

CAPÍTULO 4 – ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA POR MEIO DE CICLOCLASSIFICADOR

Paulo Fernando Almeida Braga

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

Hudson Jean Bianchini Couto

Engenheiro Químico/UFRRJ, Mestre e Doutor em
Engenharia Química/COPPE-UFRRJ
Pesquisador do CETEM/MCT

1. INTRODUÇÃO

A classificação de minérios pode ser feita por elutriação centrífuga utilizando um conjunto de hidrociclones ligados em série, conforme ilustrado na Figura 1. Esse conjunto, denominado de cicloclassificador (*cyclosizer*), é utilizado na determinação da distribuição granulométrica de amostras de minérios, na faixa de, aproximadamente, 10 a 50 μm , para materiais com densidade similar à do quartzo (2,7). Essa faixa estende-se para granulometrias abaixo de 4 μm , caso dos minerais e/ou minérios mais pesados. Um exemplo típico é a classificação da galena com densidade igual a 7,5 (Wills, 1988).

A geometria de cada hidrociclone favorece a classificação, em decorrência dos diâmetros decrescentes na tubulação de entrada (alimentação) e de saída (*vortex*) na direção do fluxo. Essa redução dos diâmetros resulta em maiores velocidades da suspensão e forças centrífugas com intensidades elevadas no interior dos hidrociclones, promovendo um decréscimo do tamanho limite de separação das partículas (Wills, 1988).



Figura 1 – Cicloclassificador com hidrociclones invertidos em série, existente no CETEM.

O equipamento é aplicado na classificação granulométrica na faixa fina, por exemplo, nas áreas de: processamento de minérios finos; fabricação de massa cerâmica; pigmentos; abrasivos e fertilizantes; metalurgia do pó; dentre

outras. Os ensaios são simples e o tempo requerido para uma classificação eficiente neste equipamento varia de 10 a 30 min. Além disso, possui a vantagem ímpar de separar as partículas em frações distintas, como ocorre no peneiramento. Essas análises são de elevada importância para determinar os teores dos minérios em cada fração granulométrica, algo impossível por meio de outros equipamentos modernos, como *Malvern* e *Sedigraph*.

O circuito completo do cicloclassificador está ilustrado na Figura 2 e consiste basicamente de cinco hidrociclones, instalados em série e posições invertidas. Outros componentes completam o circuito: um rotâmetro com escala em L/h, uma bomba d'água monobloco, reservatório de água para alimentação do sistema, manômetro montado na tubulação de descarga da bomba, termômetro para determinação da temperatura da água do reservatório e um dispositivo de controle de tempo, temporizador (*timer*) com alarme.

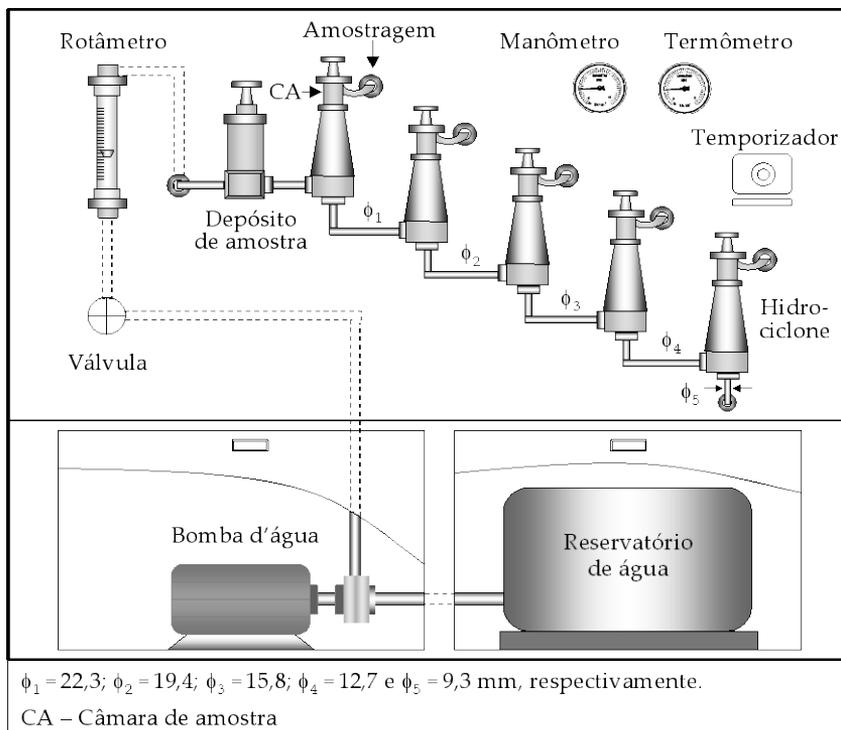


Figura 2 – Esquema ilustrativo do cicloclassificador, marca CIMAQ, modelo CL-501, existente na usina piloto do CETEM.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Dimensões Limite e Efetiva de Separação das Partículas Mineraias

A fração grossa, resultante do processo de classificação em cada hidrociclone, é armazenada em câmaras de amostra (CA), situadas logo acima do *apex* dos hidrociclones (Figura 2). A fração fina é descarregada pelo vórtice do hidrociclone, que alimenta o seguinte e, assim, sucessivamente.

