

## SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

**Antônio Rodrigues de Campos**

Eng. Metalúrgico pela UFOP, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

**Adão Benvindo da Luz**

Eng. de Minas pela UFPE, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Pesquisador Titular do CETEM/MCTIC

**Paulo Fernando Almeida Braga**

Eng. Químico pela UFRRJ, Mestre e Doutor em  
Engenharia Mineral pela EPUSP  
Tecnologista Sênior do CETEM/MCTIC



## INTRODUÇÃO

---

A maioria dos processos de concentração gravítica emprega água ou ar como meio de separação, e como todos os materiais de interesse são mais densos que o ar, e a maior parte deles mais densos que a água, é necessário para efetuar a separação de materiais de diferentes densidades, controlar a velocidade de escoamento do fluido que está sendo utilizado, o que faz com que esses processos sejam intrinsecamente dinâmicos (SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Dentre os processos de concentração gravítica, a separação em meio denso oferece uma alternativa mais direta e precisa, pois usa, como meio de separação, um fluido com densidade intermediária às dos materiais constituintes que se deseja separar. Neste caso, para que aconteça a separação, vai depender apenas desses materiais serem mais leves ou mais densos que o meio utilizado.

A separação em meio denso é um dos métodos importantes de concentração gravítica aplicado na separação de minerais. Neste tipo de separação, o meio denso a ser utilizado pode ser constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos ou, ainda, de uma suspensão de sólidos insolúveis dispersos em água (HEAVY-MEDIA, 1943). A suspensão, no caso da separação em meio denso, é um sistema heterogêneo, que deve se comportar com as características de um líquido. Apesar de haver equipamentos de laboratório e de escala piloto que funcionam à base de suspensões, estas são mais usadas em processos industriais, onde os principais sólidos insolúveis utilizados são finos de magnetita ou finos de ferro silício. A magnetita é utilizada na separação de carvões e o ferro silício é utilizado na separação de minerais mais densos, como os minerais metálicos e não metálicos (concentração de fluorita e espodumênio).

O processo de separação em meio denso foi originalmente desenvolvido para o beneficiamento de carvões de difícil lavabilidade, para os quais o método de jigagem se mostrava ineficiente. Atualmente, é aplicado no beneficiamento de diferentes tipos de carvão, de diversos tipos de minérios e de materiais secundários, seja na geração de um pré-concentrado para uma etapa posterior de beneficiamento, geração de um produto final vendável, de um rejeito final para descarte, bem como na recuperação de metais ou ligas metálicas, em usinas de reciclagem.

Em termos de granulometria, a separação em meio denso é mais aplicada para partículas relativamente grossas (WILLS, 1988), acima de 28 malhas (0,6 mm).

Os processos de separação em meio denso oferecem algumas vantagens sobre os outros processos de concentração gravítica. Neles, há possibilidade de realizar separações precisas em uma determinada densidade, com elevada eficiência de separação, mesmo com a presença de minerais de densidades próximas à do meio.

A densidade de separação pode ser rigorosamente controlada dentro de um determinado intervalo, e pode ser variada, com relativa rapidez, durante o processamento, caso seja necessário. Estas vantagens são muito importantes nas operações industriais.

A despeito das vantagens anteriormente apontadas, esse processo torna-se, em princípio, um pouco dispendioso, pela necessidade de instalações complementares de recuperação e limpeza do meio denso utilizado e da sua recirculação no processo. No entanto, estes custos podem ser atenuados, ou até mesmo compensados, com outras vantagens econômicas oferecidas pelo processo, como, por exemplo, a sua alta capacidade de processamento e a possibilidade de tratar partículas grossas, às vezes acima de 6 polegadas, além da possibilidade de automação do circuito.

## HISTÓRICO

---

As primeiras tentativas de utilização de meio denso datam de 1858, quando Bessemer patenteou a utilização de soluções de cloretos de ferro, bário, manganês ou cálcio, como meios de separação. Nessa época foi implantada uma usina na Alemanha, utilizando o cloreto de cálcio como meio denso, visando à separação de carvões. Devido ao efeito de viscosidade do meio, comprovou-se a impossibilidade de fazer separações para densidade acima de 1,35. Por outro lado, a recuperação do meio mostrou-se, também, proibitiva (SYMONDS, 1986).

Nesse mesmo período em que se ocorriam essas tentativas para utilização de cloretos como meio denso, engenheiros americanos descobriram que uma suspensão de água e areia, movida por um fluxo ascendente, podia gerar um meio com densidade de até 1,7. Este processo, denominado de *Chance Sand*, chegou a ser usado em algumas usinas industriais de beneficiamento de carvão. Em 1911, a DuPont patenteou um processo de separação, utilizando hidrocarbonetos clorados para obter meios densos de maior densidade (BURT, 1984). Com o prosseguimento das pesquisas, em 1917 deu-se a primeira aplicação comercial, quando foi patenteado o processo *Chance*. A rigor não se tratava de uma separação em meio denso e sim de um leito de areia hidraulicamente dilatado.

As densidades obtidas, até então, com esses tipos de meios densos, eram relativamente baixas e só permitiam a separação de materiais de baixa densidade, como o carvão. Como a maioria desses meios densos era constituída de cloretos, a sua utilização ficava prejudicada pelos problemas de corrosão e altos custos de sua recuperação; isto levou os pesquisadores a pensarem em alternativas. Iniciou-se então a substituição desses líquidos por suspensões constituídas de finos de alguns minerais (argilas e barita, gesso e pirita) em água. Em 1932, Vooy utilizou uma mistura de argila e barita, para lavagem de carvão. A utilização desses minerais resolveu os problemas de corrosão, no entanto permitia a obtenção de suspensões com densidade de, no máximo,

1,6. Como essas suspensões eram inadequadas para separação de minerais de maior densidade, por exemplo, minerais metálicos e não metálicos, foi estudada a possibilidade de utilização da galena como meio denso. A American Zinc Lead and Smelting Company, em Mascot, Tennessee-EUA, foi pioneira (1939) ao utilizar a galena como meio denso, na concentração de minerais de chumbo e zinco (HEAVY-MEDIA, 1943). Esse processo, no entanto, tornou-se inviável, em virtude do excesso de finos gerados na moagem da galena e das dificuldades encontradas para a sua recuperação por flotação.

Houve uma tentativa no sentido de reintroduzir a utilização de líquidos densos (hidrocarbonetos halogenados) de maior densidade do que as soluções de sais inorgânicos, na separação de minerais. No entanto, os problemas de toxidez e alto custo inviabilizaram a utilização dos mesmos em escala comercial.

Foi desenvolvido o uso de finos de magnetita e de ferro-silício na preparação dos meios densos, com a vantagem de serem, ambos, facilmente recuperados pelo processo de separação magnética.

Comprovado que suspensões à base de ferro-silício ou magnetita moídos eram mais eficazes na separação em meio denso, devido às propriedades magnéticas desses materiais, que facilitam as suas recuperações, as investigações que se seguiram, se ativeram ao desenvolvimento de equipamentos, inclusive aqueles que utilizavam forças mais elevadas que a gravitacional. Nesta linha, foram desenvolvidos os separadores de meio denso que utilizam a força centrífuga, tais como o ciclone de meio denso, *Dynawhirpool* (DWP), Tri-Flo, etc.

## TIPOS DE MEIO DENSO

---

Na separação de minerais, podem ser utilizados os diversos tipos de meio denso detalhados a seguir.

### **Líquidos Orgânicos**

Os líquidos densos orgânicos (Tabela 1) são utilizados em escala de laboratório, na caracterização tecnológica de matérias-primas minerais, carvões e outros materiais, visando uma avaliação das técnicas de separação gravítica desses minerais e materiais (BENJAMIN, 1971; MULLER e BURTON, 1965; WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

**Tabela 1.** Características dos líquidos orgânicos utilizados na separação de minerais, carvões e outros materiais, em laboratório.

Líquidos	Densidade	Viscosidade (cP a 20°C)	Solubilidade em água (g/100 ml)	Pressão de vapor (mmHg) (20°C)	Temperatura solidificação (°C)	Temperatura ebulição (°C)
Tetrabromoetano (CHBr <sub>2</sub> CHBr <sub>2</sub> )	2,964	12,0	0,065	<1,0	0,1	151 <sup>(1)</sup>
Bromofórmio (CHBr <sub>3</sub> )	2,890	1,89 <sup>(5)</sup>	0,319	5,0	6-7	149,5
Iodeto de Metileno (CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub> )	3,325	2,6	1,42	1,3 <sup>(4)</sup>	5,6	180 <sup>(2)</sup>
Solução de Clerici (CH <sub>2</sub> (COOTI) <sub>2</sub> HCOOTI)	4,280	31,0 <sup>(4)</sup>	1,40	-	-	-
Tricloro-etano (CCl <sub>3</sub> CH <sub>3</sub> )	1,330	-	2,00 <sup>(3)</sup>	-	32,5	74,1 <sup>(5)</sup>
Triclorobromo metano (CCl <sub>3</sub> Br)	2,001	-	0,0	-	-	-
Brometo de metileno (CH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> )	2,484	-	-	-	-52,7	97
Tribromo-fluor-metano (CBr <sub>3</sub> F)	2,748	-	11,7 <sup>(6)</sup>	-	-	-

(1) – Em relação a 54 mm Hg.

(2) – Com decomposição.

(3) – Média a 20°C.

(4) – Média a 25°C.

(5) – Média a 760 mm Hg

(6) – Média a 15°C

Os líquidos densos mais utilizados nas pesquisas de laboratório são bromofórmio, iodeto de metileno e solução de Clerici. Líquidos com densidades intermediárias às dos líquidos densos puros listados na Tabela 1, poderão ser obtidos mediante a adição de diluentes ou solventes, tais como: álcool etílico (d = 0,89), tetracloreto de carbono (d = 1,59), NN-dimetil formamida (d = 0,93), xilol (d = 0,85) e percloroetileno (d = 1,62).

Para determinação da densidade de um meio obtido a partir da mistura de dois líquidos densos ou de um líquido denso e um diluente é usualmente utilizada a Equação [1].

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

onde:

V<sub>2</sub> volume do líquido diluente (mL);

V<sub>1</sub> volume do líquido denso (mL);

d<sub>1</sub> densidade do líquido denso;

d<sub>2</sub> densidade do líquido diluente;

d densidade da mistura desejada.

Uma propriedade importante dos líquidos densos e diluentes na preparação de uma solução densa é a sua pressão de vapor. Quanto menor for a pressão de vapor dos mesmos, bem como a diferença das pressões de vapor entre os líquidos misturados (líquido denso e diluente), mais estável será a mistura.

Em virtude do alto custo dos líquidos densos, é prática comum fazer a sua reutilização ou recuperação. Os métodos utilizados dependem da natureza do líquido denso e do diluente utilizados na mistura. Quando o diluente utilizado é solúvel em água (álcool), a lavagem em contracorrente com água pode ser utilizada.

Em relação às suspensões de sólidos, os líquidos orgânicos apresentam as seguintes vantagens: baixa viscosidade, alta estabilidade e baixa ação corrosiva.

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

Soluções de cloreto de cálcio com densidade 1,4 foram as primeiras soluções de sais inorgânicos a serem utilizadas na separação industrial de carvões, por meio dos processos Lessing e Bertrand (PRYOR, 1965). Apesar desses processos terem permitido a obtenção de produtos adequados ao mercado, os altos custos de operação inviabilizaram o seu uso.

Soluções de cloreto de zinco com densidade de até 1,8 são usadas até hoje, para estudos de lavabilidade de carvões, em laboratório.

