

SEPARAÇÃO DE MINERAIS VIA MÉTODO MAGNÉTICO-DENSITÁRIO

Masini, E. A.⁽¹⁾; Sant'Agostino, L. M.⁽¹⁾; Kahn, H.⁽¹⁾

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar uma descrição, em bases técnicas, do processo de separações minerais via método magnético-densitário. Este processo utiliza fluidos paramagnéticos, permitindo separações em uma ampla faixa de densidades: 1,5 a 20 g/cm³. O processo reveste-se de uma importância bastante grande por considerar que atualmente a separação de minerais por densidades, apesar de ser técnica largamente empregada em estudos de caracterização mineralógica e tecnológica, encontra-se restrita à utilização de líquidos ou suspensões densos, os quais apresentam densidades inferiores a de uma expressiva parcela dos minerais de interesse econômico. Ademais, os líquidos orgânicos, de uso muito mais difundido que as suspensões, são tóxicos, voláteis e apresentam um elevado custo operacional. Nesse artigo são apresentados os procedimentos, as aplicações, bem como as limitações do método.

ABSTRACT

The paper analyses technical aspects of mineral separation using a magneto-hydrostatic process. The method is based on the action of paramagnetic fluids, and can separate particles in a wide range of specific gravities: from 1,5 up to 20 g/cm³. This technology represents a very important new resource for gravity mineral separations, since its common use in mineralogy and process mineralogy studies and investigations, was limited by the specific gravity of the available heavy liquids and suspensions, which are lighter than the majority of the common ore minerals. Additionally, these organic heavy liquids, more widely used than suspensions, are toxic, volatile, and have high operational costs. Some procedures, applications and also the limitations of the method are discussed.

(1) Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2423, São Paulo - SP. Brasil; CEP 05508, FAX (011) 211-4308.

INTRODUÇÃO

A efetividade e a qualidade da separação mineral através de fluidos paramagnéticos ou ferromagnéticos vem despertando bastante interesse no setor minero-metalúrgico, tanto na área laboratorial de caracterização tecnológica de minérios, como na área de acabamento final das usinas de tratamento de ouro, diamante, cassiterita e usinas de reciclagem de metais não ferrosos ou de rejeitos de joalherias.

Atualmente as técnicas usuais de separação de minerais e de metais, nas áreas de acabamento final dos produtos, utilizam-se de propriedades densitárias, magnéticas, elétricas e óticas dos minerais dispersos no ar ou na água. A exploração das propriedades densitárias e magnéticas das partículas nas separações minerais, através de campos de forças combinados com fluidos paramagnéticos ou ferromagnéticos, é uma técnica recente, já usual na caracterização tecnológica de minérios em laboratório e, que também apresenta uma significativa importância quanto à sua aplicação industrial no acabamento de concentrados.

Tendo em vista o potencial da técnica, o objetivo deste trabalho é apresentar uma descrição dos fundamentos e das limitações do processo na separação de minerais através do separador denominado Magnético-Densitário (Magnetohydrostatic Separator - MHS).

CONCEITO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO

Essencialmente o método explora o princípio de que um fluido paramagnético ou ferromagnético colocado sob a ação de um campo magnético não uniforme fica sujeito a uma força atrativa, direcionada para a região onde o campo magnético é maior. Dispondo desta ação e combinando-a, de forma total ou parcial, com a ação de campos gravitacional e/ou de forças centrífugas, é possível estabelecer um gradiente de densidade aparente no meio, permitindo a separação de minerais não magnéticos por densidade ou de minerais fracamente magnéticos em função de suas características densitárias e magnéticas. O gradiente de densidade aparente é decorrência do campo de força magnético que atua sobre a unidade de volume do fluido paramagnético, cuja intensidade (F_v) em um ponto é dado por:

$$F_v \equiv k (B / \mu_0) (dB / dZ) \quad (1)$$

, onde B = campo magnético induzido.
 k = susceptibilidade volumétrica do líquido.
 μ_0 = permeabilidade do espaço vazio ($4 \pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$)
 dB/dZ = gradiente magnético do campo induzido.