A fim de entender a classificação granulométrica em um cicloclassificador e compreender melhor os efeitos das variáveis operacionais do equipamento, aconselha-se a leitura do Capítulo 7 deste livro ou ainda: Wills, 1988; Mullar, 1980; Kelly, 1982, dentre outros.

Mesmo assim, alguns tópicos básicos são descritos a seguir. O hidrociclone consiste numa seção cilíndrica curta, na qual é feita a alimentação da suspensão por uma abertura tangencial, que é continuada por uma seção cônica. Na seção cilíndrica (câmara de entrada), encontra-se um tubo que sobressai do corpo, chamado *vortex* e na parte terminal da seção cônica existe uma abertura circular, chamada *apex*. Para fazer a classificação, uma suspensão de partículas sólidas num líquido é introduzida sob pressão através da abertura de alimentação.

A entrada tangencial e a forma cilíndrica submetem as partículas mineraias a uma aceleração centrífuga. Essa aceleração faz com que as partículas de maior diâmetro atinjam a parede externa mais rapidamente, em função do movimento helicoidal ascendente, descarregando as partículas grossas pela abertura do *apex*. O líquido remanescente com as partículas mais finas será descarregado pela saída do *vortex*, segundo as espirais descendentes na parte interna do hidrociclone.

Desse modo, existe, para cada hidrociclone, uma **dimensão limite de separação**, ou melhor, um diâmetro de separação, como se fosse a abertura de uma peneira, método aplicado às operações de peneiramento.

A dimensão limite de separação de partículas de um sistema de hidrociclone é a dimensão da menor partícula que o sistema retém após um número infinito de reciclagens do material retido na câmara de amostra.

Nos primeiros ciclos de operação, há uma eliminação preferencial das partículas mais finas e, à medida que o número de ciclos aumenta (tempos mais longos de elutriação), as dimensões retidas são aquelas mais próximas às dimensões limite de separação. Assim, desde que se ultrapasse um certo número de ciclos, a classificação poderá ser considerada efetiva, sendo a dimensão de separação denominada, neste caso, de **dimensão efetiva** de separação das partículas. A **dimensão efetiva** tende à **dimensão limite** de separação de partículas, quando o número de reciclagens tende ao infinito.

O funcionamento do cicloclassificador é simples e o equipamento pode ser aplicado nas operações de classificação de partículas finas, desde que:

- (i) a geometria do hidrociclone seja projetada, de forma a dar a **dimensão limite** de separação dentro de uma faixa útil;
- (ii) o hidrociclone seja projetado, de modo a prover uma reciclagem contínua do material descarregado pelo *apex*;
- (iii) a relação entre as **dimensões limite** e **efetiva** de separação de partículas possa ser expressa em termos de ciclos ou do tempo de reciclagem sob condições operacionais constantes;
- (iv) a água seja usada como meio líquido.

No cicloclassificador, as condições para reciclagem contínua dos sólidos da descarga do *apex* são conseguidas pela forma da montagem dos hidrociclones (com o *apex* verticalmente para cima) em série, com as câmaras fechadas deste dispositivo, que conferem à unidade a capacidade de conter os sólidos. Durante o teste, a fração mais grossa é recolhida no hidrociclone número 1 e a fração mais fina é recolhida no hidrociclone número 5.

Os procedimentos (operacional, de correção e de cálculo) que serão discutidos neste Capítulo foram obtidos com base no manual do equipamento da CIMAQ (Cicloclassificador, s.d.), com adaptações e melhorias de gráficos, figuras e algumas instruções.

3. VARIÁVEIS OPERACIONAIS E FATORES DE CORREÇÃO

Vazão, temperatura de água, massa específica das partículas e tempo de elutriação (decantação) são as variáveis mais importantes do processo de classificação por cicloclassificador. O controle destas variáveis determina as dimensões efetivas de separação das partículas dos cinco hidrociclones.

Na prática, o sistema trabalha de modo a proporcionar uma classificação dentro de uma faixa granulométrica predeterminada, sempre de acordo com a combinação das variáveis nas granulometrias especificadas. As dimensões da separação para outros conjuntos de valores poderão ser facilmente calculadas, desde que seja conhecida a dimensão efetiva da separação dos hidrociclones para um dado conjunto de valores das variáveis.

O cicloclassificador é fabricado de forma a ter as dimensões limites de separação iguais àsquelas ilustradas na Tabela 1, para variáveis operacionais com os valores padrão.

Tabela 1 – Dimensões limite de separação dos hidrociclones nas condições padrão.

Hidrociclone Nº	DL (μm)	Hidrociclone Nº	DL (μm)
01	44	04	15
02	33	05	11
03	23	DL – Dimensão Limite	

Os valores padrão das variáveis são:

- (i) vazão da água igual a 696 L/h;
- (ii) temperatura da água igual a 20°C;
- (iii) massa específica das partículas igual a 2,65 g/cm³;
- (iv) tempo de elutriação equivalente ao infinito.