### **Suspensões de Sólidos em Água**

Para a obtenção de uma suspensão ideal de sólido em água, é necessário que o sólido a ser utilizado apresente as seguintes características:

**Dureza elevada:** evitar a degradação das partículas, que geram finos durante a operação e, conseqüentemente, aumenta a viscosidade da suspensão.

**Estabilidade química:** apresentar resistência à corrosão e não reagir com os minerais em estudo.

**Densidade elevada:** para que possa atingir a densidade que permita a separação dos minerais de diferentes densidades, tendo o meio denso viscosidade aceitável do ponto de vista operacional.

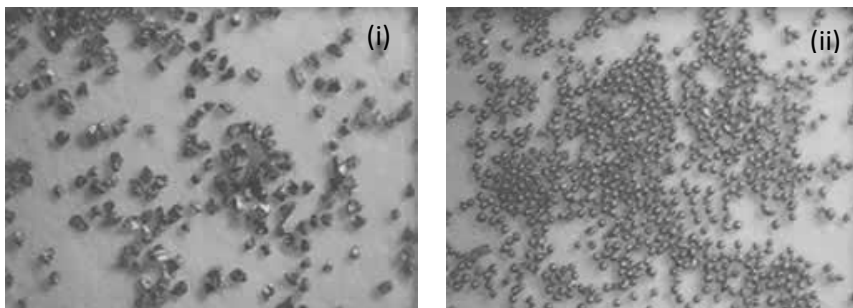
**Recuperação fácil:** o material sólido utilizado na suspensão água/sólido deve apresentar propriedades que permitam a recuperação do sólido e sua reutilização.

**Estabilidade da suspensão:** o material sólido deve formar uma polpa estável.

**Granulometria:** o material sólido a ser utilizado deve ser de granulometria fina, porém apresentar uma distribuição granulométrica, de tal forma que as frações ultrafinas não elevem a viscosidade do meio a níveis impraticáveis, do ponto de vista operacional.

**Grãos arredondados:** é aconselhável a utilização de materiais com grãos arredondados (ferro silício atomizado), visto que os grãos angulosos diminuem a fluidez do meio e se degradam com mais facilidade.

A Figura 1 mostra imagens do ferro-silício moído (i) e do ferro-silício atomizado (ii) de fabricação da DMS Powers, África do Sul.



**Figura 1.** Imagens do ferro-silício moído (i) e atomizado (ii).

Fonte: <http://www.dmspowders.com/products/> acesso em 13 agosto 2018

O ferro-silício, principalmente o atomizado, e a magnetita atendem, praticamente, a todas essas características, notadamente à facilidade de recuperação dos mesmos, devido às suas propriedades magnéticas. Por isso são os materiais mais usados na formação das suspensões.

O ferro-silício é uma liga composta, principalmente, de silício (~15%) e ferro (~85%), com densidade 6,7 a 6,9, que pode conter pelo menos 82% Fe e 15 a 16 % Si. Caso contenha menos de 15% de Si, a liga poderá sofrer o efeito da corrosão, mas por outro lado, se for maior do que 16%, a susceptibilidade magnética da liga e a densidade diminuirão de forma significativa (WILLS e NAPIER MUNN, 2006). Com essa alta densidade da liga, torna-se possível a obtenção de polpa com densidade máxima de 3,4, cobrindo, portanto, um intervalo de densidade capaz de separar a maioria dos minerais metálicos de suas gangas. Isto é um fator que faz com que o Fe/Si seja o material mais utilizado, industrialmente, na preparação de meio denso, na concentração de minerais metálicos e outros minerais especiais. Com dificuldade, pode-se atingir até a densidade 3,6, que é a máxima atingível com os materiais citados, mas raramente é utilizada. A seguir, são apresentadas as características dos tipos de ferro-silício utilizados na preparação de meios densos.

**Ferro-silício atomizado:** é obtido mediante a atomização com vapor do Fe/Si fundido, seguido de resfriamento brusco em água, resultando na obtenção de partículas arredondadas; suas características granulométricas estão apresentadas na Tabela 2 para quatro tipos de produtos.



**Tabela 2.** Características granulométricas de um ferro-silício atomizado.

Granulometria (mm)	Tipo e % peso acumulada			
	Grosso	Fino	Ciclone 60	Ciclone 40
+0,210	3	1	--	--
+0,149	11	8	0	--
+0,105	28	18	2	0
+0,074	40	33	7	2
+0,044	62	55	27	10
-0,044	38	45	73	90
-0,037	--	--	65	85

**Ferro-silício moído:** é obtido por meio de britagem e moagem; suas características granulométricas estão apresentadas na Tabela 3, para seis diferentes tipos de produtos.

**Tabela 3.** Distribuição granulométrica de seis diferentes tipos de Fe/Si moído.

Granulometria (mm)	Tipo e % peso acumulada					
	48D	65D	100D	150D	270D	Nacional
+0,210	5	0,5	0	0	0	0
+0,149	15	3,0	0,2	0	0	0-0,5
+0,105	30	8,0	1,2	0,5	0	0-5
+0,074	50	20,0	5,0	2,0	0,2	5-10
+0,044	75	55	35	25	10	20-30
-0,044	25	45	65	75	90	70

Na Tabela 4 estão contidas as características químicas e físicas de um ferro-silício, com 15% Si, quer seja moído ou atomizado.

**Tabela 4.** Características químicas e físicas de um ferro-silício.

Elementos (*)/Propriedades	Peso (%)
Si	14-16
C	1,0
S	0,05
P	0,1
Al	0,8
Mn	0,5
Cu	0,8
Cr	0,5
Material magnético	99%
Densidade picnométrica	6,7-7,0
Densidade aparente	3,5-4,2

(\*) Exceto o Si, os outros valores são máximos permitidos

### Características da Magnetita Utilizada nas Suspensões

A magnetita pode ser considerada relativamente barata e é utilizada, normalmente, na preparação de meio denso na forma moída. Com densidade de 5,0 a 5,2, permite, na prática, a obtenção de suspensões com densidades de 1,9 a 2,0. Por isto, só é possível a utilização da magnetita para a separação de minerais de baixa densidade, como grafita, gipsita e outros, e principalmente carvões minerais.

### Fluidos Paramagnéticos

Em 1986, a Intermagnetics General Corporation-IGC patenteou, nos Estados Unidos, um equipamento denominado *Magstream*, destinado à separação de minerais ou partículas sólidas, baseado na diferença de suas densidades. Essa separação pode ser feita em batelada (300 g de amostra) ou escala comercial de 250 kg/h, cobrindo um intervalo de densidade de 1,5 a 2,1 (IGC, 1989; SAMPAIO e TAVARES, 2005).

Os minerais a serem separados são misturados com um fluido magnético e alimentados no *Magstream*, através de um tubo rotativo anular. Uma força magnética externa exerce uma atração sobre o fluido que, combinada com a força centrífuga, promove um gradiente de densidade radial que aumenta do centro para a periferia, permitindo a separação das partículas leves e pesadas dentro do aparelho. À medida que as partículas se aproximam da descarga, desviadores separam as correntes dos produtos leve e denso (pesado) (CHAVES e CASSOLA, 1994).

O fluido paramagnético é uma suspensão coloidal, à base de água, não tóxico, contendo partículas de ferrita micronizada dispersas com lignosulfonato. Esse fluido funciona com uma densidade variável na presença de um campo magnético. A densidade do fluido magnético pode ser controlada, variando-se a intensidade do campo, a velocidade de rotação do tubo rotativo ou a concentração do fluido. Excetuando-se o campo magnético, a operação no aparelho *Magstream* se assemelha à separação em ciclone de meio denso ou em DWP.

### DENSIDADE DE UMA SUSPENSÃO

---

A densidade de uma suspensão é função da densidade do sólido utilizado e da sua quantidade adicionada ao meio (VIANA JR. et al., 1989). Essa densidade pode ser calculada segundo a Equação [2]:

$$D_p = \frac{100}{\frac{C}{D_s} + (100 - C)} \quad [2]$$

onde:

Dp densidade da suspensão (polpa);

Ds densidade do sólido;

C concentração (%peso) do sólido na suspensão.

À medida que aumenta a concentração de sólidos, aumenta a densidade da suspensão. No entanto, existe um limite, do ponto de vista prático, porque se a viscosidade da suspensão atingir determinados valores, a fluidez do meio fica comprometida, inviabilizando a separação dos minerais. O limite da concentração de sólidos das suspensões encontra-se entre 70 e 86% (p/p).

Existem, normalmente, três classes de suspensões no intervalo de densidades de 1,3 a 3,6, relacionadas com os minerais de interesse que se quer separar:

- densidades relativas de 1,3 a 1,9, restritas praticamente ao beneficiamento de carvão;
- densidades de 2,7 a 2,9, muito comuns na pré-concentração de minerais metálicos e não metálicos;
- densidades de 2,9 a 3,6, utilizadas para minérios especiais e, mais particularmente, na recuperação de diamantes.

Esses intervalos de densidades podem ser obtidos, utilizando magnetita pura, mistura de magnetita e ferro-silício e ferro-silício puro, com água. A classe 1, por exemplo, pode ser preparada usando magnetita pura; a classe 2, usando mistura de magnetita e ferro-silício; e a classe 3, usando ferro-silício puro.

## REOLOGIA DO MEIO DENSO

---

A reologia estuda as propriedades físicas resultantes do escoamento de materiais, particularmente o fluxo plástico de sólidos e de líquidos não Newtonianos (TRUSH, 1968).

### Propriedades Reológicas de uma Suspensão

As propriedades reológicas de uma suspensão são influenciadas pelos seguintes fatores: a viscosidade do meio fluido, a concentração de sólidos, tamanho e forma das partículas e forças de interação entre as partículas (VAN OLPHEN, 1977).

As características físicas e mineralógicas do meio têm um efeito muito significativo sobre a operação do meio denso. A densidade, forma e distribuição granulométrica dos sólidos utilizados na suspensão têm grande influência na reologia do meio denso. Propriedades físicas e químicas, tais como energia superficial, coercividade, permeabilidade e grau de oxidação, também influenciam na reologia do meio denso e conseqüentemente na sua recuperação (BURT, 1984).

Dessa forma, o bom desempenho de um processo de separação em meio denso está relacionado com:

- a remoção de partículas finas (lamas) da alimentação - estas partículas finas aumentam a viscosidade do meio, causando alterações nos resultados da separação das espécies minerais presentes;
- as propriedades hidrodinâmicas do material a ser separado, em condições operacionais;
- as propriedades reológicas da suspensão, sob condições operacionais;
- a granulometria do material a ser separado e a densidade do meio de separação;
- a viscosidade e o limite de escoamento da suspensão que, idealmente, devem ser os mais baixos possíveis; para que isto aconteça, uma medida a ser tomada é evitar que o sólido que forma essa suspensão não seja de granulometria muito fina;
- a estabilidade da suspensão deve ser a mais alta possível.

Entende-se por estabilidade da suspensão, como o inverso da taxa de sedimentação da suspensão. Quanto mais estável for à suspensão, menor será a agitação requerida pela mesma durante a operação de separação. Por outro lado, uma menor turbulência do meio denso, resulta em menor formação de finos, decorrente da degradação do material sólido que constitui a suspensão, evitando as perdas deste no circuito de recuperação do meio denso. Entretanto, é possível que, para formar essa suspensão mais estável, seja atingido o limite de escoamento desta, aumentando a viscosidade para valores impraticáveis. Em vista disto, deve-se buscar um ponto de equilíbrio entre a estabilidade da suspensão e o aumento da viscosidade.