Se esta força for devidamente ajustada para atuar na direção da força gravitacional, um efeito equivalente a aumento na densidade do fluido é obtido, dado por:

$$\delta_m = F_v / g \quad (2)$$

, onde δ_m = densidade suplementar equivalente devido ao campo magnético
 g = aceleração devido ao campo gravitacional.

Dessa forma a densidade aparente do fluido neste ponto é dada por:

$$\delta_a = \delta_f + \delta_m \quad (3)$$

, onde δ_f = densidade real do fluido
 δ_a = densidade aparente do fluido.

Uma série de trabalhos e patentes de equipamentos de separação de minerais com base apenas nas diferenças entre combinações de densidades e propriedades magnéticas, são comentados no artigo de Walter et al. (1). Os autores, entretanto, ressaltam sobre a limitação das forças de separação resultantes, pois as mesmas não passam de uma fração da força gravital correspondente.

Para vencer esta limitação, estudos com fluidos em rotação começaram a ser desenvolvidos a partir de 1980. O processo é similar ao da separação de minerais através de ciclones de meio denso, exceto que a densidade efetiva de separação do meio é magneticamente estabelecida e ajustavel por alterações na velocidade de rotação ou nas propriedades do fluido paramagnético (densidade e susceptibilidade magnética).

A figura 1 mostra o aspecto essencial do conceito de separação através de seção esquemática de um separador com rotação do fluido magnético, que é ao mesmo tempo atraído na direção radial por um ímã externo. Nesta situação a separação é governada principalmente pelas seguintes forças que atuam sobre as partículas:

F_m = força magnética diretamente sobre a partícula (quando magnética);

F_{mb} = força "empuxo" face à diferença de pressão no fluido, gerada pelo campo magnético;

F_{c1} = força centrífuga líquida, gerada pela rotação.

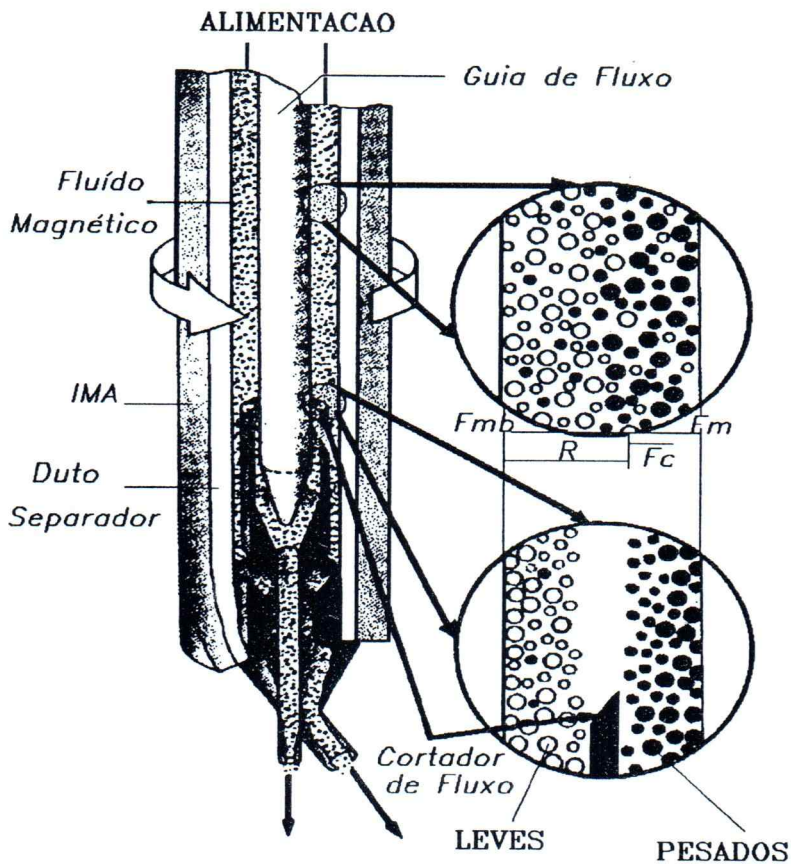


FIGURA 1
ESQUEMA DO SEPARADOR USANDO O FLUIDO MAGNÉTICO EM ROTAÇÃO

Os seguintes sistemas são utilizados para gerar campo de força centrífuga:

- rotação uniforme do conjunto guia, polpa e duto;
- escoamento da polpa na forma espiral, através de duto estático (similar a redemoinhos em ciclones);
- rotação do guia de fluxo num duto estático.