A correção das variáveis é feita por meio de gráficos dos quais se obtém um fator de correção para cada variável, dentro da faixa operacional especificada. Para cada hidrociclone, a relação entre as dimensões limite e a efetiva de separação das partículas será dada pela Equação [1].

$$d_e = d_1 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad [1]$$

onde:

d_e dimensão efetiva de separação das partículas do hidrociclone;

d_1 dimensão limite de separação das partículas do mesmo hidrociclone;

f_1 , f_2 , f_3 e f_4 são os fatores de correção para a temperatura, massa específica, vazão e tempo de elutriação, respectivamente.

Temperatura da Água

O fator de correção da temperatura é, basicamente, o mesmo da viscosidade (μ), que considera a viscosidade da água dentro da faixa de temperaturas operacionais do cicloclassificador. Conhecendo-se a dimensão efetiva ou o limite de separação (d_1) para um dado valor de temperatura, o valor correspondente à outra temperatura (d_2) pode ser calculado, segundo a lei de Stokes, pela Equação [2].

$$d_2 = d_1 \cdot \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad [2]$$

Assim: $d_2 = d_1 \cdot f_1$

onde:

- (i) o índice 1 corresponde aos valores padrão (temperatura de 20°C);
- (ii) o índice 2 corresponde aos valores na outra temperatura;
- (iii) f_1 é o fator de correção da temperatura.

O gráfico da Figura 3 expressa o fator de correção f_1 , em função da temperatura da água. Para obtê-lo, marca-se no eixo das abscissas o valor de temperatura, em seguida, verifica-se o valor correspondente de f_1 no eixo das ordenadas, conforme ilustrado na Figura 3.

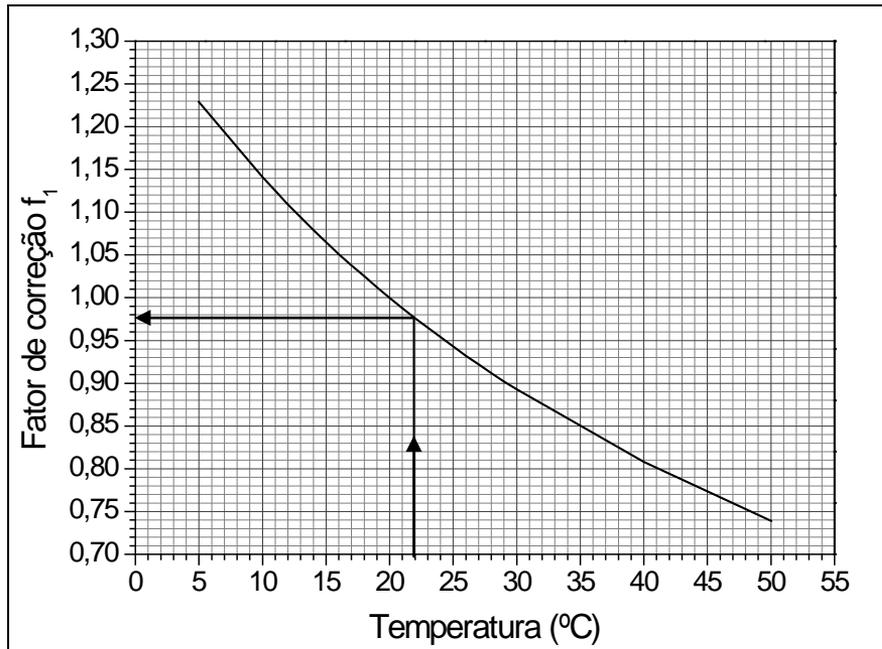


Figura 3 – Representação gráfica do fator de correção f_1 em função da temperatura.

Massa Específica da Partícula

O efeito das variações da massa específica da partícula segue, de forma semelhante, ao estabelecido na Lei de Stokes. Neste caso, as dimensões de separação das partículas são facilmente obtidas, considerando-se que a massa específica da partícula é diferente do valor padrão mencionado. O cálculo da dimensão efetiva d_2 pode ser obtido pela Equação [3].

$$d_2 = d_1 \cdot \left(\frac{\rho_1 - 1}{\rho_2 - 1} \right)^{1/2} = d_1 \cdot f_2 \quad [3]$$

onde:

d_1 dimensão limite da partícula;

ρ_1 massa específica da partícula na condição padrão, ou seja, 2,65 g/cm³.

f_2 fator de correção da massa específica da partícula, obtido com auxílio do gráfico da Figura 4.

O gráfico da Figura 4 expressa o fator de correção f_2 em função da massa específica das partículas em uma dada faixa de valores.

