

## CAPÍTULO 17 – ENSAIOS EM MEIO DENSO

### **José Aury de Aquino**

Engenheiro Químico/UFC, Mestre em  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais/COPPE-UFRJ  
Doutor em Engenharia Química/UNICAMP  
Pesquisador Titular do CDTN/CNEN/MCT

### **Maria Lúcia M. de Oliveira**

Engenheira Mecânica/CEFET-MG, Mestre em  
Engenharia de Minas e Metalurgia/UFMG  
Doutora em Engenharia Química/UNICAMP  
Consultora da MCE Consultoria e Engenharia Ltda.

### **Paulo Fernando Almeida Braga**

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



## 1. INTRODUÇÃO

O processo de separação em meio denso (*heavy media separation*) possui elevada eficiência, mesmo considerando a sua limitada faixa granulométrica de aplicação. A principal aplicação deste processo consiste na eliminação de parte da ganga após britagem, realizando uma pré-concentração com o objetivo de reduzir os custos do tratamento posterior. Além disso, esses processos são também aplicados na obtenção de concentrado final, adequado ao tratamento metalúrgico (minerais metálicos) ou diretamente para consumo (carvão).

A concentração em meio denso consiste na separação dos minerais de diferentes densidades contidos em um dado minério, através de um meio com densidade intermediária à dos minerais, de forma que os minerais com densidade inferior ao meio flutuem e aqueles com densidade superior afundem. O princípio é, portanto, muito simples e pode ser ilustrado com o seguinte exemplo: uma mistura de galena ( $d = 7,5 \text{ g/cm}^3$ ), fluorita ( $d = 3,18 \text{ g/cm}^3$ ), calcita ( $d = 2,72 \text{ g/cm}^3$ ) e quartzo ( $d = 2,65 \text{ g/cm}^3$ ) colocada em um meio com densidade  $2,9 \text{ g/cm}^3$  nos fornecerá uma fração flutuada constituída de calcita e quartzo e outra afundada contendo galena e fluorita.

Os primeiros estudos de meio denso datam de 1858, quando Bessemer patenteou o uso de líquidos densos constituídos de soluções de cloretos metálicos. Em 1911, a Du Pont desenvolveu e patenteou um método de separação usando hidrocarbonetos clorados para purificação de carvão. No entanto, o primeiro avanço significativo data de 1917, quando foi patenteado o processo Chance, que não pode ser considerado como uma separação em meio denso no sentido estrito da palavra, uma vez que o meio era constituído de um leito de areia hidraulicamente dilatado. Em 1928 Lessing desenvolveu o uso de soluções de cloreto de cálcio para purificar carvão. Esse método foi abandonado devido aos problemas de corrosão e ao alto custo para recuperação do meio denso. Em virtude dos problemas anteriormente mencionados e do elevado custo dos líquidos densos, procurou-se substituí-los por suspensões de alguns minerais em água. Em 1931 começou-se a usar suspensões de argilas, gesso e pirita e, em 1932, Vöoys empregou uma suspensão de barita e argilas para lavagem de carvão. com esses materiais

tornou-se possível obter suspensões com densidade máxima de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . Como estas suspensões não possibilitam a separação dos minerais metálicos de sua ganga, devido a sua baixa densidade, foi investigada a possibilidade de usar galena como meio denso. Após a sua aplicação comprovada em unidade piloto, o método foi usado industrialmente, em 1939, para concentração de zinco e chumbo. No entanto, devido ao excesso de finos produzidos na operação de moagem da galena e, portanto, acarretando, baixa eficiência de recuperação desse mineral no processo de flotação, foram usados magnetita e ferro-silício como alternativas (Campos *et al.*, 2004).

Outro fator limitante na separação em meio denso sempre foi a granulometria, pois os primeiros equipamentos conhecidos e utilizados (cone e tambor) só permitiam tratar minérios com tamanho superior a 6,0 mm. Nesta granulometria, geralmente o grau de liberação é baixo e, portanto, a operação é ineficiente. Hoje, o uso do dynawhirlpool, um tipo de ciclone, permite a separação de minerais com granulometria até 0,30 mm ou 48 malhas (Kelly, 1982).

## 2. TIPOS DE MEIO DENSO

Para separação dos minerais podem ser utilizados os seguintes tipos de meio denso:

- (i) soluções aquosas de sais inorgânicos;
- (ii) líquidos orgânicos;
- (iii) suspensões de sólidos em água.

### **Soluções Aquosas de Sais Inorgânicos**

As primeiras aplicações dos processos de separação em meio denso foram realizadas com soluções aquosas de sais inorgânicos, para purificação de carvão, tais como os Processos Lessing, Bertrand e Belknap. Os principais sais inorgânicos utilizados foram: cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) e cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ). Estes sais, embora sejam mais baratos em comparação aos líquidos orgânicos e possibilitem o tratamento de amostras úmidas, não permitem a obtenção de soluções com densidade superior a  $1,95 \text{ g/cm}^3$  (Burt, 1984).

## Líquidos Orgânicos

Os líquidos orgânicos são comumente utilizados em laboratório, para estudos preliminares de concentração e determinação do grau de liberação dos minerais que compõem um minério. Esses líquidos são tóxicos, corrosivos, possuem baixa pressão de vapor e, conseqüentemente, provocam grandes perdas por volatilização e, por isso, não são usados industrialmente. Os principais líquidos orgânicos utilizados na separação dos minerais estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Líquidos orgânicos utilizados na separação dos minerais, densidade expressa em g/cm<sup>3</sup> a 20<sup>o</sup> C.