### **Qualidade da Suspensão Fe/Si**

Klassen et al. (1963) estudaram a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de uma suspensão de Fe/Si, com a adição de reagentes orgânicos e inorgânicos. Esses estudos mostraram que a adição de hexametáfosfato de sódio (0,5 -1,0 g/l) à suspensão reduziu a sua viscosidade de 17,0 para 12,5 cP e tensão de cisalhamento de 30 para 0,8 N/cm<sup>2</sup>.

O pH da suspensão exerce também uma influência muito grande na redução da viscosidade e tensão de cisalhamento da suspensão, estando os melhores valores para pH entre 7,8 e 8,5.

O ferro-silício moído é bastante susceptível à oxidação na fase de moagem, estocagem e principalmente quando da sua utilização na separação em meio denso, prejudicando as propriedades reológicas da suspensão. A decomposição do ferro-silício

ainda não está suficientemente entendida, mas alguns fatores são apontados como responsáveis pela corrosão na superfície das partículas de Fe/Si, quais sejam (WILLIAMS e KELSALL, 1992):

- não uniformidade estrutural da liga de ferro-silício, variando de 15 a 25% Si;
- composição não uniforme de camada interfacial nas diferentes seções das superfícies das partículas de ferro-silício, quando em contato com a fase fluida;
- formação não homogênea e aparecimento de uma voltagem interna nas partículas de ferro-silício, resultante da cominuição.

A utilização de um agente inibidor como o nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ) ou fosfato de sódio ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) resulta na formação de um filme sobre a superfície das partículas de Fe/Si. Esse filme recobre as seções de anodo e catodo, tendo como resultado uma redução na cinética da reação eletroquímica de superfície. Com isso, o processo de corrosão do Fe/Si é minimizado (KLASSEN et al., 1963).

Estudos realizados na África do Sul, usando as técnicas de caracterização por microscopia eletrônica de varredura- (MEV) e Mössbauer, avaliaram as mudanças nas características físico-químicas do Fe/Si, no período de estocagem e nas usinas industriais que utilizavam a concentração em meio denso para o minério de ferro. Foram testadas, em laboratório, diferentes condições de estocagem (contendo solução de CaO) e realizados ensaios de laboratório em circuito fechado, usando suspensão de Fe/Si a 10% sólidos (densidade de 1,1), para avaliar as perdas por abrasão. Nas condições testadas, a estocagem do Fe/Si não resultou em mudanças nas suas características, no entanto foi constatada uma perda por abrasão, da ordem de 100 g/t de minério de ferro processado (WAANDERS e MANS, 2003).

As perdas de Fe/Si em um circuito de meio denso variam de 0,1 a 2,5 kg/t de minério beneficiado. As perdas devido à corrosão podem ser consideradas pequenas, no entanto podem ser evitadas mantendo o Fe/Si em estado passivo. Isto poderá ser atingido mediante a difusão do oxigênio atmosférico no meio, ou pela adição de pequenas quantidades de nitrato de sódio (WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

## PRINCÍPIO DA SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

---

O processo de separação em meio denso consiste em separar partículas em função de suas densidades, usando como meio de separação um fluido de densidade intermediária, que é a densidade de separação ( $d_s$ ). Assim, na separação de minerais ou carvões, as partículas de densidade inferior à densidade de separação ( $d_s$ ), flutuam e vão constituir o produto chamado flutuado; as de densidade superior à densidade de separação afundam e vão constituir o produto chamado afundado, como mostra a Figura 2 (WILLS, 1988; AQUINO, 1981).



**Figura 2.** Princípio da separação em meio denso.

Tal como anteriormente mencionado, o meio fluido a ser usado na separação pode ser constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos em água e suspensões de sólidos de granulometria fina, em água.

### Processos Estático e Dinâmico

Os processos de separação em meio denso podem ser classificados de acordo com a força externa dominante, em estático e dinâmico. Enquanto no primeiro a força dominante é a gravitacional, no segundo a força centrífuga predomina na separação. Exemplos de processos estático e dinâmico são as separações realizadas em tambor de meio denso e ciclone de meio denso, respectivamente.

#### *Processo Estático*

A separação por processo estático é feita em suspensões onde atuam somente forças gravitacionais, o que não implica que os equipamentos usados não possuam partes móveis, o necessário para prover a estabilidade do meio denso.

Teoricamente, qualquer tamanho de partícula pode ser tratado por meio denso. Na prática da separação estática industrial, as partículas a serem separadas devem ter tamanhos acima de 3 mm, sendo que o mais comum é 6 mm. O limite superior de tamanho, na prática, é de 150 mm, podendo ser ainda maior no caso de alguns carvões. Este limite máximo é determinado, normalmente, em função dos equipamentos de separação e tamanhos dos mesmos a serem usados no projeto, bem como das facilidades de manuseio de material na usina.

Em meio "estático", a separação dos minerais baseia-se na Equação [3], a seguir:

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

onde:

$F_g$  força gravitacional;

$M_p$  massa da partícula;

$M_f$  massa do fluido deslocado;

$g$  aceleração da gravidade.

A força gravitacional ( $F_g$ ) poderá ser positiva ou negativa. Esta será positiva quando o peso da partícula ( $M_p.g$ ) for maior que o peso do fluido ( $M_f.g$ ) deslocado pela própria partícula, ou seja, a força do empuxo. Neste caso, a partícula afundará. Quando a força gravitacional for negativa, ou seja, o peso da partícula ( $M_p.g$ ) for menor que o peso do fluido deslocado ( $M_f.g$ ), a partícula flutuará.

O processo de separação em meio estático é mais aplicado quando os minerais a separar se apresentam em granulometrias grossas, pois, como se sabe, a eficiência de separação decresce com a diminuição de tamanho das partículas, devido à baixa velocidade de sedimentação destas.

#### *Processo Dinâmico*

A separação por processo dinâmico é caracterizada pelo uso de separadores que empregam forças centrífugas, cerca de 20 vezes maiores que a força gravitacional atuante na separação por processo estático. Exemplos são o ciclone de meio denso e o *dynawhirpool*, que são separadores que utilizam a força centrífuga na separação dos materiais. Na separação dinâmica, o tamanho máximo da partícula varia de 12 a 50 mm e o mínimo de 1,0 a 0,5 mm. Excepcionalmente, pode ser tratado material abaixo de 0,5 mm. Estes tamanhos são condicionados pelas eficiências de separação dos próprios equipamentos.

Em meio dinâmico (p. ex. ciclone de meio denso), a aceleração da gravidade é substituída pela aceleração centrífuga. Portanto, tem-se a Equação [4], que descreve a separação dinâmica.

$$F_c = (M_p - M_f) \frac{v^2}{r} \quad [4]$$

onde:

$F_c$  força centrífuga;

$M_p$  massa da partícula;

$M_f$  massa do fluido deslocado;

$v$  velocidade tangencial de entrada da alimentação;

$r$  raio do ciclone.

A grande superioridade de  $\frac{v^2}{r}$  em relação à  $g$ , ou seja, da força centrífuga em relação à gravitacional, permite maior capacidade de separação aos separadores dinâmicos, bem como a separação de partículas a uma granulometria mais fina, em comparação com o meio denso estático.

## APLICAÇÕES DA SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO EM LABORATÓRIO E NA INDÚSTRIA

---

A separação em meio denso abrange, principalmente, quatro campos de aplicação (WILLS, 1988): (i) ensaios densimétricos em laboratório (ensaios de afunda flutua), muito utilizado nos estudos de caracterização mineralógica; (ii) estudos de caracterização de carvões minerais, visando o seu beneficiamento; (iii) obtenção de produtos finais (caso do beneficiamento de carvões e de materiais recicláveis); e (iv) na obtenção de pré-concentrados, na indústria, como nos casos das concentrações de diamantes, fluorita, minerais de lítio (espodumênio), sulfetos e óxidos metálicos.

### *Separação em Meio Denso em Laboratório*

Para os estudos de separação em meio denso em laboratório, com minerais ou carvões, os meios densos mais usados são os líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos e, mais raramente, as suspensões (AQUINO et al., 2007). Estes ensaios de laboratórios são realizados, com os seguintes objetivos:

- caracterização mineralógica, na separação de minerais ou grupos de minerais, bem como no estudo do grau de liberação das espécies minerais presentes em uma amostra;
- investigação da viabilidade técnica de utilização de métodos de concentração gravítica em desenvolvimento de processos;
- controle de ensaios de concentração gravítica;
- avaliação quantitativa e qualitativa de produtos da concentração gravítica;
- caracterização de carvões, onde são visualizadas as condições para o seu beneficiamento e as dificuldades intrínsecas ao mesmo, analisadas pelas curvas de lavabilidade desses carvões;
- avaliação de desempenho de equipamentos de separação gravítica, em uma determinada separação realizada (curva de Tromp).

Dentre os itens acima, uma aplicação muito importante que deve ser ressaltada é a caracterização de carvões. Esta caracterização é feita por meio de ensaios de afunda - flutua, em laboratório, ou ensaios densimétricos. Este estudo de caracterização de carvões minerais é também conhecido como estudo de lavabilidade, tendo em vista que ele vislumbra as condições de beneficiamento de um determinado carvão, para a obtenção de diferentes produtos. Ele é feito em uma amostra de carvão, utilizando diferentes densidades de corte.

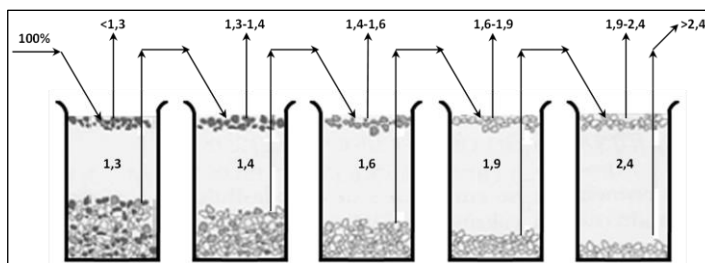
Essas densidades de corte (ou de separação) são obtidas misturando líquidos densos (bromofórmio e outros) com um solvente. Também são utilizadas soluções de sais inorgânicos (cloreto de zinco e água), na preparação das diferentes densidades que se deseja utilizar. A preparação dessas diferentes densidades tem por finalidade determinar as melhores condições de separabilidade de diferentes tipos de carvões em uma determinada amostra.



Com a realização dos ensaios de afunda - flutua, uma amostra de carvão poderá ser separadas em várias frações flutuadas e a última fração afundada, na última densidade de separação (rejeito). Estas frações serão secas, pesadas e analisados os teores de cinzas (e enxofre) em cada uma delas. De posse das percentagens em peso das frações, teores de cinzas e densidades de corte utilizadas, são traçadas as curvas de lavabilidade. Assim, têm-se as curvas do material flutuado, do afundado e a das densidades de corte utilizadas no estudo. Estas curvas são traçadas, em função dos percentuais em peso acumulados das frações flutuadas, para cada densidade de corte, e seus respectivos teores de cinzas.

Os resultados deste estudo mostram o comportamento de um determinado carvão quando for submetido ao beneficiamento por concentração gravítica. Mostra, por exemplo, qual será a recuperação em peso a ser obtida para um determinado produto requerido, para um determinado teor de cinzas, e qual densidade de corte a ser utilizada para que isso aconteça.