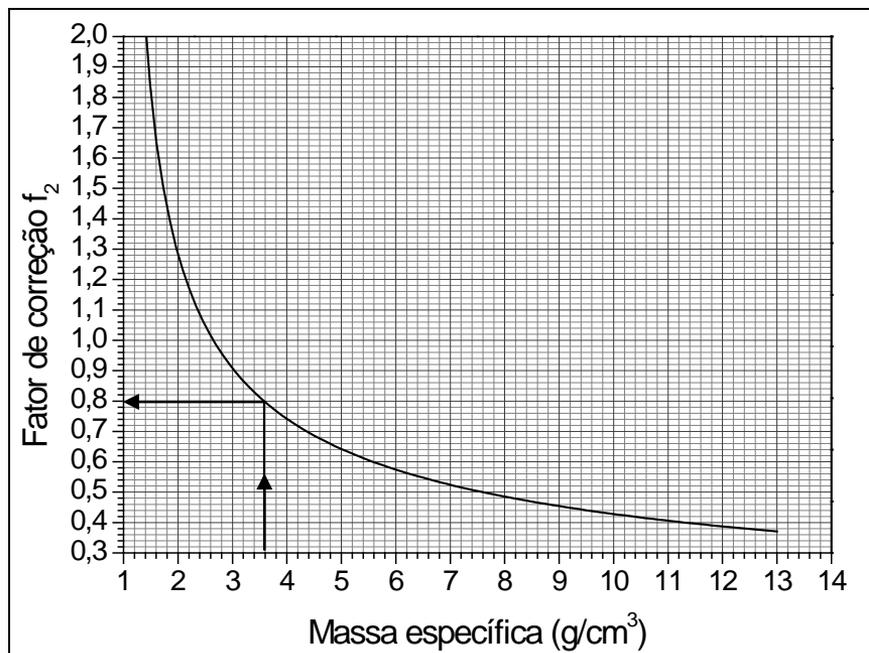


Figura 4 – Representação gráfica do fator de correção f_2 em função da massa específica.

Vazão da Água

A relação entre a vazão de água utilizada na elutriação e a dimensão limite de separação das partículas do hidrociclone é dada por Kelsall e McAdam (1963).

$$d_i = k \cdot (\text{vazão})^{-1/2} \quad [4]$$

onde: k é uma constante.

Com a Equação [4], para duas vazões diferentes, a razão entre as dimensões limite será calculada pela expressão da Equação [5].

$$d_2 = d_1 \cdot \left(\frac{\text{vazão 1}}{\text{vazão 2}} \right)^{1/2} = d_1 \cdot f_3 \quad [5]$$

Sendo d_1 e vazão 1 os valores na condição padrão, vazão 2 é a vazão na condição do teste e f_3 é o fator de correção da vazão.

O gráfico da Figura 5 expressa o fator de correção f_3 em função da vazão na faixa de 450 – 900 L/h.

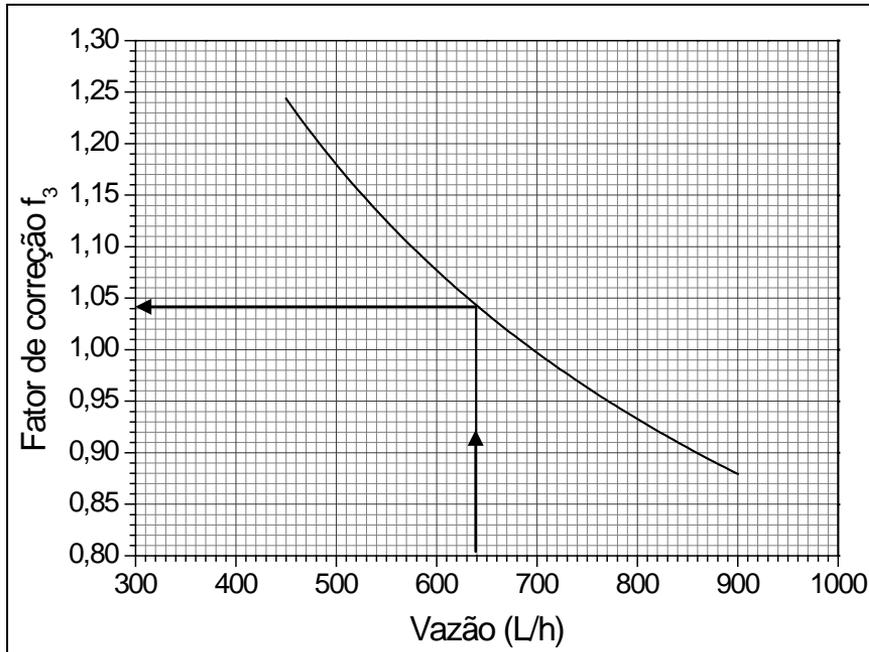


Figura 5 – Representação gráfica do fator de correção f_3 em função da vazão de água.

O efeito do aumento da vazão de operação acarreta uma diminuição da dimensão limite de separação das partículas do hidrociclone. É importante manter constante a vazão, dentro dos limites operacionais de medição do rotâmetro, durante o período ajustado para a elutrição. É importante que o valor da vazão não seja menor que o especificado, pois isso faria com que as partículas mais grossas acompanhassem o fluxo para o hidrociclone subsequente, até serem rejeitadas pelo sistema.