Líquido	Fórmula	Densidade
Tricloroetano	CCl <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	1,330
Triclorobromometano	CCl <sub>3</sub> Br	2,001
Brometo de Metileno	CH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub>	2,484
Tribromofluormetano	CBr <sub>3</sub> F	2,748
Bromofórmio	CHBr <sub>3</sub>	2,890
Tetrabromoetano	CHBr <sub>2</sub> CHBr <sub>2</sub>	2,964
Iodeto de Metileno	CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>	3,325
Solução Cléricsi	CH <sub>2</sub> (COOTI) <sub>2</sub> -HCOOTI	4,280

O **Bromofórmio** pode ser misturado com tetracloreto de carbono para produzir líquidos com densidades entre 1,58 e 2,86 g/cm<sup>3</sup>. O **Tetrabromoetano** é um dos líquidos mais amplamente utilizados. O **Iodeto de Metileno** não deve ser aquecido nem exposto à luz forte, pois se decompõe vagarosamente liberando iodo. Isto é percebido pela mudança da sua coloração da cor palha amarelada para vermelho. Dentre todos os líquido densos, a **Solução de Cléricsi** possui a maior densidade sendo, portanto, utilizada na separação de minerais com densidades entre 3,0 e 5,0 g/cm<sup>3</sup>, ou seja, de todos os minerais metálicos de suas gangas. É usualmente utilizada em temperatura levemente acima da temperatura ambiente e quando se necessita de uma elevada densidade de separação, são utilizadas soluções saturadas a quente. Essa

solução é extremamente venenosa, sendo rapidamente absorvida pela pele, podendo causar danos ao sistema nervoso, respiratório e digestivo. Para sua utilização, é recomendado o uso de máscaras de gás, roupas, luvas, óculos e outros equipamentos de proteção (Sampaio e Tavares, 2005).

As densidades intermediárias às dos líquidos densos, mencionados na Tabela 1, são obtidas segundo sua mistura com diluentes, tais como: acetona ( $d = 0,788 \text{ g/cm}^3$ ), benzeno ( $d = 0,879 \text{ g/cm}^3$ ), álcool etílico ( $d = 0,89 \text{ g/cm}^3$ ), di-n-butyl ftalato ( $d = 1,047 \text{ g/cm}^3$ ) e tetracloreto de carbono ( $d = 1,50 \text{ g/cm}^3$ ). Os diluentes devem ser totalmente miscíveis com os líquidos densos e são utilizados para obtenção de meios com densidades intermediárias e para lavagem dos produtos obtidos em uma separação. Esses líquidos devem possuir baixa pressão de vapor e ponto de ebulição superior a  $50^\circ\text{C}$ , de modo a manter estável a densidade da mistura.

Para determinação da densidade de um meio obtido com base na mistura de dois líquidos densos ou de um líquido denso e um diluente, é usualmente utilizada a seguinte equação:

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{d_1 - d}{d - d_2} \quad [1]$$

onde:

$V_2$  = volume de líquido de densidade  $d_2$  (mL);

$V_1$  = volume de líquido de densidade  $d_1$  (mL);

$d$  = densidade da mistura desejada;                       $d_2$  = densidade do líquido 2;

$d_1$  = densidade do líquido 1.                                      Obs. densidades em  $\text{g/cm}^3$

Uma propriedade importante dos líquidos densos e diluentes é a pressão de vapor, que está associada a sua estabilidade. Quanto menor for a pressão de vapor destes líquidos e a diferença entre a dos líquidos misturados (líquido denso e diluente), mais estável será a densidade da mistura líquida. Ressalta-se que a densidade do meio deve ser periodicamente conferida, principalmente no caso de misturas com diluentes, devido à instabilidade que essas misturas apresentam, principalmente em relação à temperatura e evaporação (Aplan, 2003).

Os líquidos orgânicos possuem as seguintes vantagens com relação às suspensões sólidas: baixa viscosidade, alta estabilidade e baixa ação corrosiva. Entretanto, o alto custo e a toxidez inviabilizam o seu uso em escala industrial.

### **Suspensões de Sólidos em Água**

Os meios densos utilizados industrialmente são preparados segundo uma suspensão aquosa de sólidos finamente moídos que têm as seguintes propriedades:

**densidade relativamente alta** – a fim de obter uma polpa com densidade suficiente à separação dos minerais mais pesados;

**friabilidade** – o suficiente para moagem dos sólidos a uma granulometria fina e, portanto, permaneçam em suspensão;

**resistência à abrasão** – para minimizar a geração de partículas coloidais e, portanto, de difícil recuperação no circuito;

**fácil recuperação dos finos de minério retidos na polpa de meio denso** – estes finos prejudicam a separação dos minerais pelo aumento da viscosidade da polpa de meio denso.

Os sólidos que preenchem todos ou a maioria dos requisitos mencionados e, portanto, os mais usados industrialmente são: magnetita, ferro-silício e galena.

Atualmente, a galena tem a sua aplicação restrita a poucas instalações industriais, em decorrência da sua recuperação por flotação ser baixa, devido ao excesso de finos produzido na moagem. Isto resulta em perda do meio denso (galena) e, conseqüentemente, variação na densidade da polpa. Em função dessas dificuldades a galena, foi substituída pela magnetita e ferro-silício, como meio denso.

O principal avanço na aplicação dos meios densos ferrosos foi a possibilidade de sua separação dos finos do minério, por meio do processo de separação magnética. Considerando que a magnetita tem uma densidade de 5,0 a 5,2 g/cm<sup>3</sup>, permitindo a obtenção de uma polpa com densidade máxima de 2,5 g/cm<sup>3</sup>, sua utilização como meio denso fica restrita apenas à separação

de minerais de baixa densidade, tais como: grafita, gipsita e, principalmente, carvão (Aplan, 1985).

O ferro-silício é uma liga composta basicamente de silício ( $\approx 15\%$ ) e ferro ( $\approx 85\%$ ) com densidade de  $6,9 \text{ g/cm}^3$ , que permite a obtenção de polpas com densidade máxima de  $3,4 \text{ g/cm}^3$ . Esta densidade é suficiente à separação da maioria dos minerais metálicos de sua ganga, tornando-o, com isto, o meio denso mais utilizado industrialmente. O teor de silício na liga não deve ser inferior a  $15\%$  e superior a  $22\%$ , em virtude de sua oxidação e baixa suscetibilidade magnética, respectivamente.

### 3. APLICAÇÃO DO PROCESSO DE MEIO DENSO

Embora o princípio de separação por meio denso seja bastante simples, sua aplicação em escala industrial depende de uma série de fatores de ordem tecnológica e econômica. Os principais fatores tecnológicos dependem principalmente das características mineralógicas do minério, como a seguir.

#### **Diferença de Densidade**

De uma maneira geral, pode-se dizer que, quanto maior a diferença entre as densidades dos minerais útil e de ganga, melhor é a separação. No entanto, é possível a separação de minerais que tenham uma diferença de densidade de apenas 0,2 unidades. Esta diferença é inferior à necessária para separação em operações de concentração gravítica, como a jigagem, permitindo a concentração de maneira mais eficiente, por meio denso, de todos os minerais que possam ser separados por jigsawes.

