polpa.

A forma dos grãos do minério influi no processo de separação. Assim, a força centrífuga, que atua nas partículas lamelares durante o seu movimento na calha da espiral, possui um efeito mais significativo sobre essas partículas, em comparação àquelas de forma regular. Como conseqüência, elas são deslocadas para a faixa das partículas leves, na parte externa da calha, e saem no rejeito, mesmo que a diferença de densidade seja pequena. Um exemplo típico desta situação é a separação da mica ou vermiculita de gangas, como quartzo, calcita, epidoto ou horniblenda. Os minerais de ganga possuem densidades próximas, todavia a forma lamelar da mica favorece o seu deslocamento à zona de velocidade mais elevada da polpa, ao contrário dos grãos de quartzo, feldspato etc. No Brasil, um exemplo prático desta situação ocorre na remoção da mica do concentrado de cromita, na operação de purificação do mesmo, ambos obtidos na mesma usina. Isso ocorre no circuito da mina de Ipueira, da FERBASA, no município de Andorinhas, BA.

### **Capacidade do Equipamento e Vazão da Polpa**

A quantidade (kg/h) ótima de sólidos na espiral é objeto de estudo, entretanto, é comum a operação até 2,5 t/h por espiral. Os melhores resultados são obtidos com valores em torno de 1,5 t/h por espiral. Na prática, o melhor desempenho do equipamento é alcançado quando o equipamento opera na sua capacidade máxima (Aubrey, 1986).

O fluxo ótimo (L/h) de polpa na espiral depende das características do minério tratado, dos equipamentos utilizados e da complexidade do circuito. Para minérios finos, as operações são levadas a efeito com fluxos de polpa na faixa de 3.400 a 4.000 L/h. No caso dos minérios com granulometria grossa, é comum a operação na faixa de 4.500 a 5.500 L/h.

Nas duas condições, os estudos de otimização têm como foco a operação da espiral com capacidade máxima e constitui essas variáveis uma das primeiras etapas da investigação, especialmente em unidade piloto.

### **Preparação da Amostra e Operação do Circuito**

A quantidade de amostra usada para os estudos de concentração com espiral depende, entre outros fatores, da:

- (i) finalidade dos testes, isto é, do nível de informações que se deseja obter para dimensionamento do circuito industrial;
- (ii) com disponibilidade da amostra e um estudo feito com detalhes exige, pelo menos, 200 kg de amostra.

No caso de uma faixa muito ampla, caso dos minérios de ferro, é aconselhável classificar o minério em duas ou mais faixas granulométricas. Este procedimento melhora, significativamente, o desempenho do equipamento. De modo análogo, aconselha-se a remoção da fração argilosa, quando essa ocorre no minério.

A primeira etapa dos trabalhos inicia-se com a moagem da amostra a uma granulometria, de acordo com a faixa granulométrica de operação do equipamento e o grau de liberação do minério. Em seguida prepara-se uma pilha de homogeneização e procede-se o quarteamento da amostra em subamostras de 5,0 kg.

Na segunda etapa toma-se uma quantidade de amostra moída e seca (cerca de 10 kg) para preparação da polpa com percentagem de sólidos preestabelecida, trabalho conferido ao pesquisador responsável pela investigação. Primeiro adiciona-se a água no tanque cônico de alimentação (capacidade máxima de 90 L), em quantidade suficiente para a polpa atingir a percentagem de sólidos desejada.

Na terceira etapa liga-se a bomba para circulação da água e adiciona-se, lentamente, a amostra ao tanque de alimentação da bomba. Assim, a polpa vai se formando de forma homogênea, sem a sua sedimentação. O *overflow* do hidrociclone ligado à descarga da bomba, é utilizado como água de lavagem. Na prática, essa água possui a função de deslocar, até a borda externa da calha, as partículas leves localizadas no topo do leito das partículas pesadas. No caso das operações com minério grosso, há maior demanda de água de lavagem que os minérios finos. O excesso da água de lavagem provoca

turbulência no fluxo de polpa. Além disso, conduz as partículas pesadas com granulometria fina à borda externa da calha, onde escoam o rejeito do processo.

Nas operações industriais, esse procedimento é feito com água nova. Não é possível o uso desse procedimento nos circuitos pilotos. Assim, a água nova adicionada seria acumulada no circuito e diminuiria, de forma contínua, a percentagem de sólidos na polpa de alimentação, o que inviabilizaria a operação.

A fração grossa do hidrociclone (polpa de minério) segue para a caixa de alimentação da espiral, retornando ao tanque de alimentação, por meio da calha da espiral, onde são coletados, na tubulação central, os minerais pesados (concentrado). Essa etapa é feita com auxílio dos desviadores de fluxo existentes ao longo da calha. A quantidade de material desviado varia de 5 a 95% e depende do tipo de minério e do circuito, ou seja, é objeto de estudo para cada situação. O fluxo remanescente (rejeito) retorna ao tanque de alimentação pela calha da espiral.