Embora as instruções operacionais sejam baseadas numa vazão padrão, não há motivos para desprezar o uso de outras vazões, desde que os fatores de correção adequados a essas vazões sejam usados para determinar a dimensão efetiva de separação dos hidrociclones. De fato, se houver eventual necessidade de se testar a distribuição com outras dimensões de separação, pode-se usar diversas vazões ainda na faixa de 480 a 900 L/h.

Tempo de Elutriação

O fator de correção do tempo, que deverá ser aplicado à dimensão limite para obter o valor da dimensão efetiva de separação, é determinado por meio de um processo de calibração. Na maioria dos hidrociclones, cada intervalo de tempo fixado para a elutriação, está associado a uma razão constante entre as dimensões limite e efetiva de separação. Assim, para um período de tempo t , tem-se:

$$f_4 = \frac{d_t}{d_i} \quad [6]$$

f_4 é o fator de correção do tempo de elutriação, obtido com auxílio do gráfico da Figura 6.

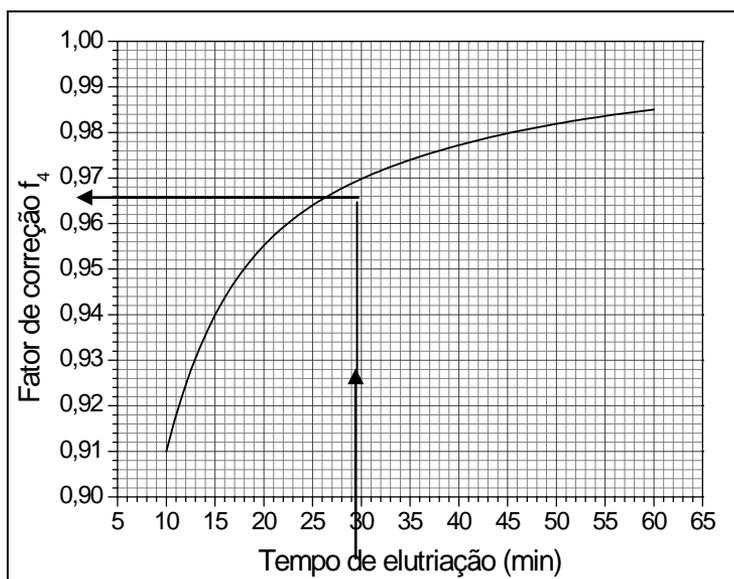


Figura 6 – Representação gráfica do fator de correção f_4 em função do tempo de elutriação.

4. CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Enquanto as características de classificação do cicloclassificador obedecem à Lei de Stokes, com um elevado índice de reprodutibilidade, não há um método direto para calcular as dimensões limite ou efetiva dos hidrociclones. Portanto, o conjunto precisa ser calibrado por meio de amostra padrão possuindo uma distribuição granulométrica conhecida. Para isso, determinam-se as dimensões limite de separação para os hidrociclones, com valores conhecidos da vazão, massa específica das partículas e temperatura. Na etapa seguinte corrige-se, novamente, de forma a obter as condições padrão, por meio da aplicação dos fatores de correção.

Ensaio repetidos com um cicloclassificador calibrado mostraram que as determinações da distribuição dos materiais dos quais mais de 50% são retidos nos cinco hidrociclones, cuidadosamente amostrados, podem ser duplicados de forma que a percentagem retida em cada hidrociclone terá uma precisão entre 1 e 2%, com uma segurança estatística de 95%. Na maioria dos casos isso corresponde a uma imprecisão em torno de 1 μm .

Na Tabela 2 constam os valores das dimensões limite, para os cinco hidrociclones do cicloclassificador CIMAQ CL-501-005 (existente no CETEM), calibrado nas condições padrão, utilizando padrão de quartzo abaixo de 74 μm da série *Tyler*.

Tabela 2 – Dimensões limite de separação para o cicloclassificador CIMAQ CL-501-005, nas condições padrão.

Hidrociclone Nº	DL (μm)	Hidrociclone Nº	DL (μm)
01	52,1	04	18,9
02	39,1	05	13,5
03	28,6	DL – Dimensão Limite	

5. INSTRUÇÕES PARA INÍCIO DE FUNCIONAMENTO

Antes de iniciar qualquer análise granulométrica, o operador deve ligar o equipamento somente com água, para verificar se não há vazamento e familiarizar-se com as técnicas de controle do mesmo. Para tanto recomenda-se:

- (i) remover o recipiente de amostras e lubrificar as vedações de gaxetas umedecendo-as com uma solução de sabão diluído;
- (ii) ajustar o recipiente de amostras em seu respectivo suporte no cicloclassificador, certificando-se de que ele está firmemente preso na devida posição, girando-o 90°, de modo que um dos lados de vidro fique voltado para o operador;
- (iii) ligar o suprimento de água para encher o reservatório, Figura 2;
- (iv) fechar todas as válvulas do *apex* e também a válvula de controle e ligar a bomba, isto é, mover a chave para a posição I, ligada;
- (v) abrir lentamente a válvula de controle, de modo que o fluxo de água passe através dos hidrociclones, examinando se o funcionamento é satisfatório;
- (vi) verificar se há vazamentos nos cones ou nas câmaras dos *apex*, eliminando-os por meio de aperto do anel de cada hidrociclone com chave apropriada para essa manobra;
- (vii) ligar e desligar a bomba várias vezes, a fim de expulsar todo o ar porventura existente na carcaça da bomba.