#### **Granulometria de Liberação**

Para a concentração em meio denso, os minerais úteis devem estar liberados dos minerais da ganga em uma granulometria acima de  $(0,3 \text{ mm})$  48 malhas, tamanho limite para obtenção de um bom desempenho na separação por este processo. Em função disso, pode-se afirmar que a separação em meio denso somente é possível quando os minerais úteis não estão disseminados na rocha.

## Densidade do Meio

As suspensões de meio denso atualmente utilizadas na concentração de minerais abrangem uma faixa de densidade entre 1,25 e 3,40 g/cm<sup>3</sup>. Esta faixa de densidade pode ser obtida utilizando suspensões de magnetita, mistura de magnetita com ferro-silício e ferro-silício puro. A magnetita é utilizada para suspensões com densidade máxima de 2,2 g/cm<sup>3</sup>, a mistura de magnetita com ferro-silício para a faixa de densidade de 2,2 a 2,9 g/cm<sup>3</sup> e ferro-silício puro para suspensões com densidade de 2,9 a 3,4 g/cm<sup>3</sup>.

A densidade de uma suspensão é função da densidade do sólido utilizado e da quantidade de sólido adicionado ao meio. Essa densidade pode ser calculada segundo a Equação [2].

$$d_p = \frac{100}{\frac{(\% S)}{d_s} + (100 - (\% S))} = 100 \frac{d_s}{(\% S) + d_s (100 - (\% S))} \quad [2]$$

onde:

$d_p$  – densidade da suspensão ou polpa;

$d_s$  – densidade dos sólidos;

(%S) – percentagem em peso dos sólidos na suspensão.

À medida que aumenta a concentração de sólidos, aumenta a densidade da suspensão. O limite da concentração de sólidos das suspensões encontra-se entre 70 e 86% em peso.

## 4. PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE MEIO DENSO

As principais etapas do processo de meio denso estão ilustradas no diagrama da Figura 1. Observa-se que o minério preparado é alimentado em equipamentos específicos, nos quais é misturado a uma polpa de meio denso com densidade ajustada e, posteriormente, separado em dois produtos denominados flutuado e afundado. Esses produtos são descarregados em peneiras para separação por drenagem da maior parte do meio denso, que retorna ao circuito. As frações flutuada e afundada, contendo ainda meio

denso retido na superfície das partículas, são lavadas. O meio denso diluído é recuperado e, em seguida, a sua densidade é ajustada para recircular na alimentação do circuito. A seguir serão discutidas as principais etapas dos processos de separação em meio denso.

### **Preparação da Alimentação**

Para concentração de um dado minério, segundo a técnica de separação em meio denso, o material deverá ser cominuído a uma granulometria adequada e, em seguida, deslamado. Os separadores estáticos, cone e tambor, são utilizados para concentração de minérios na faixa granulométrica mais grossa ( $- 8 + \frac{1}{4}''$ ) e os separadores dinâmicos, ciclone e *dynawhirpool* para uma granulometria mais fina ( $-1 \frac{1}{2}'' + 28 \#$ ).

A etapa de deslamagem é necessária para evitar a redução da densidade e o aumento da viscosidade do meio denso, acarretado pela presença de finos de minério na suspensão.

### **Separação do Minério em dois Produtos**

O minério classificado e deslamado são alimentados em um separador estático ou dinâmico. O separador contendo uma polpa de meio denso, a uma densidade pré-determinada, separa o minério em dois produtos: flutuado e afundado. As partículas minerais do flutuado e afundado possuem densidade inferior e superior à densidade da polpa de meio denso, respectivamente.

### **Descarga dos Produtos, Separação e Recuperação do Meio Denso**

A descarga dos produtos da concentração (flutuado e afundado), obtidos na operação dos separadores estáticos, é realizada por meio de dispositivos mecânicos. Nos separadores dinâmicos, o próprio fluxo sob pressão é o responsável pelo descarregamento dos produtos. A maior parte do meio denso que é descarregado dos equipamentos com as frações flutuada e afundada é recuperada em uma peneira e recirculada na alimentação do circuito. O Fe/Si, aderido às partículas minerais, é removido por uso de jatos de água sobre o material que passa pela superfície de uma peneira vibratória e, então, recuperado na fração fina do peneiramento.



Na Tabela 2 constam alguns tipos de meios densos com seus respectivos processos de limpeza.

Tabela 2 – Processos de limpeza de alguns meios densos

Tipo de meio denso	Processo de limpeza
Areia	Classificação
Soluções de sais (CaCl <sub>2</sub> ; ZnCl <sub>2</sub> )	Evaporação
Galena	Flotação
Magnetita e Ferro-Silício	Separação Magnética

## 5. PRINCÍPIO DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

A separação em meio denso pode ser estática ou dinâmica. A separação estática é realizada utilizando os equipamentos cone e tambor, enquanto a dinâmica utiliza ciclone e *dynawhirpool*. Na separação estática somente a força da gravidade é utilizada, enquanto na separação dinâmica, além da força da gravidade, atua, também, a força centrífuga.

Para o meio estático, a separação dos minerais baseia-se na Equação [3]:

$$F_g = M_p \cdot g - M_f \cdot g = (M_p - M_f) \cdot g \quad [3]$$

onde:

$F_g$  - força gravitacional;                       $M_f$  - massa da polpa de meio denso;  
 $M_p$  - massa da partícula;                       $g$  - aceleração da gravidade.

A força gravitacional ( $F_g$ ) poderá ser positiva ou negativa. Ela será positiva quando o peso da partícula ( $M_p \cdot g$ ) for maior do que o peso da polpa de meio denso ( $M_f \cdot g$ ) deslocada pela própria partícula, ou seja, a força de empuxo. Neste caso, a partícula afundará. Quando a força gravitacional for negativa, o peso da partícula ( $M_p \cdot g$ ) será menor do que o peso da polpa de meio denso deslocada ( $M_f \cdot g$ ) e, portanto, a partícula flutuará.