Estes estudos são realizados com uma amostra representativa, que é pesada e classificada em diferentes faixas granulométricas. Cada faixa granulométrica é previamente pesada e submetida a ensaios de afunda – flutua, conduzidos em recipientes contendo, cada um, um líquido denso ou uma solução de sal inorgânico (normalmente solução de cloreto de zinco), de densidade conhecida. Dependendo da constituição da amostra a ser estudada, a sequência de densidades pode ser crescente ou decrescente. A Figura 3 mostra o procedimento usado no laboratório, no caso de se utilizar cinco densidades, entre 1,3 e 2,4 (densidades crescentes, no caso). Conforme mostra a Figura 3, a fração flutuada no primeiro recipiente é retirada, e a fração afundada no mesmo é passada para o recipiente seguinte, e assim sucessivamente. As frações flutuadas em cada densidade vão sendo retiradas, separadamente. No final do ensaio, vão ser obtidas as várias frações flutuadas nas diferentes densidades de corte, assim como a última fração afundada, na última densidade de separação utilizada.



**Figura 3.** Procedimento sequencial de ensaios densimétricos.

Fonte: CHAVES e CASSOLA, 1994

No exemplo mostrado na Figura 3, nas cinco densidades de corte utilizadas são obtidos 6 (seis) produtos ou frações densimétricas, quais sejam: flutuado na densidade 1,3 ( $d < 1,3$ ); flutuado na densidade 1,4 ( $1,3 < d < 1,4$ ); flutuado na densidade 1,6 ( $1,4 < d < 1,6$ ); flutuado na densidade 1,9 ( $1,6 < d < 1,9$ ); flutuado na densidade 2,4

( $1,9 < d < 2,4$ ); e o afundado na densidade 2,4 ( $d > 2,4$ ). Estas seis frações densimétricas são devidamente preparadas e pesadas. Em todas estas frações são analisados os teores de cinzas e/ou enxofre. Levando todos esses dados: densidades utilizadas, pesos das frações recuperadas em cada densidade e os teores de cinzas e/ou enxofre de cada fração, são obtidas as curvas de lavabilidade. No caso dos carvões, estes estudos foram muito bem desenvolvidos, principalmente em termos da interpretação de resultados por meio de gráficos (curvas de lavabilidade), os quais permitem prever as quantidades e as qualidades dos diferentes tipos de carvão, em termos de teores de cinzas e enxofre, e de rejeitos, que podem ser obtidos, a partir da amostra ensaiada. Se os ensaios densimétricos forem bem conduzidos em laboratório, os resultados se aproximarão bastante dos resultados que poderão ser obtidos no beneficiamento industrial.

#### *Ensaio de Afunda-Flutua em Laboratório com Uso de Suspensões*

Ensaio de separação em meio denso (afunda-flutua) em laboratório, com a utilização de suspensões (finos de ferro – silício ou de magnetita), também podem ser realizados com o uso de equipamentos do tipo afunda-flutua da *Denver Laboratory Company* (Figura 4). Os ensaios são realizados com amostras de granulometria acima de 0,6 mm (DENVER, 1972).

Esse equipamento consiste de dois compartimentos cilindro-cônicos, que se comunicam por meio de uma calha (Figura 4). Nas partes cilíndricas dos dois compartimentos são colocadas cestas cilíndricas removíveis, confeccionadas com tela de 1 mm, para permitirem a circulação do meio denso (suspensão). Este meio denso circula, por meio de uma bomba, no sentido do compartimento superior maior (onde se faz a alimentação) para o menor, que recebe o material flutuado.



**Figura 4.** Equipamento afunda-flutua que usa suspensões na separação.

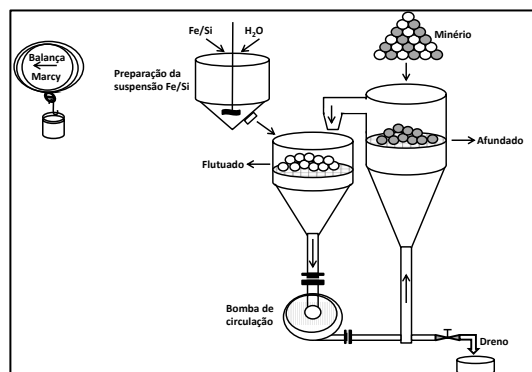
Fonte: DENVER, 1972

O fluxo do meio denso é feito por transbordamento do compartimento superior para o compartimento inferior, com auxílio da bomba de circulação. A corrente superior é baixa o suficiente para contrabalançar a tendência do meio denso, de se manter em regime.

Este tipo de ensaio é realizado em bateladas, com 1 ou 2 kg de amostra previamente preparada, e serve para determinar a possibilidade de aplicação ou não, do processo de separação em meio denso em operações de larga escala. A operação do equipamento consiste em encher o sistema (Figura 4) com um meio denso (suspensão de finos de ferro-silício ou magnetita) e fazê-lo circular, por meio de uma bomba localizada próxima das bases dos dois compartimentos. A amostra a ser ensaiada é alimentada na cesta localizada dentro do compartimento cilíndrico maior. Neste compartimento, a ganga, por ser normalmente mais leve que os minerais valiosos, flutua e transborda, por meio da calha, para o compartimento cilíndrico inferior e menor, onde fica retida, constituindo o material flutuado. Os minerais valiosos, normalmente mais densos, afundam e permanecem na cesta, onde foi realizada a alimentação, constituindo o material afundado (concentrado, no caso de tratamento de minérios). Com a retirada das duas cestas removíveis dos seus respectivos compartimentos, no final da operação, obtêm-se os dois produtos do ensaio: o material flutuado e o material afundado.

Normalmente, realizam-se ensaios nesse tipo de equipamento, quando se deseja: (i) separar minerais pesados (metálicos e não metálicos) da ganga existente na amostra; (ii) verificar a eficiência de corte em uma densidade obtida em ensaios densimétricos; (iii) preparar uma certa quantidade de produto para ensaios posteriores de aplicação industrial, utilizando material com granulometria grossa. Neste último caso (iii), a preparação deste material seria mais onerosa e mais complicada se fosse feita com o uso de líquidos densos, como bromofórmio e outros.

A Figura 5 mostra um desenho ilustrativo do circuito usado no ensaio de afunda-flutua (*sink and float*) que é realizado em laboratório, com o equipamento e a seqüência de operações, até a obtenção dos produtos do ensaio, começando com a preparação do meio denso (Fe/Si e água), a amostra a ser ensaiada (minério) e a separação da amostra em dois produtos: o flutuado, que é a fração mais leve, e o afundado, que é a fração mais densa, todas ainda dentro dos respectivos cestos removíveis, no equipamento.



**Figura 5.** Desenho ilustrativo do ensaio afunda-flutua em laboratório.

Fonte: BRAGA et al., 2009

## Principais Aplicações da Separação em Meio Denso na Indústria

O uso da separação em meio denso no setor mineral, como já foi dito anteriormente, foi desenvolvido há mais de cinco décadas, para o beneficiamento de carvões minerais, na obtenção de produtos finais (carvão beneficiado e rejeito). Nas últimas décadas, a separação em meio denso tem sido também aplicada no beneficiamento de minerais metálicos e não metálicos, principalmente como uma fase de pré-concentração, onde se descarta uma boa parte da ganga, antes mesmo que seja alcançada a liberação total das partículas valiosas do minério.

Nessa etapa de pré-concentração, normalmente retira-se, o quanto antes do circuito de concentração, gangas como quartzo, quartzito, xisto, etc. Com isso, já se obtém produtos bastante enriquecidos, com massas reduzidas, para as etapas seguintes do processamento, devido ao descarte de grande parte da ganga já liberada, existente no minério ou carvão.

Exemplos em que a separação em meio denso pode ser usada na fase de pré-concentração, são os casos em que o mineral pesado, de interesse, está associado a rochas matrizes leves, ou então, quando esse mineral de interesse ocorre com outros minerais de ganga também pesados, porém encaixados em rochas matrizes e encaixantes leves, como acontece, às vezes, em veios de cassiterita, onde ocorrem também gangas constituídas por sulfetos de ferro, óxidos de ferro e outros, associados à gangas silicosas leves. Em ambos os casos, a pré-concentração propicia um descarte razoável de massa de minerais de ganga, possibilitando, assim, redução nos custos globais de beneficiamento do minério.

No caso da indústria, então, há duas grandes áreas de aplicação da separação em meio denso: obtenção de um produto final para o mercado, como no caso do beneficiamento de carvões; e na obtenção de um pré-concentrado, com nos casos das concentrações de diamantes, fluorita, sulfetos e óxidos metálicos.

## PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO USADOS NAS INDÚSTRIAS

---

Os equipamentos de separação em meio denso, tanto os de separação estática como os de separação dinâmica, são muito usados na indústria carbonífera e, em alguns casos, em usinas de tratamento de minérios e materiais recicláveis. No caso do tratamento de minérios, a separação em meio denso é usada mais como uma etapa de pré-concentração. Os principais equipamentos utilizados e as formas de remoção dos materiais pesados (afundado) e dos materiais leves (flutuado) que compõem o carvão bruto ou minério serão descritos a seguir.

Os equipamentos de separação "estática" possuem, normalmente, recipientes de diferentes formas, dentro dos quais são introduzidos a alimentação e o meio denso. O produto flutuado é removido simplesmente por transbordo ou com a ajuda de pás. A remoção do produto afundado já é um pouco mais difícil e exige criatividade no projeto do separador. Um dos cuidados que se deve ter na remoção do produto afundado é evitar que haja grande carregamento do meio denso, ocasionando assim distúrbios provocados por correntes descendentes dentro do recipiente de separação (BURT, 1984; WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

A remoção do produto afundado pode ser feita por meios pneumáticos, bombeamento, elevadores de caçambas de chapas perfuradas, sistemas de arraste, etc.

Os separadores estáticos trabalham com maior volume de meio denso que os dinâmicos, propiciando, assim, um tempo de residência na separação, consideravelmente maior nos primeiros. Em muitos separadores, todo o meio denso é alimentado perto do topo do tanque, ou no topo da suspensão; em alguns, parte do meio denso é alimentado no fundo do tanque para permitir correntes ascendentes; há ainda casos em que o meio denso é alimentado em vários níveis, para formar correntes horizontais, ou para manter a homogeneidade deste em todo o tanque.

Considerando a ampla aplicação da separação em meio denso, especialmente no beneficiamento de carvões com granulometria grossa, não é de se surpreender a existência de um grande número de tipos e de fabricantes de equipamentos para esse fim, em uso comercial. Diversos tipos desses equipamentos são ou já foram usados, pela indústria mineral ou carbonífera. Os separadores tipo cone foram os primeiros usados com sucesso comercial na separação em meio denso (Cone Chance, em 1917). Estes foram também os primeiros a usar galena e magnetita como meios de separação. Os separadores de cone são os mais indicados para o tratamento de carvões grossos, na faixa de 100 a 3 mm, especialmente nos Estados Unidos, onde os carvões possuem grande proporção de material leve. São menos indicados para alimentações com maior proporção de material pesado. Separadores de tambor e de calhas, por outro lado, são indicados para alimentações com grande quantidade de pesados, fato que os tornam populares no campo de tratamento de minérios, onde a proporção de pesados chega alcançar 80%, ou no beneficiamento de carvões, onde muitas vezes a proporção de pesados na alimentação chega a ser superior a 50%, como nos carvões europeus e brasileiros.

Os separadores dinâmicos, com um dimensionamento adequado dos orifícios de entrada da alimentação e saída dos produtos, podem tratar alimentações com uma proporção variável de leves para pesados (AQUINO, 1981).

Os fatores que influenciam na seleção do tipo de equipamento são: capital disponível, espaço requerido para a instalação, tamanho máximo da partícula a ser tratada, capacidade de alimentação, densidade de separação. A alimentação deve ser umedecida antes da entrada no separador, para uma melhor eficiência de separação.