Observações:

Deve-se proceder à última recomendação, quando o cicloclassificador é usado pela primeira vez, ou no início da primeira operação após a drenagem da água do reservatório. O operador percebe a existência de ar, quando comprova o registro de pressões inferiores a 40 lb/pol² no manômetro. Finalmente, recomenda-se nunca operar a bomba a seco.

6. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

A quantidade de amostra utilizada nos ensaios por cicloclassificador é muito pequena e deve ser representativa de um universo milhões de vezes maiores.

O índice de reprodutibilidade de qualquer equipamento, projetado para determinar a distribuição granulométrica de uma amostra, depende da metodologia de preparação da amostra original, com a finalidade de obter a amostra final para o teste.

Por essas e outras razões, a amostra utilizada na análise deverá sempre ter as mesmas características e não valores ajustados para o ensaio, por exemplo, o seu peso. Isso ressalta mais ainda o cuidado emprestado à preparação dessas amostras, assegurando a confiabilidade e consistência aos resultados oriundos dos ensaios. Portanto, aconselha-se a leitura do Capítulo 1 deste livro, muito embora, alguns desses aspectos sejam resumidos a seguir.

Para uma análise granulométrica usando o cicloclassificador, o total de subdivisões necessárias depende da distribuição granulométrica da amostra. O peso da amostra para análise a ser usada no ensaio deverá ser tal, que, em cada hidrociclone, não sejam coletadas mais que 15 gramas dos sólidos. Para determinar com precisão o peso de uma amostra para o ensaio, inicia-se com uma classificação preliminar, usando cerca de 20 g de amostra. Com os resultados obtidos, calcula-se o peso máximo da amostra para a análise planejada.

Na prática de análises granulométricas, é comum utilizar amostras originais, tanto secas quanto úmidas. Estas amostras são quarteadas e, em seguida, determina-se, em duplicata, o valor da umidade, conforme descrito no Capítulo 2. A secagem de amostras de minérios finos provoca dificuldades ao processo de classificação, em decorrência dos aglomerados resultantes da secagem, mascarando os resultados de forma significativa. Ademais, esses produtos são difíceis, quando não impossíveis, de serem redispersados para retornarem a sua granulometria original. Isso enfatiza a recomendação de nunca realizar o ensaio de classificação com amostras de minérios finos, secadas em estufas ou outro equipamento.

As técnicas para quarteamento de amostras em polpa estão descritas com detalhes no Capítulo 1 deste livro. O uso cuidadoso das técnicas garante ao pesquisador e operador confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados.

Antes do início do ensaio de classificação de uma dada amostra deve-se proceder à remoção da fração grossa contida na mesma. Essa etapa é feita por peneiramento em laboratório, e a fração acima de 37 μm é removida. O operador deve, também, determinar a massa específica da amostra (fração abaixo de 37 μm), utilizando a metodologia descrita no Capítulo 2 deste livro.

Após a obtenção da amostra final para o teste, no caso de amostra seca, segue-se a segunda etapa de preparação: a formação da polpa com elevada percentagem de sólidos. A técnica consiste em adicionar cerca de 50 a 150 mL de água e a amostra em um béquer de 250 mL. Um agitador de laboratório é o equipamento adequado para preparar a polpa, desde que a agitação não provoque nenhum tipo de desagregação das partículas minerais da amostra.

Agentes dispersantes não são necessários, devido às forças tangenciais cortantes dentro dos hidrociclones, que previnem a formação de flocos e de aglomerações de material.

Amostras úmidas, em forma de torta filtrada são transformadas em polpas com elevada percentagem de sólidos, por meio da mesma técnica utilizada na preparação de polpa com amostras secas. Na preparação de amostras úmidas adiciona-se menor quantidade de água, comparada àquela usada na preparação de amostra seca.

7. PROCEDIMENTO DO ENSAIO NO CICLOCLASSIFICADOR

Após a preparação da amostra, de forma cuidadosa e sistemática, seleciona-se a vazão adequada à elutriação e, então, procede-se à rotina de análise a seguir.

- (i) Retirar o recipiente de amostras do seu suporte, girando-o até que um dos lados de metal fique voltado para o operador. Puxe-o diretamente para cima. Este procedimento deve ser feito vagarosamente e com a bomba desligada.