Em meio dinâmico, a aceleração da gravidade é substituída pela aceleração centrífuga. Portanto, tem-se a Equação [4] para a separação dinâmica.

$$F_c = (M_p - M_f) \cdot \left( \frac{V^2}{r} \right) \quad [4]$$

onde:

$F_c$  - força centrífuga;

$V$  - velocidade tangencial;

$r$  - raio do ciclone ou *dynawhirlpool*

Uma análise das equações 2 e 3 permite observar que a força responsável pela separação em meio estático é proporcional à aceleração da gravidade ( $g$ ), enquanto no meio dinâmico ela é proporcional ao quadrado da velocidade tangencial ( $V^2$ ).

A superioridade da velocidade tangencial em relação à gravidade, ou seja, da força centrífuga com relação à gravitacional, permite maior capacidade aos ciclones e *dynawhirlpool*, bem como à separação do minério com granulometria mais fina.

## 6. EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO

Considerando a diversidade de aplicações do processo de separação por meio denso, foi desenvolvido um grande número de equipamentos por diferentes fabricantes. A seguir estão descritos os principais equipamentos utilizados na indústria mineral.

### **Tambor**

Existem vários tipos de tambor de meio denso, tais como: WEMCO, HARDINGE, DREWBOY e HEBERADSCHEIDER. No entanto, o princípio de separação desses tambores é semelhante, por isso será analisado apenas o tambor do tipo WEMCO.

Conforme consta na Figura 2, este tipo de separador é constituído de um tambor, no qual o minério e a polpa de meio denso são alimentados separadamente. As partículas de minério de densidade superior à da polpa de meio denso afundam e são transportadas pelo movimento giratório do tambor, da parte inferior para a superior, através de placas inclinadas e perfuradas, fixadas na superfície interna do tambor. Ao atingir a parte superior do tambor, este material desprende-se e cai sobre uma calha, que

descarrega, com ajuda de um fluxo de meio denso, a fração de material afundado. Por outro lado, as partículas dos minerais leves, com densidade inferior à do meio denso, flutuam e são arrastadas do tambor pelo próprio meio.

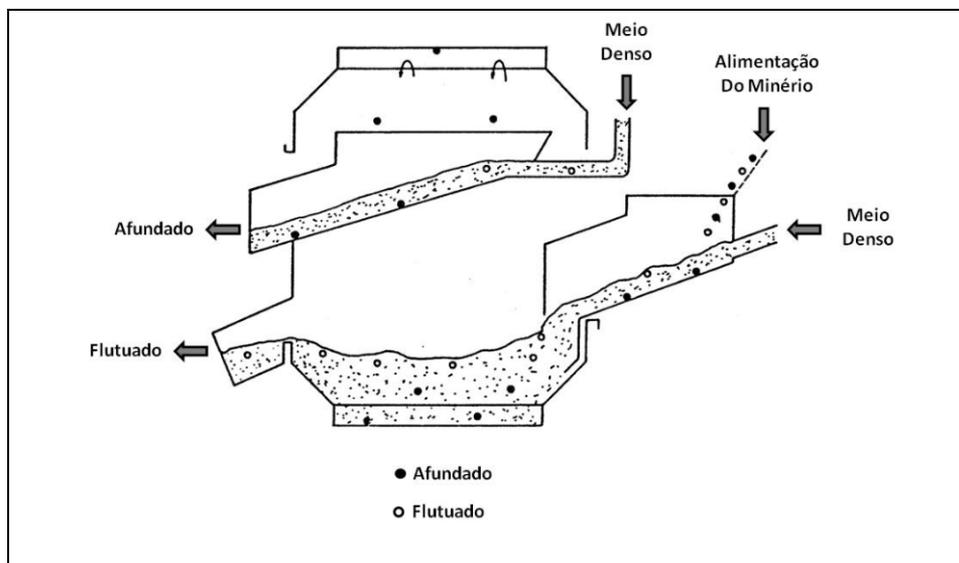


Figura 2 – Tambor de meio denso de fabricação WEMCO.

Na Tabela 3 tem-se a faixa granulométrica do minério na alimentação, a capacidade e a carga do meio denso para os tambores de fabricação WEMCO.

Tabela 3 – Dimensões e capacidades dos tambores de meio denso WEMCO.

Dimensões (pés)	Granulometria Alimentação (pol)	Capacidade de Processamento (t/h)	Quantidade de meio denso (t)	
			Magnetita	Ferro-Silício
6 x 6	1 - 3/16	5 - 25	2,8 - 4,7	4,0 - 5,5
6 x 6	4 - 3/16	15 - 35	5,3 - 8,0	4,5 - 8,0
6 x 6	6 - 3/16	35 - 75	5,6 - 8,4	6,6 - 9,7
8 x 8	8 - 3/16	75 - 90	6,0 - 9,0	9,0 - 15,0
8 x 8	8 - 3/16	90 - 150	29,0 - 35,0	38,0 - 46,0
10 x 10	8 - 3/16	150 - 200	29,0 - 35,0	38,0 - 46,0

Na Figura 3 tem-se o fluxograma de uma instalação utilizando tambor de meio denso. O minério, previamente deslamado e classificado em determinada faixa granulométrica, é alimentado em um tambor contendo a polpa de meio denso, no qual é separado nas frações flutuada (leve) e afundada (pesada). Esses produtos passam por peneiras para separar o meio denso dos minerais. O meio denso removido retorna diretamente ao tambor, enquanto a fração de Fe/Si diluída e recuperada, retorna ao tambor após separação magnética, densificação e desmagnetização.