Uma análise detalhada das forças que atuam nas diversas variações de configurações do processo foi realizada por Walker et al. (1). Apesar das inúmeras interações, basicamente, a densidade efetiva de

separação é resultado do balanço de ações entre a força de "empuxo" que desloca as partículas radialmente para o centro do duto e a combinação das forças magnéticas e centrífugas que atuam sobre as partículas também radialmente, arrastando-as para a parede do duto. Assim, partículas minerais magnéticas e de densidade maior que a densidade de corte movem-se radialmente para a parede externa, e as menos magnéticas e de menor densidade movem-se radialmente para o centro do duto. A separação destes fluxos de partículas é realizada através de um cortador de fluxo anelar.

POTENCIAL DO PROCESSO

Para avaliar a relevância do processo e suas limitações, apresenta-se a seguir uma análise detalhada do método de separação e resultados obtidos em algumas atividades realizadas pelo Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, com o equipamento da Intermagnetic General Corporation, denominado Magstream™, Model-100.

Fundamentos Teóricos

Para facilitar o entendimento, a análise será feita com base num equipamento cuja configuração possibilita gerar forças magnéticas e centrífugas com comportamento linear sobre o fluido paramagnético, na direção radial.

Não levando em consideração efeitos secundários, de menor significância, devidos ao escoamento e convecção do fluido e as interações entre partículas e fluidos (forma, rugosidade, resistência ao movimento e outros de menor intensidade), a força por unidade de volume (F_m / V) resultante sobre uma partícula qualquer esquematizada na figura 1, na direção radial, é dada pela equação:

$$\begin{array}{ccccccc} \rightarrow & & \rightarrow & & \rightarrow & & \rightarrow \\ F_m / V = (\delta_m - \delta_f) W^2 R + M_m (\text{grad } B) - M_f (\text{grad } B) & & & & & & (4) \end{array}$$

, onde:

- F_m / V = força resultante sobre a partícula (N/m^3)
- δ_m e δ_f = densidade da partícula e do fluido (t/m)
- M_m e M_f = magnetização inerente da partícula e do fluido;
- B = indução magnética
- W = rotação $2 \pi N/60$; N (r.p.m.)

Deve-se observar ainda, que a equação (4) assume as seguintes condicionantes:

- . eixo de rotação vertical;
- . rotação constante, e
- . M_m e M_f permanecem alinhadas ao campo magnético induzido.

Considerando que o campo magnético é gerado por um ímã de multipolos, cuja magnitude é dada por $B = B_0 (R/R_0)^{n-1}$, independente da posição circunferencial, onde B_0 é o valor de B numa dada posição radial R_0 , e $2n$ o número de polos do ímã, o gradiente que se estabelece na direção radial se reduz a:

$$\begin{aligned} &\rightarrow \\ \text{Grad. } B &= dB / dR = (n-1) (B_0 / R_0) (R / R_0)^{n-2} \end{aligned} \quad (5)$$

Para que B apresente um comportamento linear, assume-se que o campo magnético é gerado por um ímã de quatro polos ($n = 2$) e a equação (4) se transforma para :

$$F_m / V = (\delta_m - \delta_f) W^2 R + (M_m - M_f) (B_0 / R_0) \quad (4)$$

Para fluidos e partículas para e diamagnéticas nas condições estabelecidas, é válida a relação:

$$(M_m - M_f) = (k_m - k_f) H \quad (5)$$

onde, k_m e k_f são as susceptibilidades magnéticas das partículas e do fluido por unidade de volume, e H o campo aplicado. No campo de aplicação do processo, a interação face a estas características é muito pequena, quando comparada àquelas devido ao campo H , e é possível admitir que $B = \mu_0 H$, assim, a equação (4) torna-se:

$$F_m / V = (\delta_m - \delta_f) W^2 R + (k_m - k_f) \quad (6)$$

Como $B = B_0 (R / R_0)$ para $n = 2$, tem-se:

$$F_m / V = (\delta_m - \delta_f) W^2 R + (k_m - k_f) (B_0^2 / \mu_0 R_0) R \quad (7)$$

Através da equação (7) é possível observar que a força resultante por unidade de volume que atua sobre as partículas, nesta configuração, é dependente da posição das mesmas na direção radial.