- (ii) Abrir completamente a válvula do recipiente para esvaziar toda a água do mesmo.
- (iii) Verter a amostra para análise no recipiente. Com auxílio de uma pisseta, lavar o resto dos sólidos do béquer, fazendo-o verter no recipiente. Ao completar este procedimento, a amostra deverá estar totalmente isolada dentro do recipiente de amostra, além da perfeita remoção do ar existente no interior do mesmo.
- (iv) Completar o recipiente para amostras com água limpa até o nível atingir a meia altura da fita externa e, a seguir, mover o volante da válvula até fechá-la. Em seguida, retornar o recipiente ao seu suporte.
- (v) É imprescindível, antes de continuar o teste, que o operador certifique-se de que o recipiente para amostras está corretamente ajustado no suporte e que o lado do vidro está voltado para o operador.
- (vi) Ligar o fornecimento de água e esperar que o tanque, de altura manométrica constante, fique cheio e a válvula da bóia interrompa o suprimento de água.
- (vii) Ajustar o temporizador para 5 min (intervalo fixo por ser um teste de funcionamento do ciclclassificador).
- (viii) Assegurar-se de que a válvula de controle está fechada e ligar a bomba, acionando a chave do painel de controle para a posição "I". Nesta posição o temporizador não é acionado.
- (ix) Abrir lentamente a válvula de controle, permitindo a saída do ar da tubulação, até que a vazão fique acima da vazão desejada à elutriação.
- (x) Drenar o ar dos hidrociclones, abrindo as válvulas do *apex*, uma de cada vez, começando pelo primeiro hidrociclone. O ar residual do hidrociclone 3 é de difícil remoção. Uma alternativa para o escoamento deste ar consiste em abrir as válvulas do *apex* e de controle, deixar o ar remanescente acumular-se na câmara

do *ápex*. Em seguida abrir totalmente as duas válvulas para que o ar seja expulso. Uma vez que a saída do *vortex* do hidrociclone nº 5 se abre para a atmosfera, não será possível retirar a coluna central de ar.

- (xi) Com o valor da vazão acima daquele desejado à de elutriação, acionar a chave do painel de controle para a posição “II” (nesta, posição começa a funcionar o temporizador) e abrir, lentamente, a válvula do recipiente de amostra, cerca de um quarto de volta, nos primeiros 2 min.
- (xii) Ajustar o temporizador para o tempo de decantação desejado.
- (xiii) Quando o alarme soar, acionar a chave do painel de controle da posição “II” para a posição “I”. Com esta manobra, o alarme pára de soar e o ponteiro volta à posição limitada pelo ponteiro maior, já ajustado para o tempo desejado.
- (xiv) Fechar a válvula de controle até que o medidor de vazão indique a vazão de elutriação desejada.
- (xv) Acionar o temporizador, movendo a chave novamente para a posição “II”.
- (xvi) Quando o alarme soar (final do tempo de elutriação), o operador deve cancelar o sinal de aviso, retornando a chave do painel de controle à posição “I”. Em seguida, abrir a válvula de controle de vazão, de modo que a mesma fique acima da vazão de elutriação.
- (xvii) Descarregar, separadamente, os sólidos da sua câmara de cada hidrociclone em um béquer de 1.000 mL, iniciando-se pelo hidrociclone nº 5. Para tanto, o operador deve puxar o tubo de plástico que faz a conexão de drenagem e abrir a válvula do *ápex*.
- (xviii) Fechar a válvula de descarga do hidrociclone nº 5 e efetuar essa mesma manobra no hidrociclone 4 e, assim, sucessivamente, até completar a descarga dos sólidos de todos os hidrociclones.

Anotar a temperatura da água.

- (xix) Deixar os béqueres, devidamente identificados com etiquetas, em repouso por no mínimo de 20 min para decantar a água em excesso. Neste intervalo, o operador deve proceder à limpeza de todo o cicloclassificador, remover a água do reservatório, em resumo, deixar o sistema nas condições operacionais para o próximo teste.
- (xx) Proceder à filtragem, seguida de secagem, das frações coletadas, que serão pesadas e, também, serão utilizadas para análises químicas, entre outros. Para secagem das amostras, o operador pode, também, utilizar recipientes de evaporação.
- (xxi) Calcular a percentagem de material descarregado pelo hidrociclone nº 5, subtraindo do peso inicial o correspondente à soma dos pesos das frações.

Observações:

- (i) No caso de análises rotineiras, poderá ser vantajoso usar dois recipientes de amostras.
- (ii) A amostra de sólidos finos descarregada pelo último hidrociclone poderá ser recuperada. Para isso, recomenda-se sempre coletar a água de drenagem do último hidrociclone, com auxílio de tambores de plásticos. Sabe-se que de 80 a 90% do material fino é recuperado desta água durante os primeiros 10 min após a abertura do recipiente de amostras.

8. CUIDADOS E MANUTENÇÃO

Reservatório de Água

Durante o funcionamento da bomba, poderá ocorrer acúmulo de sedimentos no reservatório de água. Recomenda-se inspecioná-lo em intervalos regulares de tempo e proceder à limpeza, se necessária. Um registro de drenagem está situado na parte inferior traseira do equipamento para essa finalidade.