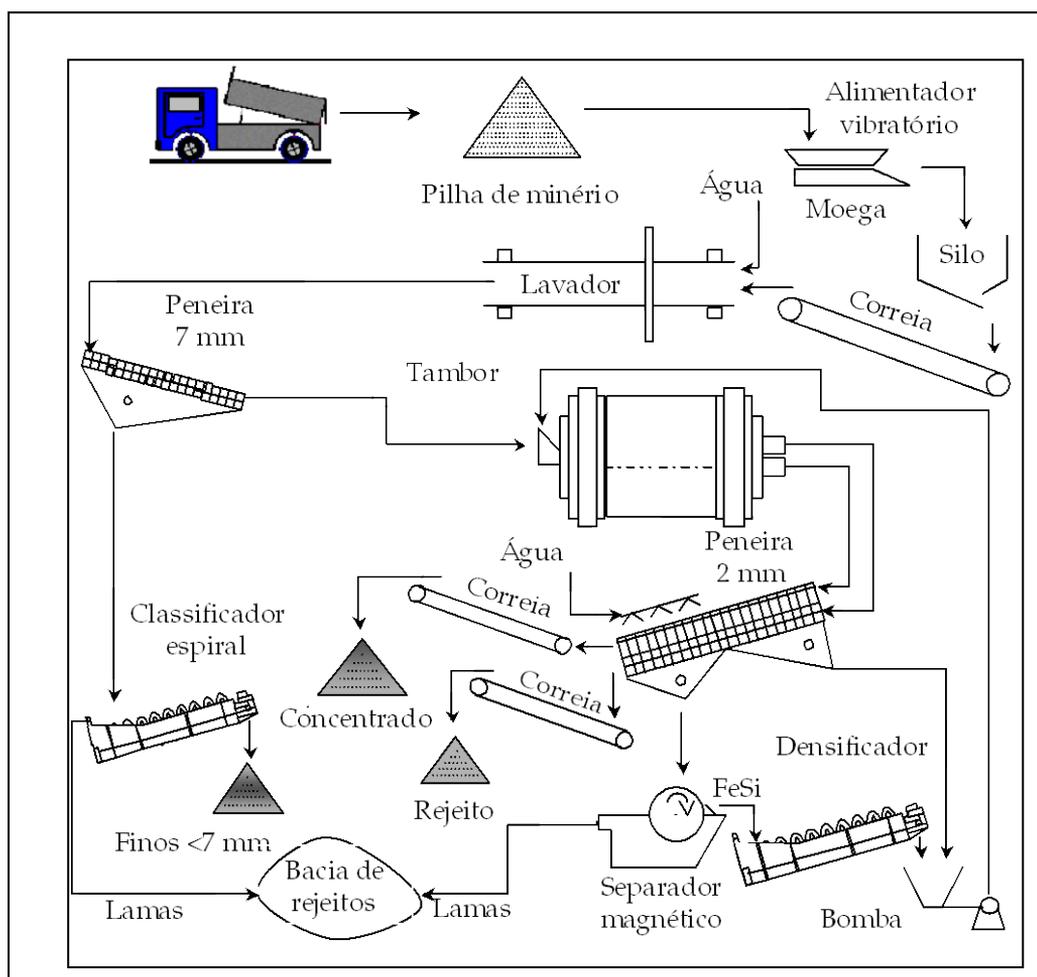


Figura 3 – Fluxograma de uma instalação com tambor de meio denso.

### Ciclone de Meio Denso

O ciclone de meio denso, conforme a Figura 4, é idêntico a um hidrociclone e, portanto, constituído de uma parte cilíndrica e outra cônica. Esses equipamentos são fabricados com diâmetros de 350 a 750 mm, e sua capacidade de processamento varia de 50 a 200 t/h, podendo alcançar até 800 t/h com a utilização de módulos múltiplos. Operam com pressões de 6,0 a 20,0 lb/pol<sup>2</sup>, sendo a faixa mais adequada entre 14 e 15 lb/pol<sup>2</sup>. O minério pode ser alimentado na faixa granulométrica compreendida entre 50,0 e 0,5 mm. Entretanto, a faixa de tamanho mais adequada é de 20,0 a 0,5 mm.

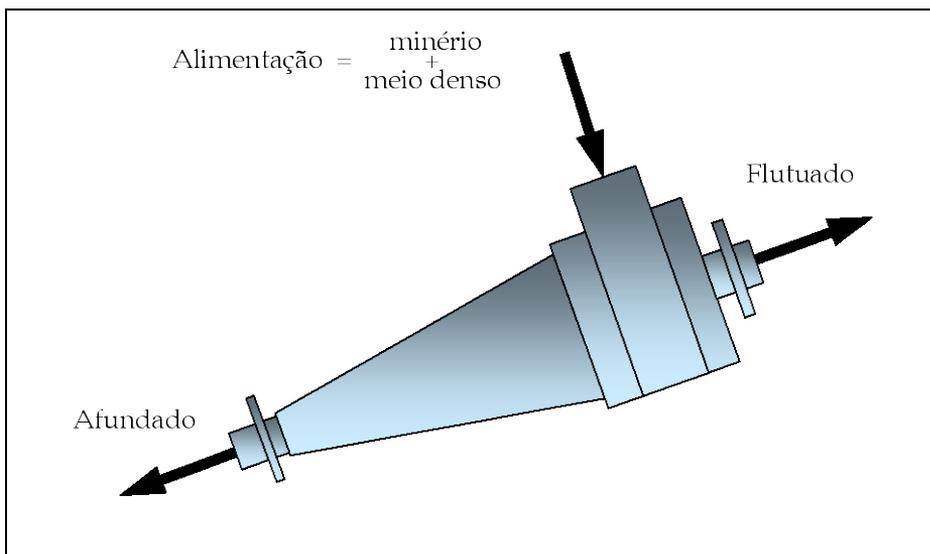


Figura 4 – Ciclone de meio denso.

Para separação das partículas minerais, a mistura de meio denso e minério é alimentada tangencialmente na seção cilíndrica. As partículas leves, flutuadas, movem-se em direção ao eixo longitudinal do ciclone e são arrastadas pelo vórtice formado em seu centro para o orifício de saída na extremidade superior (*overflow*). As partículas pesadas, afundadas, movem-se num vórtice formado ao longo da parede cônica até o orifício de saída na sua extremidade inferior (*underflow*).

A dinâmica do ciclone de meio denso é complexa e diversas variáveis afetam a separação, tais como:

- (i) pressão de alimentação;
- (ii) densidade da polpa de meio denso;
- (iii) granulometria do meio denso;
- (iv) constituição do minério, isto é, forma das partículas, distribuição granulométrica e composição das partículas leves e pesadas etc.;
- (v) ângulo da seção cônica do ciclone.

Todas essas variáveis afetam o desempenho da separação, todavia a granulometria, a densidade do meio denso e o ângulo do ciclone, possuem um efeito marcante.

Diante do exposto, pode-se dizer que, para aplicação do ciclone de meio denso, é necessário um estudo detalhado com todas as variáveis citadas para cada minério, em escala piloto.