No final da espiral, o concentrado, o rejeito e os mistos juntam-se no tanque de alimentação e retornam à alimentação da espiral, mediante o bombeamento. Desse modo, completa-se o circuito da polpa na operação da unidade piloto, em circuito fechado.

### Exemplo 1

Num ensaio com espiral concentradora, em unidade piloto, o operador precisa preparar uma polpa ( $v = 90$  L com e 30% sólidos) com um minério de densidade  $2,7 \text{ g/cm}^3$ . Quanto de minério e água ele deve misturar para preparar essa polpa?

De acordo como a Equação 5, Capítulo 2 tem-se:

$$(\%S) = 100 \frac{d_s(d_p - 1000)}{d_p(d_s - 1000)}$$

$$(30) = 100 \frac{2700(d_p - 1000)}{d_p(2700 - 1000)} \quad \text{ou} \quad d_p = 1.230 \text{ kg/m}^3 = 1,23 \text{ g/cm}^3$$

De acordo com a Equação 4 do Capítulo 2, pode calcular a massa da popa ( $m_p$ ), desde que, se conhece o volume de polpa  $v_p = 90 \text{ L} = 0,09 \text{ m}^3$ .

$$(d_p) = \frac{m_p}{v_p} \quad \text{ou} \quad (m_p) = (d_p)(v_p)$$

$$(m_p) = (d_p)(v_p) = (1.230)(0,09) = 110,7 \text{ kg ou } 110,7 \text{ L}$$

Se a percentagem de sólidos na polpa é 30% tem-se

100 kg/polpa                      30 kg de minério ou sólidos

110,7                                      x = 33,21 kg de minério.

A diferença entre as massas de polpa e sólidos corresponde a massa de água, isto é:

$$110,7 - 33,21 = 77,49 \text{ kg ou } 77,49 \text{ L de água.}$$

Logo o operador deve realizar as seguintes etapas:

- (i) pesar 33,21 kg do minério e reservar, em um recipiente, 77,49 L de água;
- (ii) adicionar os 77,49 L de água no tanque de alimentação da espiral, em seguida, ligar a bomba para circular a água;
- (iii) com a bomba ligada o operador deve adicionar, vagarosamente, os 33,21 kg de minério ao tanque de alimentação da espiral e esperar a bomba circular a polpa até o sistema atingir o estado de equilíbrio.

#### 4. CONTROLE E AMOSTRAGEM DO CIRCUITO

As informações que devem ser obtidas nos testes unitários são: taxa de alimentação (kg/h), percentagem de sólidos da polpa, fluxos de massa do concentrado, rejeito e mistos (kg/h). Os efeitos das variações do teor e do conteúdo de lama sobre o teor do produto final e sobre a recuperação do processo devem ser determinados, bem como outros julgados necessários.

Quando o circuito está em equilíbrio, procede-se à amostragem do concentrado, rejeito e mistos. A quantidade de material retirado pode ser calculada, e uma quantidade equivalente é adicionada ao tanque de

alimentação. Repete-se este procedimento até que a quantidade de amostra retirada do circuito seja igual à quantidade reposta ao mesmo.

Também facilita, sobremodo, o controle operacional dos ensaios, a existência, no circuito, de um inversor de frequência, para controle de velocidade do motor da bomba, bem como o manômetro na entrada do hidrociclone. O inversor de frequência mantém constantes a velocidade e a pressão do sistema, motor e bomba. Desse modo, o fluxo de alimentação também permanece constante, pois a rotação da bomba e a pressão na entrada do hidrociclone permanecem fixas, analogamente, os fluxos das frações grossa e fina no hidrociclone. Vale lembrar que o fluxo da água de lavagem é também controlado com auxílio de um dispositivo regulador (rotâmetro), situado no topo da espiral. Essa regulagem depende das condições operacionais de cada teste, algo percebido pela habilidade do operador. Este é o mesmo que deve ainda ficar atento à monitoração dessas vazões, por serem essenciais à obtenção de resultados consistentes.

Na primeira etapa, o operador certifica-se de que os fluxos de polpa e de água de lavagem estão constantes e o circuito opera no seu estado de equilíbrio, segundo uma amostragem dessas vazões no topo da espiral. Em seguida, o operador deve coletar uma amostra da polpa desses fluxos com volume conhecido e tempo cronometrado.

A segunda etapa do controle operacional consiste no posicionamento dos desviadores de fluxo. Isto depende da experiência do operador e das condições utilizadas na realização do ensaio.