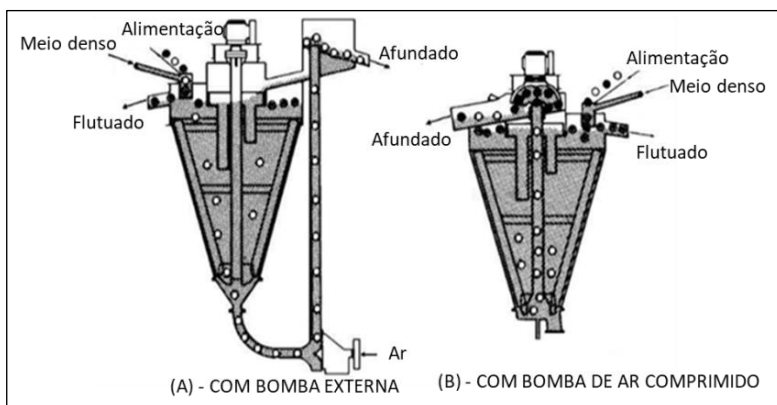
Serão descritos, a seguir, alguns dos principais equipamentos de separação estática e de separação dinâmica mais empregados na indústria mineral e carbonífera.

### Equipamentos Industriais de Separação Estática

#### *Separador de Cone WEMCO (Figura 6)*

É um tipo de separador de cone que consiste, essencialmente, de um tanque cônico, de até 6 m de diâmetro, podendo tratar partícula de até 10 cm de diâmetro com capacidade de até 500 t/h (WILLS, 1988). Neste tipo de separador existe um mecanismo interno de agitação lenta, o bastante para manter o meio em suspensão uniforme e auxiliar o movimento do produto flutuado em direção à periferia do separador, onde é descarregado por transbordo, com uma certa porção de meio denso, que é recuperado no circuito. O produto afundado é removido do cone por meio de bomba ou de fluxo ascendente externo (Figura 6a) ou interno (Figura 6b) com ar comprimido (*air lift*). Em ambos, parte do meio denso que sai com o afundado é drenado, e volta diretamente para dentro do cone.

Os separadores de cone foram desenvolvidos, originalmente, para beneficiamento de carvões minerais e posteriormente aplicados na concentração de outra gama de minerais. Foram, também, os primeiros tipos de equipamentos usados nos Estados Unidos para beneficiar carvão, usando a magnetita na preparação do meio denso. Os processos foram originalmente desenvolvidos com objetivo de reduzir o teor de cinzas do carvão, mas hoje a remoção conjunta do enxofre pirítico está se tornando de grande importância por razões ambientais (APLAN, 1985).



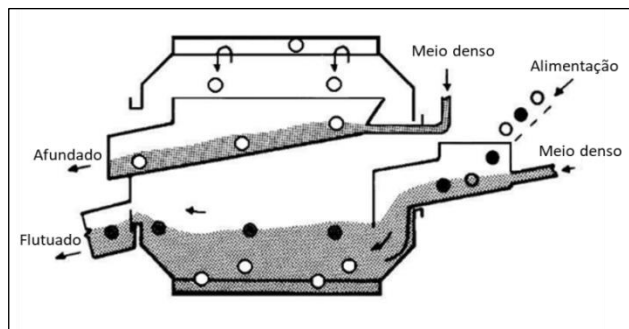
**Figura 6.** Separador de cone Wemco.

Fonte: WILLS e NAPIER MUNN, 2006

### Separadores de Tambor WEMCO

Os separadores de tambor convencionais são usados amplamente no beneficiamento de minérios metálicos e não metálicos, com granulometria de alimentação variando de 5 a 300 mm. Consistem de um tambor cilíndrico rotativo, provido de aletas ou taliscas (ressaltos) que são fixados na parede interna do tambor e que se destinam a remover, continuamente do circuito, o produto afundado durante a separação. O produto flutuado sai por transbordo em um vertedouro localizado na extremidade oposta à alimentação.

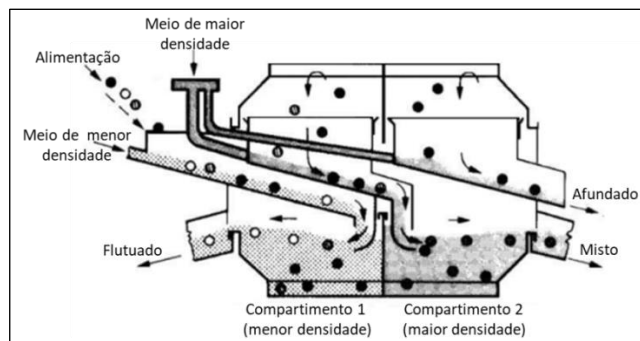
O separador de tambor pode ser usado para obtenção de dois ou três produtos de separação. Para dois produtos de separação (flutuado e afundado), este é constituído de um só compartimento de separação (Figura 7); enquanto que aqueles para três produtos de separação (mais um produto misto), o equipamento é constituído de dois compartimentos de separação (Figura 8), operando independentemente um do outro.



**Figura 7.** Separador de tambor de um compartimento.

Fonte: WILLS e NAPIER MUNN, 2006

No separador de três produtos, ou de dois compartimentos, o produto afundado em uma densidade menor, no primeiro compartimento, alimenta o segundo compartimento onde a densidade de separação é mais alta. Do primeiro compartimento sai o produto leve (flutuado) e do segundo compartimento saem os produtos pesado (afundado) e misto.



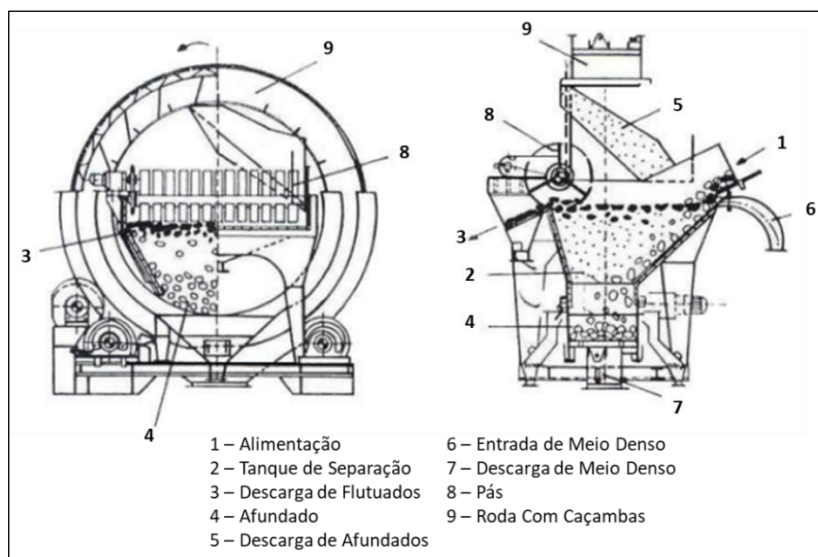
**Figura 8.** Separador de tambor de dois compartimentos.

Esses separadores são construídos de vários tamanhos, até 4,3 m de diâmetro por 6 m de comprimento, com capacidade máxima de 450 t/h. Longitudinalmente, existem placas divisórias internas, que separam a superfície do flutuado da descarga do afundado. A pequena profundidade do meio denso nesses equipamentos, em comparação com os separadores de cone, minimiza a sedimentação das partículas do meio denso, dando uma maior uniformidade na densidade em toda a extensão do tambor. A agitação provocada pelos elevadores também contribui para uma melhor homogeneização do meio denso (WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

### *Separador Teska*

Foi desenvolvido na Alemanha Ocidental em 1959, e hoje é produzido pela Humboldt Wedag, essencialmente para a indústria carbonífera. Consiste de um tambor com caçambas internas (Figura 9) de chapas perfuradas, para transporte do material afundado e drenagem do meio denso. O tambor gira lentamente dentro de um tanque aberto que contém o meio denso. O produto flutuado é descarregado na extremidade oposta à da alimentação, por transbordo ou por auxílio de pás, em uma calha. Esse produto é descarregado em peneiras primárias para a drenagem do meio denso, que retorna diretamente ao tanque do separador. O produto afundado no tanque do meio denso é elevado pelas caçambas do tambor e descarregado em outra calha.

Uma característica do separador *Teska* é o controle da corrente descendente de meio denso que sai das caçambas de chapas perfuradas e é descarregado no tanque através de orifícios ajustáveis. Isto é importante para evitar alguma tendência de formação de gradiente de densidade dentro do tanque do separador.



**Figura 9.** Separador Teska.

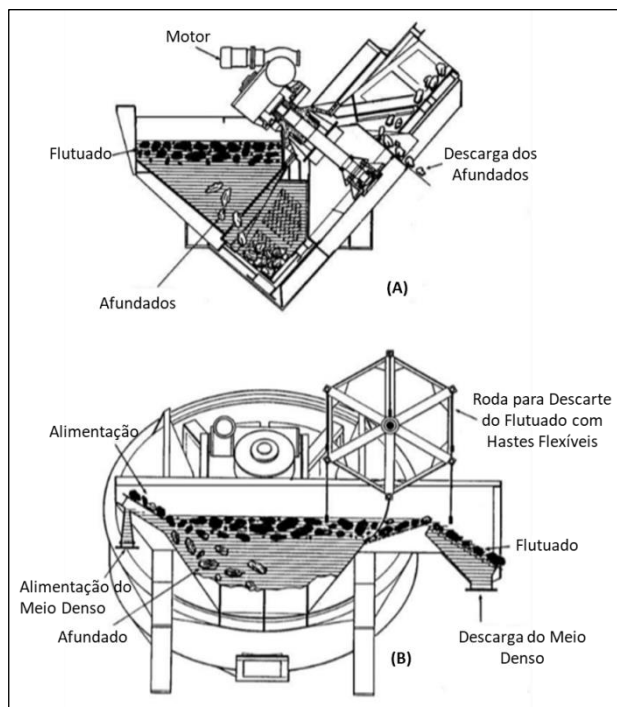
Fonte: BURT, 1984



### Separador *Drewboy*

Este separador (Figura 10) pode ser considerado como uma modificação do separador *Teska*, onde o tambor, com características diferentes, opera na posição inclinada, e não na vertical. Foi desenvolvido na França, sendo muito usado na Europa e especialmente na Grã Bretanha e Alemanha, no beneficiamento de carvões, porém pouco usado nos Estados Unidos, devido à sua relativa baixa capacidade para flutuados. O *Drewboy* faz a separação em dois produtos; se um terceiro produto é desejado, será necessária a instalação de dois desses equipamentos, em série. A instalação de dois separadores em série é muito comum, tanto no caso dos separadores *Drewboys*, como para os separadores *Teska*, no beneficiamento de carvões.

No separador *Drewboy*, a alimentação entra em uma das extremidades do tanque e os produtos leves (flutuados) são descarregados na extremidade oposta; enquanto os produtos pesados (afundados) são removidos do fundo do tanque por uma roda giratória, constituída de compartimentos radiais, montada em um eixo inclinado. Este eixo é suportado por mancais localizados fora do compartimento do meio denso, como mostra a Figura 10. A alimentação do meio denso pode ser feita pelo fundo do tanque ou por cima, próxima da alimentação do minério ou carvão. A proporção do meio denso que entra por esses dois pontos é controlada por válvulas.