### **Dynawhirlpool**

O equipamento, conforme mostrado na Figura 5, consiste essencialmente de um cilindro de comprimento e diâmetro definidos, aberto nas extremidades e com dois tubos laterais. O DWP é usualmente instalado com uma inclinação do cilindro da ordem de 25° na separação de minérios e de 15° para carvão.

O minério é alimentado na parte superior do aparelho (1) com um pouco do meio denso desviada da tubulação principal para facilitar o escoamento do material. A maior parte do meio denso é alimentada, sob pressão, tangencialmente ao cilindro pela abertura (2). O movimento ascendente do meio denso produz um vórtice ao longo do cilindro, criando um gradiente de densidade na direção da descarga do material afundado e da parede do cilindro. A separação do material ocorre ao longo da face interna do vórtice. As partículas de minério flutuadas deslizam para baixo pela face interna do vórtice e são descarregadas numa câmara de expansão acoplada na abertura (3). Por outro lado, as partículas de minério afundadas são levadas pela força centrífuga para a face externa do vórtice e transportadas em direção à parte superior do cilindro, na qual são descarregadas com o meio denso (4). A densidade do meio denso do afundado é maior que a do flutuado.

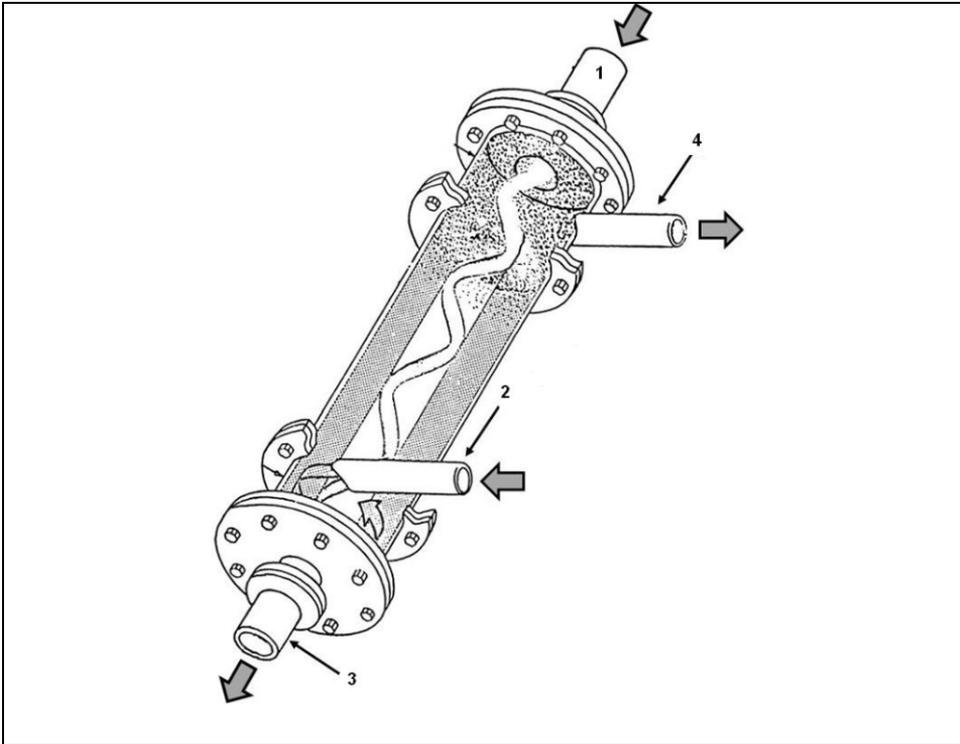


Figura 5 – Unidade de *dynawhirlpool* – DWP.

A separação no DWP baseia-se na criação e controle de um vórtice, cuja forma e estabilidade são afetadas pelas variáveis e os parâmetros do equipamento.

#### **Parâmetros do DWP**

Comprimento do cilindro e diâmetro de saída do afundado.

Diâmetro e extensão, dentro do cilindro, dos tubos de alimentação do minério e de saída do flutuado.

#### **Variáveis Operacionais**

Pressões de alimentação do meio denso e de descarga do afundado.

Ressalta-se que a extensão do tubo de alimentação dentro do cilindro é uma variável crítica, uma vez que, está próxima à zona de separação do equipamento.

O meio denso é alimentado a uma pressão variável, conforme a sua densidade. Na Tabela 4 estão ilustrados alguns valores para a pressão operacional, os quais são recomendados para a faixa de densidade 2,0 a 3,5 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 – Valores de pressão de alimentação e de descarga do meio denso.

Densidade da polpa de meio denso (g/cm <sup>3</sup> )	Pressão de alimentação de meio denso (lb/pol <sup>2</sup> )	Pressão de descarga do afundado (lb/pol <sup>2</sup> )
2,0	10,00 – 11,25	2 - 3
2,5	11,25 – 12,50	3 - 4
3,0	12,50 – 13,75	4 - 5
3,5	13,75 – 15,00	5 - 6

A granulometria do minério que alimenta o *dynawhirpool* varia com o diâmetro do cilindro, conforme mostrado na Tabela 5, o limite superior da granulometria varia de ½" (diâmetro do cilindro = 6") a 1 ½" (diâmetro do cilindro = 18 ½"). Embora a granulometria de 65 malhas seja considerada muito fina para a separação no *dynawhirpool*, o limite inferior é o mesmo (65 malhas) para todos os diâmetros. Normalmente, o limite inferior é determinado pelas dificuldades operacionais de separação do meio denso do minério. Quando trabalhamos com densidades elevadas, a viscosidade do meio torna difícil o uso de peneiras muito finas, limitando a alimentação a granulometria mais grossas. Desta maneira, a maioria das instalações usa o minério com uma granulometria inferior, ou seja, de 20 a 28 malhas (0,833 a 0,589 mm).

Outro fator importante é a umidade do minério de alimentação, que não deve ser superior a 10%, pois acarreta uma variação na densidade do meio.