Finalmente, realiza-se a amostragem do concentrado e do rejeito, na parte inferior da espiral. Para manter o circuito sem distúrbios operacionais, o tempo de amostragens desses fluxos nunca deve ser superior a 10 s. Na coleta de amostras, o operador deve utilizar recipientes graduados para medidas dos fluxos de polpa e de sólidos; cujo tempo de amostragem deve ser devidamente cronometrado.

A amostragem do circuito sempre deve ser inicializada no sentido contrário ao da alimentação, de forma a minimizar o efeito de algum distúrbio que possa ocorrer no circuito.

Ao final do teste, compete ao operador limpar todo o circuito, removendo a água e o minério remanescentes nos equipamentos. Assim, ele prorroga a vida útil dos equipamentos, além de garantir a reprodutibilidade dos testes futuros. Tal procedimento reserva ao mesmo operador o compromisso com a manutenção dos equipamentos.

## 5. LEMBRETES ÚTEIS PARA UMA BOA OPERAÇÃO DA ESPIRAL

As seguintes sugestões são válidas para uma alimentação com fluxo constante, bem como a água de lavagem.

### **Quando há um persistente areiamento (formação de bancos de areia na calha)**

Verifique se há aberturas entupidas ou bloqueadas e providencie a limpeza da superfície do canal da espiral.

Aumente o ajuste do desviador de fluxo para acima da área congestionada.

Aumente a diluição de polpa na alimentação, entretanto não ultrapasse 130 L/min por espiral.

Aumente o volume da água de lavagem, se estiver abaixo de 40 L/min, todavia fique atento para não ultrapassar o limite, em torno de 45 L/min.

Verifique o passo de cada espiral, em um ponto médio entre os membros estruturais de aço da armação.

Verifique o prumo da espiral, usando uma régua adequada, posicionada contra os frisos externos de cinco espirais entre os suportes de aço. A espiral deverá estar no prumo com um máximo desvio de 6,0 mm. Nenhuma espiral pode estar mais de 3,0 mm fora de posição. A situação ideal é aquela na qual a espiral encontra-se na posição vertical.

### **Se o concentrado apresentar uma classificação inconsistente**

Verifique se há aberturas entupidas e aspereza nas superfícies da espiral.

Use água de lavagem suficiente para manter uma banda de concentrado consistente nas duas últimas espiras da espiral.

Aumente o volume da alimentação (L/h) e reduza o número de desviadores de fluxo, seguido do ajuste dos mesmos.

**Se a classificação do concentrado for consistentemente pobre**

Aumente o volume da água de lavagem, se estiver abaixo de 45 L/min.

Aumente a taxa de alimentação, se estiver inferior a 0,5-1,0 t/h por espiral, reduzindo-a sempre que o valor for superior a 2 t/h por espiral.

Reduza o número de aberturas em uso e ajuste, adequadamente, os desviadores de fluxos.

**Se há quantidade elevada de rejeito**

Verifique se há aberturas entupidas.

Limpe as superfícies das espirais e verifique se todas aberturas dos desviadores de fluxo estão desobstruídas.

Reduza a água de lavagem.

Diminua a quantidade de mistos recolhidos, se for de baixo teor, com pouco mineral pesado e grosso ou partículas médias ricas.

Use menos aberturas, particularmente, se o concentrado estiver com baixo teor, para levar mais minerais de ganga ao rejeito.

Aumente a taxa de alimentação na espiral, se estiver abaixo de 1,5 t/h por espiral, e aumente, quando este valor for superior a 2,0 t/h por espiral.

**Se o concentrado transborda para o canal de água de lavagem**

Aumente o volume da polpa na alimentação e use mais água de lavagem, se o volume estiver inferior a 40 L/min.

Use mais desviadores de fluxo e ajuste-os adequadamente.

Limpe as acumulações de detritos, *oversize*, ferrugem, limo ou outros depósitos, das superfícies de passagem da lama e do canal da água de lavagem.

Diminua a carga de minerais pesados das espirais.

## 6. COMENTÁRIOS

O desempenho das espirais decresce de forma significativa nas operações com minérios de granulometria finas, especialmente, abaixo de 37  $\mu\text{m}$ . Nestes casos recomenda-se cuidado especial nos circuitos de moagem do minério para não ocorrer sobremoagem.

Quando há uma fração de partículas mistas no minério, remenda-se a sua recirculação ou remoagem para liberação do mineral útil e posterior concentração. Isso é comum nos minérios com liberação em várias faixas granulométricas. É aconselhável que a taxa de circulação não exceda os 10% da alimentação nova.

## 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 Bhappu 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.261-287.
- 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. A. 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.271-410.