Walker et al (1), fazem uma análise do processo através da figura 2, representando graficamente um conjunto de condições operacionais para quatro tipos de partículas, cada uma tendo uma combinação diferente de densidade e propriedade magnética em relação a um determinado fluido.

Analisando a equação (7) para o conjunto de partículas cujo par δ_m e k_m implica em $F_m / V = 0$, a mesma passa a ter a forma abaixo, onde os valores de δ_m e δ_f são pontos de partição representados graficamente no segmento de reta AB , interna à figura 2.

$$\delta_m = -[B_o^2 / u_o R_o^2 W^2] [k_m - k_f] = \delta_f \quad (8)$$

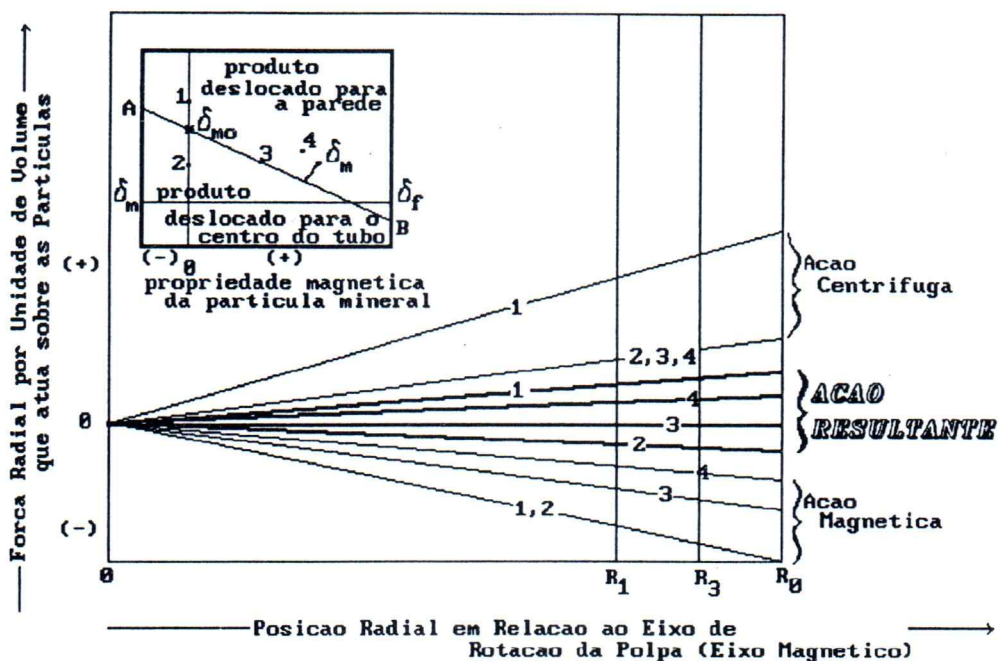


FIGURA 2
REPRESENTAÇÃO DA SEPARAÇÃO EM DOIS PRODUTOS (1)

Nota-se que esta relação mostra independência da partícula quanto à sua posição radial, e descreve a seguinte situação física:

- partículas não magnéticas são separadas num simples ponto, cuja densidade é dada por δ_{m0} ;
- partículas magnéticas com densidade maior que δ_{m0} se deslocam para a parede do duto na proporção da sua susceptibilidade magnética, devido à atração magnética sobre a partícula;
- a linha de partição é definida por δ_{m0} , e o ponto onde $k_m = k_f$ e $\delta_m = \delta_f$, situação na qual a partícula se comporta da mesma forma que o fluido.

Através da equação (8) pode-se ver que o valor de δ_{mo} , intersecção da linha de partição com $k_f = k_m = 0$ pode ser manipulada de três maneiras;

- alterando-se o valor de k_f ;
- alterando-se o campo induzido B ;
- alterando-se a velocidade de rotação.