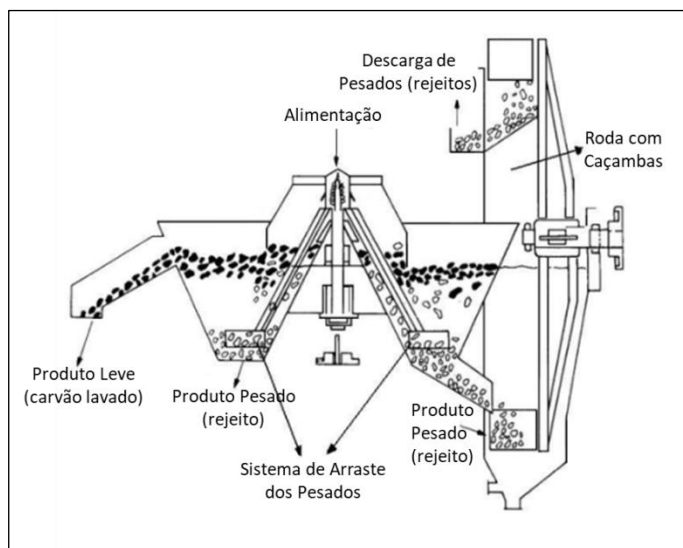


**Figura 10.** Separador *Drewboy* (A) vista lateral e (B) vista superior.

Fonte: OSBORNE, 1988

### *Separador Norwalt*

Este equipamento foi desenvolvido na África do Sul, onde existem muitas instalações desse equipamento nas usinas de beneficiamento de carvões. O *Norwalt* (Figura 11) consiste de um tanque anular, com uma parte interna cônica, que protege o mecanismo de acionamento do sistema de remoção do produto afundado. A alimentação é introduzida no separador, mais para o centro do equipamento, dentro de uma cortina anular que imerge um pouco no tanque de meio denso. A cortina força a alimentação a imergir no meio denso, evitando a saída de produtos pesados com os produtos leves (carvão lavado). Os produtos leves são descarregados, por transbordo, nos vertedouros laterais do separador, enquanto que os produtos pesados são removidos continuamente do fundo do separador por um sistema de arraste, que gira em torno de um eixo central e conduz todo o material à uma descarga única conectada a um elevador de caçambas ou a um sistema similar ao *Drewboy* (tambor inclinado). O sistema de remoção dos pesados evita, também, a decantação das partículas que compõem o meio denso, mantendo-as em suspensão.



**Figura 11.** Separador Norwalt.

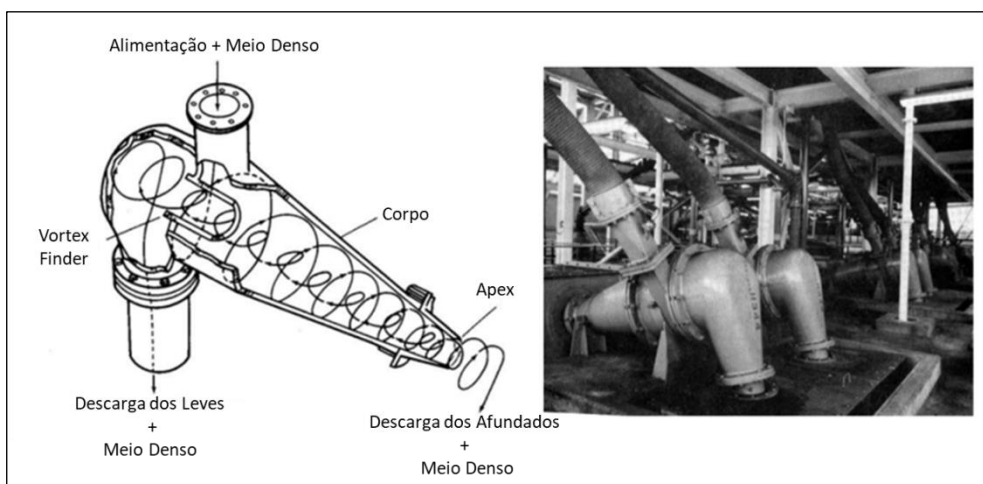
Fonte: WILLS e NAPIER MUNN, 2006

## **Equipamentos Industriais de Separação Dinâmica**

### *Ciclone de Meio Denso*

Os ciclones de meio denso são muito usados no beneficiamento de minérios e, principalmente no processamento de carvões. A alta força centrífuga envolvida, possibilita a separação, com sucesso, de partículas a granulometrias mais finas do que por outros métodos gravíticos. A alimentação dos ciclones de meio denso não deve

conter partículas abaixo de 0,5 mm, para evitar a contaminação do meio denso com esta fração fina, minimizando, assim, as perdas do meio denso no processo. A atuação de forças de cisalhamento dentro dos ciclones permite a utilização de partículas mais finas de ferro-silício ou magnetita na constituição do meio denso, o que é essencial para a estabilidade da suspensão durante o processo de separação. O princípio de operação é bastante similar ao do ciclone convencional de classificação. A alimentação e o meio denso são introduzidos, tangencialmente e sob pressão no ciclone, o qual idealmente é instalado em posição inclinada, tal como mostra a Figura 12, possibilitando que a alimentação seja feita por gravidade, de uma determinada altura manométrica. No caso dos ciclones DSM (*Dutch State Mines*), esta altura situa-se em torno de nove vezes o diâmetro do ciclone, no caso de beneficiamento de carvões e diamante (BURT, 1984b; WILLS, 1988).



**Figura 12.** Ciclone de meio denso típico.

Fonte: OSBORNE, 1988

A alimentação por gravidade é sempre desejada, pois reduz a degradação da alimentação, que normalmente ocorre quando se usa bombeamento.

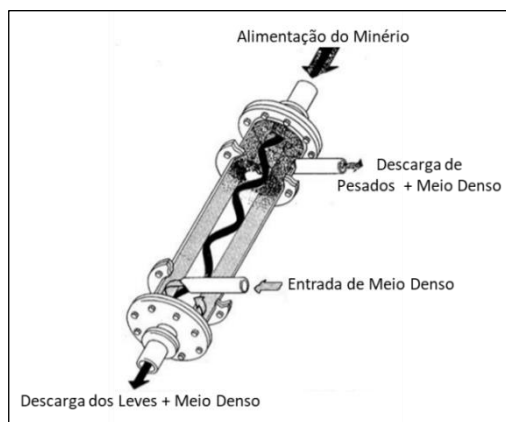
Os produtos pesados, *underflow*, movem-se ao longo da parede do ciclone e são descarregados no ápex, enquanto que os leves, *overflow*, se descarregam no *vortex finder*, saindo, em seguida, pelo duto de descarga dos leves. O meio denso forma um gradiente de densidade dentro do ciclone, que aumenta no sentido do centro para a parede interna do ciclone.

#### *Separador Dynawhirpool (DWP)*

O separador *DWP* foi originalmente desenvolvido em 1960, para tratamento de finos de carvão, nos Estados Unidos, mas é bastante usado para tratar carvões e minérios, principalmente na faixa de 15 a 0,5 mm. O *DWP* consiste de um cilindro de comprimento e diâmetro definidos (Figura 13), com aberturas nas extremidades

superior e inferior, por onde são feitas a alimentação do minério e a descarga do fluído, respectivamente. Existem ainda dois tubos laterais localizados nas partes inferior e superior do cilindro, que permitem a entrada tangencial do meio denso e a descarga do afundado, respectivamente. A maior parte do meio denso (aproximadamente 90%) é alimentada, por bombeamento, na parte lateral e inferior do cilindro; o restante junto com a alimentação, para auxiliar a entrada da mesma no equipamento.

O equipamento *DWP* é montado com uma inclinação de  $25^\circ$ , em relação à horizontal, quando operado com minérios e com uma inclinação de  $15^\circ$  com carvão.



**Figura 13.** *Dynawhirpool*.

Fonte: WILLS, 1988

No Brasil, esse equipamento foi utilizado no beneficiamento de minérios de diamante e fluorita. Foi utilizado intensamente na extinta ICOMI, com finos de minério de manganês, na Votorantim Metais, com minério oxidado de zinco e na Mineração Santa Lucrecia, com bauxita refratária.

A forma tangencial de entrada do meio denso na parte inferior e lateral do aparelho propicia a formação de um *vortex* ascendente ao longo da parede interna de todo o comprimento do aparelho, cuja descarga é feita pela abertura tangencial lateral superior. O tubo de entrada da alimentação é acoplado a um funil alimentador, por onde entra o material a ser tratado, com pequena parte do meio denso.

No processo de separação (Figura 13), as partículas leves da alimentação não chegam a penetrar no *vortex* ascendente de meio denso. Elas flutuam, internamente, nesse vórtex e são descarregadas, com parte do meio denso, na extremidade inferior do *DWP*, constituindo a descarga dos leves mais o meio denso. Como as partículas leves não chegam a penetrar no vórtex, a degradação física dessas partículas é reduzida. As partículas pesadas da alimentação penetram no *vortex* ascendente em direção à parede interna do cilindro e são logo descarregadas na abertura lateral superior, por

meio de uma mangueira de descarga, junto com a maior parte do meio denso, constituindo a descarga dos pesados mais o meio denso. Como a descarga das partículas pesadas está localizada próxima à alimentação, os pesados são removidos da unidade quase que de imediato após entrarem, reduzindo, consideravelmente, a degradação dessas partículas. Somente as partículas de densidades superiores, porém próximas à do meio denso é que entram em contato com as paredes internas do cilindro por um tempo mais prolongado. A descarga tangencial dos pesados é conectada a uma mangueira flexível; a altura desta mangueira pode ser usada para ajustar a pressão de topo e, desta forma, auxiliar no controle da densidade de corte.

A capacidade do *DWP* é de até 100 t/h. Este equipamento apresenta algumas vantagens sobre outros tipos de separadores centrífugos de meio denso. Além de propiciar uma menor degradação dos produtos da separação, contribui para um menor desgaste operacional do equipamento. Apresenta também um bom desempenho de separação, bem como tem custos operacionais mais baixos, em razão de somente o meio denso ser alimentado por bombeamento (WILLS, 1988).

A separação no *DWP* baseia-se na criação e controle de um *vortex* ascendente, onde sua forma e estabilidade são afetadas por variáveis geométricas e operacionais.

#### Variáveis geométricas:

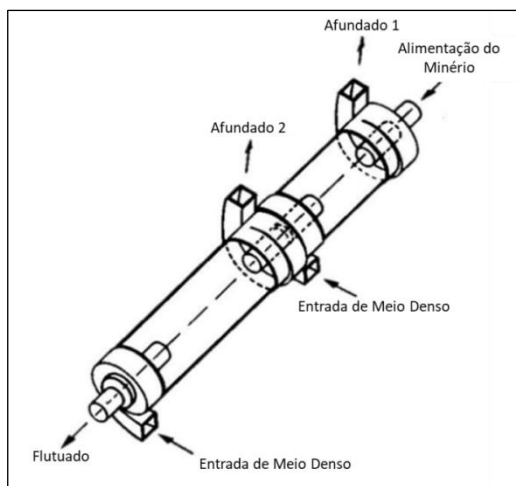
- comprimento do cilindro;
- diâmetro do cilindro;
- diâmetro e comprimento, dentro do cilindro, dos tubos de alimentação e de saída do flutuado;
- diâmetro de entrada do meio denso e de saída do afundado.

#### Variáveis operacionais:

- pressão de alimentação do meio denso;
- pressão de descarga do afundado;
- inclinação do *DWP*.

#### *Separador Tri-Flo*

Este separador consiste em dois *DWPs* acoplados (Figura 14). É utilizado nas operações de beneficiamento de carvão mineral, minerais metálicos e não metálicos. A entrada de meio denso e a saída da fração pesada são em forma de voluta. Esta forma de entrada de alimentação produz menos turbulência do que a tangencial usada no *DWP*. Este separador opera em dois estágios. O produto flutuado que sai do primeiro estágio é retratado no segundo, com a mesma densidade do meio ou em densidade diferente.