Tabela 5 – Dimensões e capacidades do *Dynawhirlpool*

Diâmetro Interno (pol)	Comprimento (ft)	Faixa Granulométrica	Capacidade (t/h)	
			Mínima	Máxima
6	3,7	- ½" + 65 #	Piloto	
9 ½	5,1	- ¾" + 65 #	10	20
12 ½	5,9	- 1" + 65 #	20	40
15 ½	6,4	- 1 ¼" + 65 #	40	60
18 ½	6,8	- 1 ½" + 65 #	60	80

Na Figura 6 está ilustrado o fluxograma de uma instalação de concentração em meio denso por de *dynawhirlpool*, com a etapa de recuperação do meio denso. O minério é alimentado no DWP por gravidade na parte superior do equipamento (1). Para facilitar o escoamento do material, do meio denso (< 10%) é desviado da tubulação principal e injetado com o minério. O meio denso é alimentado (9) pela entrada tangencial inferior, com o controle da pressão, por ser esta uma das variáveis operacionais. O flutuado desliza pela face interna do vórtice e é descarregado com parte do meio denso na extremidade inferior do cilindro (4) através da câmara de expansão. A fração afundada penetra na coluna ascendente de meio denso, é carregada pela parte externa do vórtice e descarregada através do mangote ligado ao tubo de saída do afundado (3). Este mangote deve descrever um arco, com altura determinada experimentalmente. Esta altura é importante, pois influi na pressão de saída, por ser uma das variáveis operacionais. O ponto de descarga do mangote deve estar acima da saída do afundado para evitar a sifonagem do material. Os materiais flutuado e afundado são descarregados sobre peneiras (5), e o meio denso escoar retornando ao tanque de meio denso que alimenta o DWP (12). As frações flutuada e afundada alimentam outras peneiras para lavagem das partículas minerais e remoção do Fe/Si aderido às superfícies das mesmas (6). O meio denso diluído alimenta um separador magnético (8) para eliminar as partículas de minério que contaminam o meio denso e, posteriormente, é alimentado em um densificador (7), a fim de retirar o excesso de água. A polpa de meio denso, após atingir a densidade adequada, é desmagnetizada (11) e retorna ao tanque de alimentação (12).

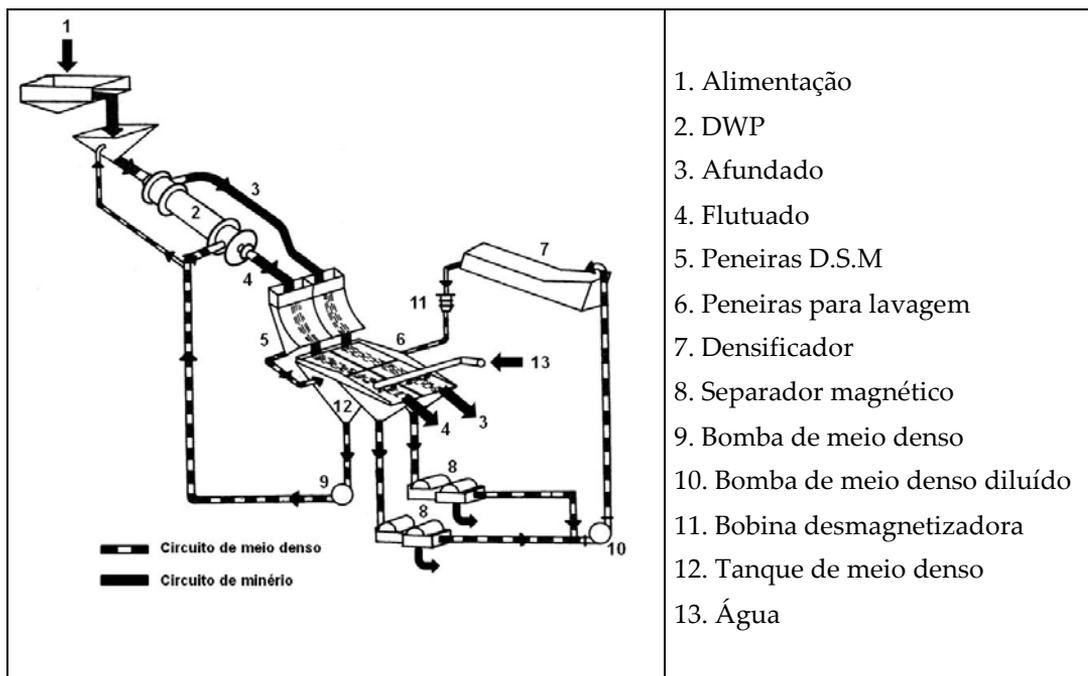


Figura 6 – Fluxograma de concentração em meio denso por meio do *dynawhirlpool*

### **Afunda-Flutua (*Sink and Float*) – Teste de Laboratório**

O afunda flutua possui a flexibilidade para se trabalhar com quantidades de minério que variam entre 1 e 2 kg. Isso facilita muito a operação, além de proporcionar resultados confiáveis para uso no planejamento dos estudos em circuito contínuo de escala piloto em tambor de meio denso.

O equipamento (Figura 7) é de fabricação da *Denver Laboratory Company* e compõe-se de uma bomba centrífuga de  $\frac{3}{4}$  de hp, tubulações, cestos com tela, funis, drenos, etc. O peso do conjunto é de aproximadamente 160 kg (vazio) e tem capacidade para armazenar e circular 25 L de polpa de meio denso.

Os ensaios são simples e de baixo custo, além de úteis na avaliação do processo de separação em meio denso, utilizando pequenas quantidades de amostras. Os testes de laboratório não são recomendados para

dimensionamento de equipamentos industriais. Todavia, as informações (balanços de massa e metalúrgico) obtidas são proveitosas à realização de ensaios piloto com tambores de meio denso. Os tambores proporcionam a realização de testes em circuitos contínuos e em escalas maiores, cujos dados gerados, são ideais para o dimensionamento dos equipamentos industriais.

O *Sink & Float* da Denver Laboratory Company é o equipamento utilizado pra testes descontínuo com pequenas quantidades (1 a 2 kg) de minério e serve para avaliar a aplicação do processo de afunda-flutua em operações de laboratório. A operação do equipamento é simples e consiste em encher o sistema (Figura 7) com um meio denso (Fe/Si) e circulá-lo por meio de uma bomba.