Procedimentos Operacionais Adotados

O aparelho disponível no Depto. de Eng. de Minas da EPUSP, MAGSTREAM™, modelo 100, consiste basicamente de um duto rotativo inserido em um campo magnético de 4 polos, por onde passa o material a ser separado.

A amostra, com volume máximo de 60 ml por ensaio, cerca de 200g (2), é colocada num pequeno silo de controle da vazão de amostra, o qual alimenta o duto de separação, previamente carregado com o fluido magnético (MAGFLUID™).

De acordo com a discussão teórica anterior, três são as forças que interagem sobre as partículas: o "empuxo" gerado pelo fluido, fazendo com que as partículas se desloquem para o centro do duto, a força centrífuga devida à rotação, e a força magnética atuante sobre partículas paramagnéticas, estas duas últimas fazendo com que as partículas se desloquem para a parede externa do duto. O balanço dessas forças cria um meio com a densidade desejada, a qual também é função da susceptibilidade magnética das partículas, possibilitando uma separação densitária. As partículas menos densas (com uma baixa força centrífuga) são dirigidas radialmente para o centro, as partículas mais densas são dirigidas para a parede do duto.

Mesmo com velocidade de rotação relativamente baixa, o resultado obtido é algo semelhante ao de uma separação convencional através de líquidos densos: a operação é similar à realizada em centrífuga, exceto pelo efeito da densidade de corte ser função de um meio magnético, da velocidade de rotação do duto e das susceptibilidades magnéticas das partículas envolvidas.

O ajuste da densidade de separação (equação 8) pode ser feito através da mudança do campo magnético, velocidade de rotação ou concentração do fluido (MAGFLUID). O tempo de permanência da partícula na zona de separação é função da densidade da partícula, do seu tamanho, da velocidade de rotação e diluição (viscosidade) do fluido.

O fluido magnético utilizado na operação do Magstream - MAGFLUID, é uma suspensão coloidal, biodegradável, diluível em água, opaca, de coloração marrom escura a preta. O MAGFLUID apresenta tipicamente uma magnetização de 3,5 a 5,0 emu/cm³, e o pH entre 10 e 12 unidades, densidade específica de 1,15 a 1,20 e uma viscosidade relativa de aproximadamente 10 centipoise, sendo diluído em água destilada previamente à operação de separação.

Para cada recipiente de MAGFLUID o fabricante fornece uma curva de calibração de peso específico versus magnetização, com fatores de correção em função de variações de temperatura. Para uma dada diluição de MAGFLUID em água devem ser medidas a densidade e a temperatura, determinando-se em seguida a sua magnetização de acordo com a curva de calibração do fluido.

O operador pode escolher qualquer concentração de fluido para conseguir uma densidade de corte desejada. Um fluido mais concentrado tenderá a minimizar as interferências relativas às propriedades magnéticas das partículas, enquanto que empregando um fluido mais diluído a separação se torna mais sensível às propriedades magnéticas das partículas.

Empregando um fluido mais concentrado a eficiência da separação tende a aumentar face ao incremento da força atuante sobre as partículas. Salienta-se, no entanto, que para partículas com peso específico substancialmente superior ou inferior à densidade de corte, a força atuante sobre estas pode ser forte o suficiente para segura-las contra a parede interna ou externa do recipiente de separação, de tal forma a obstruir o separador ou interferir na passagem normal do material através do separador.

Um gráfico de performance da separação deve ser utilizado para selecionar a magnetização do fluido, de forma a prevenir que as partículas com densidades mais extremas aderam às paredes internas ou externas do recipiente de separação, paralelamente à garantia de eficiência de separação para os minerais com peso específico próximo à densidade de corte.