**Figura 14.** Tri-Flo.

Fonte: WILLS e NAPIER MUNN, 2006

Por ser um separador de dois estágios, a separação resulta em três produtos, podendo ser usada para obtenção de concentrado (produto valioso), misto e rejeito. O misto obtido (afundado 2), dependendo da situação, pode ser cominuído, deslamado e retornar ao mesmo circuito, ou ser tratado em um circuito separado.

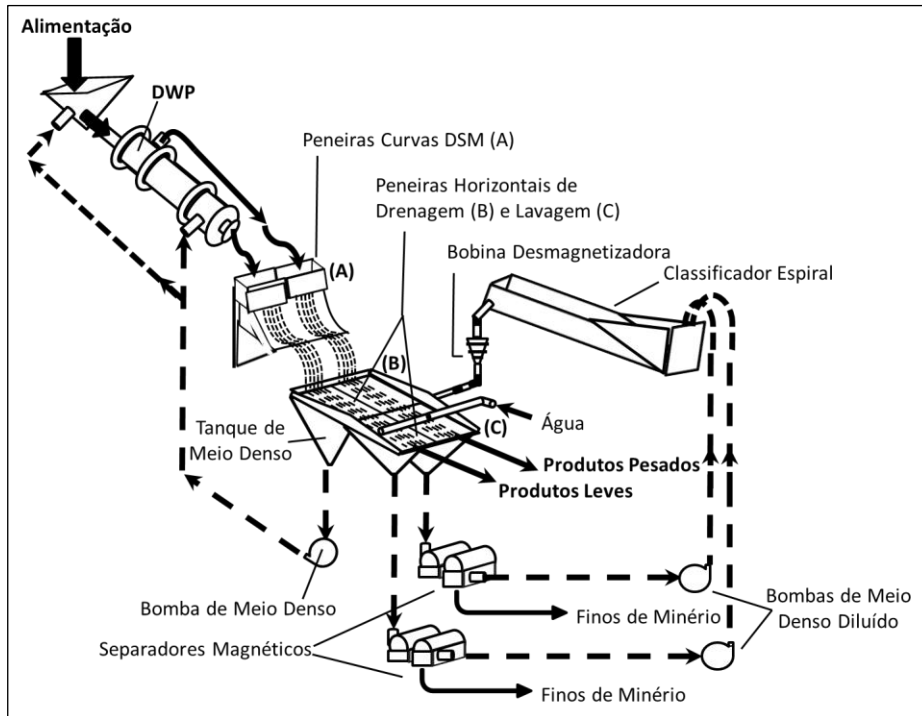
No caso de tratamento de minerais metálicos, o segundo estágio de separação funciona como estágio *scavenger*, aumentando assim a recuperação global no circuito. O segundo produto (concentrado *scavenger*) pode ser, da mesma forma, rebitado e, após deslamagem, retornar também ao circuito. Tem-se, assim, o primeiro concentrado (afundado 1), o concentrado *scavenger* (afundado 2) e rejeito (flutuado). Quando o separador é usado no tratamento de carvões, o segundo estágio purifica o flutuado do primeiro estágio, produzindo um carvão *cleaner* de alta pureza (flutuado), um misto (afundado 2) e um rejeito (afundado 1). Esses dois estágios de separação existentes no Tri-Flo aumentam a eficiência da operação. Esses separadores são normalmente fabricados em quatro tamanhos, variando de 250 a 500 mm de diâmetro, com capacidade de 15 a 90 t/h, respectivamente (WILLS e NAPIER MUNN, 2006).

## CIRCUITO TÍPICO DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

A preparação do minério para alimentação de um circuito de meio denso é de fundamental importância para o sucesso da separação. A alimentação, além de estar na granulometria adequada, deve estar livre de finos, evitando-se, assim, um aumento da viscosidade do meio, que afetaria a eficiência de separação, bem como conduziria a um maior consumo do meio utilizado (WILLS, 1988).

O que mais onera as operações de separação em meio denso é o sistema de recuperação do meio denso, para o seu reaproveitamento no circuito. O meio denso utilizado na separação é descarregado do separador junto com os produtos da separação, ou seja, com os leves e os pesados.

Um circuito típico de separação em meio denso é mostrado na Figura 15, no qual o separador usado é um *Dynawhirlpool* (DWP). O circuito seria similar se, no lugar deste, outro tipo de separador de meio denso fosse utilizado (ciclone de meio denso, separador de tambor etc.) (FIGUEIRA e AQUINO, 1981; WILLS, 1988).



**Figura 15.** Circuito típico de separação em meio denso.

Fonte: adaptado de WILLS, 1988

Os produtos leves e pesados que saem do DWP, passam, separadamente, por peneiras curvas DSM (A) de drenagem do meio denso e peneiras horizontais divididas em duas partes, onde a primeira (B) é ainda para drenagem do meio denso. Cerca de 90% do meio denso é recuperado nessas duas partes (A e B) e bombeado de volta ao circuito. Na segunda parte da peneira horizontal (C) é onde se processa a lavagem dos produtos, que é feita com água sob pressão (*spray*), para a retirada de partículas finas de meio denso e de minério que ficam aderidas aos produtos de separação.

Os finos das peneiras de lavagem dos produtos (C) constituem uma polpa muito diluída, contendo o meio denso e finos do minério. Esta polpa diluída é tratada em separadores magnéticos, para recuperação do material que constitui o meio denso (magnetita ou ferro-silício). Em seguida, a polpa contendo o meio denso recuperado passa por um classificador espiral para desaguamento, visando ajustar à densidade requerida na operação de separação. Na etapa seguinte, este material desaguado (*underflow* do classificador) é desmagnetizado em bobinas desmagnetizadoras, para assegurar a não floculação das partículas, e retorna ao circuito de meio denso no processo.

Em lugar do classificador espiral, outro sistema de adensamento de polpa, também, pode ser usado. Atualmente, o controle da densidade do meio é feito automaticamente por meio de instrumentação.

### CIRCUITO INDUSTRIAL DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO, USANDO TAMBOR DE MEIO DENSO, PARA CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO

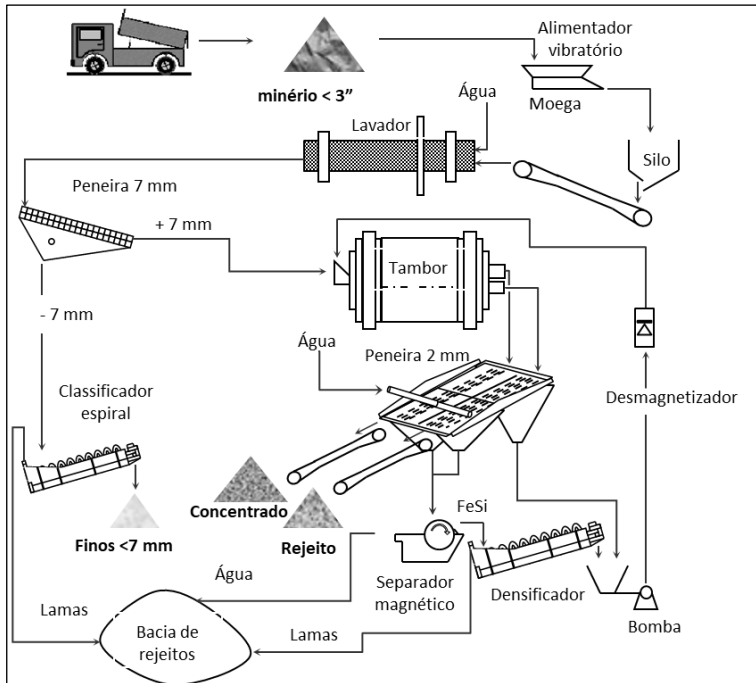
---

Um circuito industrial para concentração de minério de ferro, utilizando-se a separação em tambor de meio denso é mostrado na Figura 16. O processo de enriquecimento propriamente dito, inicia-se com a lavagem e peneiramento do minério de ferro granulado (-7+32 mm) em tambor lavador rotativo para retirada dos finos (<7 mm) que podem alterar a densidade do meio denso. A seguir, o minério de ferro lavado e isento de finos alimenta o tambor separador com uma suspensão de FeSi com densidade entre 2,9 e 3,1. No interior do tambor, o material pesado afunda na suspensão de FeSi e o material leve flutua, promovendo, assim, o enriquecimento do minério de ferro. As frações leve e pesada são coletadas na saída do tambor, separadamente em duas linhas, uma de afundados (concentrado) e outra de flutuados (rejeito). Após a separação, o concentrado do minério de ferro e os rejeitos são lavados em peneira vibratória, para recuperação e recirculação do meio denso (suspensão de Fe/Si) (AQUINO et al., 2007; BRAGA et al., 2009).

O circuito de recuperação da suspensão de Fe/Si é composto por uma bomba de polpa, um separador eletromagnético tipo tambor e um densificador (classificador Akins ou espiral). A polpa de Fe/Si diluída pela água de lavagem (segunda metade da peneira) dos produtos é encaminhada para o separador eletromagnético, onde ocorre a recuperação do Fe/Si e o descarte da água para a bacia de sedimentação. A suspensão de Fe/Si recuperada alimenta novamente o classificador espiral para correção da densidade da suspensão (meio denso).

O processo de separação em meio denso, em usina de beneficiamento, com minério de ferro (62%Fe) de Corumbá-MS, proporcionou a produção de um concentrado granulado com teor de ferro superior a 65% e com recuperações metalúrgicas superiores a 90% (BRAGA et al., 2009).





**Figura 16.** Circuito industrial de concentração de minério de ferro, usando separação em meio denso, com tambor rotativo.

Fonte: BRAGA et al., 2009

## CONTROLE OPERACIONAL E AVALIAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE SEPARAÇÃO EM MEIO DENSO

Para um bom desempenho das operações de separação em meio denso são necessários, principalmente: uma boa preparação da alimentação; vazão de alimentação adequada ao equipamento; controle da densidade de corte; controle granulométrico do material usado no meio denso (ferro-silício ou magnetita, os mais usados); controle da pressão de entrada da alimentação (caso, por exemplo, dos ciclones de meio denso); controle da pressão de entrada do meio denso e pressão de saída dos pesados (caso da separação em DWP) (VAN OLPHEN, 1977).

Existem diversos métodos para avaliar o desempenho das operações de separação em meio denso na indústria, principalmente no caso do beneficiamento de carvões. Estes métodos estão distribuídos nos chamados critérios dependentes e critérios independentes.

Os critérios dependentes mais usados são apresentados a seguir.

**Eficiência orgânica:** existem diversas formas de definir a eficiência de separação de um equipamento ou de uma usina de beneficiamento; uma muito usada na separação de carvões é a eficiência de recuperação ou eficiência orgânica, conforme mostrado na Equação [5].

$$E(\%) = \frac{\text{Recuperação de carvão lavado}}{\text{Recuperação teórica}} \times 100 \quad [5]$$

Aqui, a recuperação teórica é a porcentagem de carvão contido na alimentação com o mesmo teor de cinzas do carvão lavado. Este dado pode ser tirado da curva de lavabilidade do carvão em questão (KHAN, 1992)

**Material deslocado total:** define-se como material deslocado total, a quantidade de material de rejeito presente no concentrado, somado à quantidade de material de concentrado presente no rejeito, guardando-se as devidas proporções entre concentrado e rejeito. Essas quantidades são medidas em termos percentuais. Quanto menores as proporções de material deslocado, melhor o desempenho do equipamento. As medidas são feitas com base na densidade de corte do equipamento e em testes densimétricos realizados em laboratório, com os produtos da separação (concentrado e rejeito).