Nos procedimentos dos ensaios em laboratório com o afunda-flutua, a amostra de minério é alimentada no cesto (Figura 7) superior, ou seja, o funil superior com tela. A ganga mais leve flutuará e transbordará, ficando retida no cesto mais baixo (funil inferior com tela). A fração mineral pesada permanecerá afundada ficando retida no cesto superior. O fluxo de meio denso é feito por transbordamento do funil superior para o funil inferior com auxílio da bomba de circulação. A corrente superior é baixa o suficiente para contrabalançar a tendência do meio denso se equilibrar. Os cestos dos funis são removíveis e possuem telas de 1,0 mm.

Os ensaios piloto de separação em meio denso, devem ser executados em faixas granulométricas predeterminadas e isenta de finos (lamas) de forma a não alterar a densidade do meio durante a execução do ensaio. A preparação do meio denso deve ser realizada de acordo com os procedimentos descritos no Item 3 deste Capítulo, APLICAÇÃO DO MEIO DENSO – Densidade do meio. As medidas de densidades do meio denso devem ser aferidas e controladas com a utilização de uma balança Marcy ou com auxílio de uma proveta de volume conhecido.

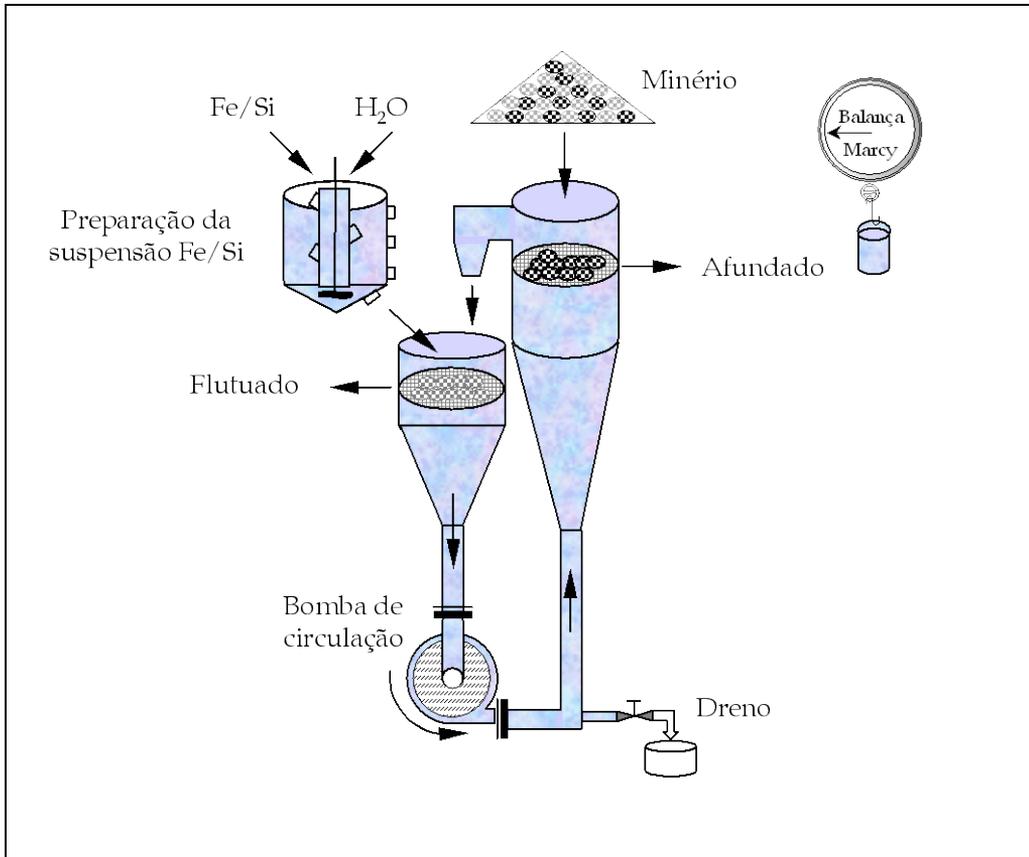


Figura 7 – Desenho ilustrativo do equipamento afunda-flutua da *Denver Laboratory Company*, existente no CETEM.

### Exemplo 1

Calcular as quantidades de ferro-silício ( $d_s = 6,8 \text{ g/cm}^3$ ) e de água necessárias à preparação de 25 L de uma polpa de meio denso com densidade de polpa  $2,8 \text{ g/cm}^3$ .

$$v_p = 25 \text{ L} = 0,025 \text{ m}^3 \quad d_p = 2.800 \text{ kg/ m}^3 \quad d_s = 6.800 \text{ kg/ m}^3$$

A massa de polpa ( $m_p$ ) é dada pela Equação [4] Capítulo 2.

$$m_p = (d_p)(v_p) = (2.800)(0,025) = 70 \text{ kg.}$$

A percentagem de sólidos (%S) na polpa é dada pela Equação [5] do Capítulo 2.

$$(\%S) = 100 \frac{d_s(d_p - 1.000)}{d_p(d_s - 1.000)} = 100 \frac{6.800(2.800 - 1.000)}{2.800(6.800 - 1.000)} = 75,37\%$$

A massa de sólidos, ou Fe/Si, na polpa é dada por:

$$\text{massa de sólidos} = (m_p)(\%S) = (70)(0,7537) = 52,76 \text{ kg de Fe/Si}$$

A massa de água é obtida pela diferença entre a massa da polpa e a massa de sólidos, isto é:

$$\text{Massa de água} = 70 - 52,76 = 17,24 \text{ kg ou } 17,24 \text{ L}$$

Logo, o operador deve pesar 52,7 kg de Fe/Si e adicionar em um recipiente 17,24 L de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aplan, F. F. Heavy media separation. In: Weiss, N. L. (Ed.). New York: SME mineral processing handbook. vol. 1. 1985, p.4-3/4-26.
- Aplan, F. F. Gravity concentration. In: Fuerstenau, M. C. e Han, K. N. (Ed.). Principles of mineral processing. New York: SME. 2003, p.185-220.
- Burt, R. O. Gravity concentration technology. Amsterdam: Elsevier, 1984, p.139-183.
- Campos, A. R.; Luz, A. B. e Carvalho, E. A. Separação em meio denso. 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.271-301.
- Kelly, E. G. e Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.243-249.
- Sampaio, C. H. e Tavares, L. M. M. Beneficiamento gravimétrico. Porto Alegre, UFRGS Editora, 2005, p.173-270.