Uma vez selecionada a concentração do Magfluid e tendo sido determinadas ou calculadas as propriedades do fluido (magnetização, M_f , e densidade específica, δ_f) o único parâmetro de operação a ser estabelecido é a velocidade de rotação, N , necessária para se obter uma separação com a densidade de corte desejada, δ_{sep} . O número de rotações, N , em revoluções por minuto, pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$N = C_m \sqrt{M_f / (\delta_{sep} - \delta_f)} \quad (9)$$

, onde C_m é a constante de cada separador fornecida pelo fabricante, M_f é a magnetização por unidade de volume do fluido (MAGFLUID) em eum/cm³, δ_{sep} é a densidade desejada para a separação a ser efetuada e δ_f é o peso específico do fluido.

A eficiência de uma separação é sensível à taxa de alimentação volumétrica e ao tempo de espera, após finalizada a separação. Baixa eficiência pode ocorrer se o material for alimentado a uma razão superior à taxa de sedimentação verificada no compartimento de separação ou se o equipamento for desligado antes do tempo necessário para que os materiais já separados atinjam os recipientes de coleta.

Embora a maioria dos minerais com densidade entre 2,5 e 3,5 g/cm³ e granulação entre 0,60 e 0,063 mm possam ser adequadamente processados à taxa de alimentação de até 20 cm³/min, seguido de um tempo de espera de 60 segundos, esta, bem como o tempo de espera, podem ser estabelecidos a partir da determinação da taxa de sedimentação do material, em procedimento padronizado em laboratório.

O separador Magstream apresenta faixas de operação bem definidas em termos das características da amostra a ser processada, como também em relação ao tamanho e susceptibilidade magnética das partículas a serem separadas.

O separador foi projetado para separar material particulado com dimensões entre 0,60 e 0,063 mm (30 e 230 malhas). Partículas maiores que 0,60 mm podem obstruir o separador e partículas mais finas que 0,063 mm podem não serem separadas eficientemente, a não ser que sejam adotadas condições particulares de operação - baixa taxa de alimentação, dentre outras. Para uma operação rápida e eficiente é recomendado que, sempre que possível, as amostras sejam previamente peneiradas em 0,60 e 0,063 mm.

É altamente recomendado que o operador use um ímã permanente para a remoção de todo o material ferromagnético (por ex. magnetita) e fortemente paramagnético (por ex. titano-magnetita ou anfibólio rico em ferro). O ímã permanente também possibilitará a remoção grãos e fragmentos de rocha contendo inclusões significantivas de material magnético.

A retirada do material magnético da amostra é necessária porque os materiais ferromagnéticos e os fortemente paramagnéticos serão atraídos pelo ímã do equipamento (independentemente de seu peso específico), fixando-se na parede do recipiente de separação. Estes materiais aderidos à parede podem reduzir a eficiência da separação ou no caso de ocorrerem em quantidades significativas, obstruir o separador.

Nos modelos descontínuos, como o utilizado na EPUSP, existe um recipiente interno abaixo da região de separação (guia), onde é coletado o material menos denso. O material mais denso passa lateralmente a este recipiente, sendo depositado no fundo do duto. Após a separação o guia central é removido juntamente com o recipiente em que fica retido o produto leve. Segue-se a remoção do duto contendo os pesados e a filtragem de ambos os produtos, com o fluido magnético sendo recuperado para uso futuro. Os sólidos são lavados com água e a parcela de fluido remanescente, com elevada diluição, é descartada.

O Magstream pode ser usado também para separação magnética, e neste caso, é usado sem rotação do duto. Devido à força magnética do fluido, as partículas de baixa susceptibilidade são lançadas radialmente para o interior do duto. As partículas que podem ser separadas dessa maneira são tipicamente paramagnéticas ou diamagnéticas com susceptibilidade da ordem de $1000 \cdot 10^{-6}$ emu/cm³ ou inferior.

Adicionalmente, cita-se que o MAGFLUID deve ser armazenado de maneira a prevenir o seu congelamento ou aquecimento excessivo. A temperatura de armazenagem não deve ser inferior a -1°C ou superior a 32°C. O aumento de oxigênio dissolvido, o tornará mais facilmente susceptível à degradação biológica por meio de infestação de bactérias.

Para checar a degradação biológica, o pH do sistema fluido em uso ou estocado deve idealmente ser analisado uma vez por semana. O pH deve estar entre 10 e 12 unidades, caso contrário o fluido deve ser tratado com uma solução de hidróxido de potássio.