**Eficiência de separação metalúrgica:** esta forma de eficiência de separação, muito usada em beneficiamento de minérios, é calculada pela Equação [6]:

$$E(s) = \frac{rv - rg}{rv} \times 100 \quad [6]$$

onde:

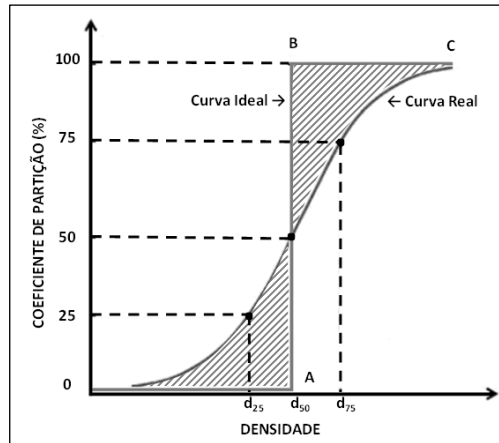
$E(s)$  eficiência da separação;

$rv$  recuperação metalúrgica do mineral útil ou valiosos;

$rg$  recuperação metalúrgica da ganga.

Os critérios independentes são derivados da curva de partição do equipamento, também conhecida como curva de Tromp. Com a construção dessa curva, pode-se medir a eficiência de separação do equipamento. Para construir a curva de Tromp (Figura 17), é necessário conhecer a recuperação em massa do produto pesado, obtido na operação industrial e as curvas de lavabilidade do concentrado e do rejeito. Com base nestes dados, pode-se calcular a alimentação reconstituída (ou calculada) e os coeficientes de partição, os quais fornecem a porcentagem de cada fração densimétrica, ou densidade média do material (produtos pesados) (RUBIO, 1988).

Plotando os coeficientes de partição, de 0 a 100, no eixo das ordenadas e as densidades médias das faixas densimétricas no eixo das abcissas, pode-se traçar a curva de Tromp, como é ilustrado na Figura 17.



**Figura 17.** Curva de Tromp.

A curva OABC da Figura 17 representa a curva ideal, onde todas as partículas de densidades menores que a densidade de corte iriam para o flutuado, enquanto as partículas de densidades maiores, iriam para o afundado. Entretanto, na prática isto não acontece, pois partículas de densidades próximas à densidade de corte podem dirigir-se à fração flutuada ou à afundada. Para estes casos tem-se a curva real, também mostrada na Figura 17, construída com base em probabilidades associadas às diferentes classes de partículas que se dirigirem ao afundado. A área hachurada entre as curvas ideal e real corresponde à quantidade de material deslocado, também conhecido como *misplaced material*. A densidade  $d_{50}$ , referente ao coeficiente de partição de 50%, é chamada de densidade efetiva de separação ou simplesmente de densidade de partição ( $d_p$ ). O segmento, na curva real, correspondente aos coeficientes de partição de 25% e 75% é, na grande maioria dos casos, um segmento de reta; quando não o é, se aproxima bastante deste, podendo ser considerado na prática, como tal. A inclinação desse segmento em relação à vertical já dá uma ideia da eficiência de separação, ou seja, quanto mais próximo ele estiver da vertical, mais eficiente será a separação. Esta eficiência de separação pode ser medida pelo chamado "erro provável de separação" ou *ecart probable* ( $E_p$ ), que é definido pela metade da diferença entre as densidades correspondentes aos coeficientes de partição de 75% e 25%, Equação [7]:

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} \tag{7}$$

Para uma separação ideal  $E_p = 0$ . Portanto, quanto menor  $E_p$ , mais a curva se aproximam da vertical e mais eficiente será o processo de separação. Na prática,  $E_p$  usualmente situa-se na faixa de 0,01 - 0,08.

Outro índice que pode ser usado para medir a eficiência de separação de um equipamento é a caracterização dos equipamentos de separação, cujo meio é a água ou o ar (caso dos jigues, mesas, espirais, ciclones pneumáticos, etc.) As relações entre  $I$  e  $E_p$

são expressas pelas Equações [8] e [9]. chamada imperfeição ( $I$ ).  $E_p$  é mais usado para caracterizar os equipamentos de separação em meio denso, enquanto que  $I$  é mais usado para

$$I = \frac{E_p}{d_p} \text{ (para equipamentos de separação em meio denso)} \quad [8]$$

$$I = \frac{E_p}{d_p - 1} \text{ (para equipamentos de separação cujo meio é a água)} \quad [9]$$

De acordo com alguns autores, os valores de  $I$  variam de 0,07 para ciclones de meio denso a 0,175 para jigues.

## DESENVOLVIMENTOS RECENTES

---

Conforme descrito no início do capítulo, o início da concentração em meio denso de minerais datam de 1858, quando Bessemer patenteou o uso de cloretos (Fe, Mn, Ba e Ca), mas o uso industrial, propriamente dito, somente no século XX, quando o uso da magnetita como meio denso na limpeza de carvões (Conklin Process).

A partir de então, vários desenvolvimentos foram realizados, sempre com foco no beneficiamento de carvões e posteriormente expandido para outros minerais (sulfetos metálicos, minério de ferro, fluorita, diamantes), sejam nos tipos de meio denso (soluções orgânicas, soluções salinas, suspensões de magnetita ou ferro-silício, etc) ou nos tipos de equipamento estáticos (tambor, cone *Wemco*, *Teska*, etc) ou de separação dinâmica (ciclone, *DWP*, *Tri-Flo*).

Não houve grandes desenvolvimentos em quase um século de uso da concentração em meio denso e as maiores evoluções foram realizadas nos ciclones, que tem sido cada vez mais aperfeiçoada no que diz respeito à geometria de entrada, no uso de materiais de desgaste mais resistentes a abrasões (Ni *hard*, poliuretano, revestimento de cerâmica) e principalmente no aumento de capacidade.

Atualmente os circuitos de meio utilizam ciclones de até 1,5 m de diâmetro quando há 50 anos não passavam de 0,5 m. As baterias de ciclones eram compostas por módulos de 12 unidades e atualmente operam unitariamente. Peneiras de drenagem e lavagem também tiveram melhorias significativas, principalmente aquelas relacionadas à lavagem do material e na produtividade. Também são observadas reduções globais (até 30%) no CAPEX (*Capital Expenditure*) no circuito de meio denso (NAPIER-MUNN e HOLTHMAN, 2014).

Outros desenvolvimentos estão relacionados ao sistema de limpeza e recuperação do meio denso, bem como, na implantação de controle automático do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

APLAN, F.F. Gravity Concentration. In: SME Mineral Processing Handbook Mineral Processing Technology, EISS, N.L. Editor in Chief. Section 4, v. 1. EUA. 1985.

AQUINO, J.A. Concentração em meio denso. Rio de Janeiro: CETEM, (CI-11/81), 1981.

AQUINO, J.A., OLIVEIRA, M.L.M. e BRAGA, P.F.A., Ensaios em meio denso. In: Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, Sampaio, J.A., França, S.C.A. e Braga, P.F.A (editores), Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007, p. 295-318.

BENJAMIN, R.E. et al. Recovery of heavy liquids from dilute solutions. *American Mineralogists*, v. 56, p. 613-619, mar./apr. 1971.

BRAGA, P.F.A.; EMIL, R.K.; XAVIER, R.A. Beneficiamento de Minério de Ferro de Corumbá por Meio Denso. In: *XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, Gramado - RS, set./out. 2009.

BURT, R.O. Heavy medium separation. Gravity Concentration Technology. Cap. 9, p. 139-185. New York: Elsevier, 1984.

BURT, R.O. The theory of heavy medium separation. In: Gravity concentration technology. New York: Elsevier, cap. 5, p. 53-79, 1984b.

CHAVES, A.P; CASSOLA, M.S. Notas de aula da disciplina: Processos densitários – USP, 1994.

DENVER, Laboratory Equipment. Denver Equipment Company. Bulletin nº LG3-B15. Denver, CO. 1972.

FIGUEIRA, H.V.; AQUINO, J.A. Dynawhirpool (DWP) e sua aplicação na indústria mineral. Rio de Janeiro: CETEM/DNPM/CPRM, (Série de Tecnologia Mineral, 20), 1981.

HEAVY-MEDIA Separation process fine ore concentration. Ore Dressing Notes, New York, n. 12, Aug. 1943.

IGC, INTERMAGNETIC GENERAL CORPORATION (1989) Operating Instruction of Magstream Model 100.

KAHN, H. Notas de aula da disciplina: Caracterização tecnológica de minérios e matérias primas minerais – USP, 1992.

KLASSEN, V.I.; LITOVKO, V.I. and MYASNIKOV, N.F. (1963). Improvement of the physico-mechanical properties of ferrosilicon suspensions with the aid of reagents. *Soviet Journal, non Ferrous Metals*, v. 36, n. 10, 1963, pp 17-20 (In Russian).

MITCHELL, D.R.; LEONARD, J.W. Coal Preparation. 3 ed. New York: AIME, 1968.

MULLER, L.D.; BURTON, C.J. The heavy liquid density gradient and its applications in ore dressing mineralogy. In: *Common Wealth Mining and Metallurgical Congress*, 8, Austrália and New Zeland, 1965.

NAPIER-MUNN, T., HOLTHMAN, P. Innovations in Dense Medium Separation Technology. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, Ed. Anderson, C.G., Dunne, R.C. and Uhrig, J.L. Published by the Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), Colorado, USA, 2014.

OSBORNE, D.G. *Coal Preparation Technology*, v. 1. p. 250-267, 1988.

PRYOR, E.J. Dense Media Separation. In *Mineral Processing*, Chapter 12, Third Edition p. 269, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1965.

RUBIO, J. Caracterização do desempenho de equipamentos e processos de beneficiamento de carvão. In: *Carvão Mineral - Caracterização e Beneficiamento*. Editora Nova Linha. Artes Gráficas. v. 1, cap. 1, p. 53-64. 1988.

SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M.M. Beneficiamento Gravimétrico: Uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Editora da UFRGS, Porto Alegre. 2005.

SYMONDS, D.F. Selection and sizing of heavy media equipment. In: *Design and Instalation of Concentration and Dewatering Circuits*. (s.l.): SME/AIME, cap. 6, p. 250-267, 1986.

TRUSH, P.W. (ed.) *A dictionary of mining, mineral and related terms*. (Washington): Bureau of Mines, 1968.

VAN OLPHEN, H. *An introduction to clay colloid chemistry*. 2 ed. New York, John Willey, cap. 9, p. 136, 1977.

VIANA JUNIOR, A.; MAGALHÃES, G.; CAMPOS, J.A.F.; ASSUMPÇÃO, L.F.G.; FURTADO, M.A. T.; FIUZA, M.R.; ANDRADE, V.L.L. Métodos físicos de concentração de minérios. In: *Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia in memoriam Prof. Paulo Abib Andery*. Recife: ITEP, p. 116-188, 1989.

WAANDERS, F.B. and MANS, A. Ferrosilicon: DMS medium characterisation and degradation during use. In: *Proceeding of the XXII International Mineral Processing Congress*, p. 396-401, Cape Town, South Africa, 2003.

WILLIAMS, R.A.; KELSALL, G.H. Degradation of ferrosilicon media in dense medium separation circuits. In: *Minerals Engineering*, v. 5, n. 1, p. 57-77, 1992.

WILLS, B.A. Heavy medium separation. In: *Mineral Processing Technology*. New York: Pergamon Press, 4 ed., cap. 11, p. 420-456, 1988.

WILLS, B.A. & NAPIER-MUNN, T.J. Heavy medium separation (DMS). In: *Mineral Processing Technology*. Great Britain: Elsevier Ltd. 7 ed., cap. 11, p. 246-266, 2006.