Comparação com Separação Convencional Através de Líquidos Densos

Na EPUSP a separação magneto-densitária vem sendo empregada na área de caracterização mineralógica e tecnológica, substituindo em grande parte as separações convencionais feitas através de líquidos densos. As principais aplicações tem sido:

- suporte a análises mineralógicas quali e quantitativas;
- estudos de minerais pesados;
- purificação para obtenção de concentrados minerais puros;
- separações densitárias em estudos de caracterização tecnológica, particularmente de minérios de ouro, sulfetos de natureza diversa e cassiterita, dentre outros minerais pesados;

Esta técnica, frente às comparações citadas adiante, jamais virá a substituir a separação convencional por líquidos densos (3 e 4), mas sim complementá-la, sendo extremamente recomendável a coexistência de ambas em todo e qualquer laboratório que empregue rotineiramente técnicas de separações minerais.

As principais vantagens da separação magneto-densitária compreendem:

- ampla variação da densidade de corte utilizando, apenas um único meio de separação: 1,6 a 20 g/cm³;
- não toxicidade do reagente utilizado (MAGFLUID), dispensando a utilização de sistemas apropriados de ventilação e exaustão;
- baixo custo operacional quando comparado aos líquidos orgânicos, tabela I. O consumo de MAGFLUID e o tempo dispendido na separação são próximos aos verificados quando no uso de líquidos densos.

Como principais desvantagens em relação aos líquidos densos tem-se:

- granulometria de operação em faixa mais estreita (0,60 a 0,063 mm) para o modelo básico, sem acessórios especiais;
- eficiência de separação inferior à verificada para os líquidos densos, em média ao redor de 0,94 a 0,98, contra valores superiores a 0,99 para os líquidos densos. Salienta-se ainda, que a eficiência da separação magneto-densitária varia de acordo com as condições operacionais adotadas, sendo decrescente para densidades de corte mais elevadas;
- as partículas paramagnéticas são separadas em função de suas características magnéticas e densitárias, ou seja, as densidades de corte são variáveis em função da susceptibilidade magnética das partículas;
- elevado custo de investimento, o qual em parte é neutralizado por dispensar sistemas de ventilação e exaustão, e pelo baixo custo operacional;

Uma comparação entre resultados de determinação de minerais pesados em areia; através de separações em líquidos densos e Magstream, é apresentada na Tabela II. Verifica-se que as discrepâncias entre os dois procedimentos são mais elevadas para as proporções extremas, onde a eficiência da separação magneto-densitária é reduzida.

TABELA I
COMPARAÇÃO DE PREÇOS DE REAGENTES

	δ (g/cm ³) a 20° C	preço US \$ / litro
MAGFLUID	efetiva até 20	10.00
BROMOFÓRMIO	2,86	40.00
TETRA-BROMO-ETANO	2,96	120.00
DI-IODETO DE METILENO	3,32	800.00

Nota: valores estimados (FOB), base janeiro de 1992

TABELA II
COMPARAÇÃO DE SEPARAÇÕES EM LÍQUIDOS DENSOS x MAGSTREAM

AMOSTRA	% em peso	
	PESADOS (Magstream)	PESADOS (bromofórmio)
A	4,17	2,28
B	13,77	11,89
C	42,06	40,54
D	88,93	91,13
E	95,49	99,24
Densidades de corte:	Magstream = 2,90 g/cm ³ Bromofórmio = 2,86 g/cm ³	

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WALKER, M.S.; DEVERNOE, A. L. Mineral Separations Using Rotating Magnetic Fluids. Int. Journal of Mineral Processing, 31, p.195-216. 1991.

2. INTERMAGNETICS GENERAL CO Operating Instructions for the Magstream Model 100 Laboratory Separator. 54p. 1989.
3. BROWNING, J. S. Heavy Liquids an Procedures for Laboratory Separation of Minerals, U.S. Bureau of Mines, Inform. Circ. 8007. 14p. 1961.
4. PARFENOFF, A.; POMEROL, C.; TOURENQ, J. Les Mineraux en Grains. Masson et Cie. Paris. 578p. 1970.