O operador não deve operar a bomba a seco. Ela poderá operar por períodos de até 5 min com a válvula de controle fechada, sem que ocorram danos à bomba. Entretanto, por períodos mais longos, poderá haver aquecimento da água na carcaça da bomba, danificando a vedação.

Rotâmetro e Manômetro

O operador deve observar que a posição correta de leitura do rotâmetro é acima do corpo da bóia.

O manômetro, sempre ligado na tubulação de água após o rotâmetro, indicará um valor da pressão em torno de 40 lb/pol², quando a bomba estiver funcionando. A função principal do manômetro é informar ao operador o valor máximo de pressão da bomba, isto é, a pressão operacional.

Se o manômetro exibe flutuações elevadas na pressão da água ou indica uma pressão inferior a 38 lb/pol², o operador deve:

- (i) ligar e desligar a bomba diversas vezes seguida, para eliminar o ar, ocasionalmente, preso na carcaça da bomba;
- (ii) verificar se a pressão da linha de suprimento de água é suficiente para manter o nível operacional (máximo) da água no reservatório.

Válvulas e Recipiente de Amostras dos Hidrociclones

Tanto quanto possível, os conjuntos dos hidrociclones deverão ser deixados intactos, mas, se ocorrer vazamentos, as diversas vedações deverão ser examinadas. Para tanto, remove-se cada hidrociclone desatarraxando o anel de aperto no seu topo, usando a chave adequada. Na repetição dessa montagem, será preciso tomar cuidado para que todas as vedações estejam no seu lugar e alinhadas.

Certifique-se também de que todas as partes de vidro estão devidamente assentadas nos encaixes torneados para essa finalidade. Evite apertos excessivos no anel de vedação, pois isso desalinha o suporte e impede a vedação do sistema. Se houver necessidade de desmontar qualquer hidrociclone, o operador deverá realizar nova calibração do cicloclassificador, usando amostras padrão.

9. CÁLCULOS

Após remoção, secagem e pesagem das amostras dos cinco hidrociclones, procede-se ao cálculo da dimensão efetiva de separação das partículas, nas condições da análise. Nesta etapa utilizam-se os fatores de correção das quatro variáveis, multiplicando-os pela dimensão limite de separação de cada hidrociclone. Esse cálculo é feito com auxílio da Equação [7].

$$d_e = d_i \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4 \quad [7]$$

onde:

- d_e dimensão efetiva de separação das partículas;
- d_i dimensão limite de separação do hidrociclone;
- f_1 fator de correção da temperatura ajustada a da análise;
- f_2 fator de correção da massa específica da partícula;
- f_3 fator de correção da vazão real de água para o ensaio;
- f_4 fator de correção do tempo real utilizado.

Para fins práticos, é conveniente determinar, em primeiro lugar, um fator geral de correção, multiplicando os quatro fatores separados, e usar esse fator geral para a correção da dimensão limite de separação das partículas.

Quando a amostra consiste de uma mistura de partículas com diferentes massas específicas, caso dos minérios, é conveniente registrar os resultados como percentagem de material que passa por cada hidrociclone. Assim, consideram-se as dimensões efetivas de separação aquelas correspondentes à massa específica do quartzo.

Exemplo de Procedimento de Cálculo

Supondo-se uma operação nas condições **padrão**, os hidrociclones são capazes de classificar com as dimensões limite ilustradas na Tabela 1.

Considere uma análise granulométrica de um determinado mineral, nas seguintes condições: vazão da água de 696 L/h; temperatura da água de 17°C; massa específica das partículas de 3,17 g/cm³ e tempo de elutriação de 30 min.

De acordo com os dados obtidos por meio dos gráficos, os fatores de correção serão os seguintes:

- (i) para a temperatura $f_1 = 1,04$.
- (ii) para a massa específica da partícula $f_2 = 0,88$.
- (iii) para a vazão $f_3 = 1,00$.
- (iv) para o intervalo de tempo do ensaio $f_4 = 0,97$.

Desse modo, o fator geral de correção será $1,04 \times 0,88 \times 1,00 \times 0,97 = 0,89$.

Portanto, as dimensões efetivas de separação estão ilustradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensões efetivas de separação para o cicloclassificador CIMAQ CI-501 na condição de análise do exemplo anterior.

Hidrociclone Nº	DE (μm)	Hidrociclone Nº	DE (μm)
01	$44 \times 0,89 = 39$	04	$15 \times 0,89 = 13$
02	$33 \times 0,89 = 29$	05	$11 \times 0,89 = 10$
03	$23 \times 0,89 = 20$	DE – Dimensão Efetiva	

No caso de uma melhor precisão, podem-se usar os dados indicados no certificado de calibração do cicloclassificador (Tabela 2). Esse procedimento está ilustrado na Tabela 4, na qual os cálculos (coluna A) foram efetuados com base nos dados de calibração.

Há a possibilidade de determinar também qual o valor de uma variável operacional necessária para obter uma dada dimensão efetiva de separação num dos hidrociclones.

Exemplo: Nas condições padrão mencionadas no exemplo anterior, determinar a vazão com a qual o hidrociclone nº 1 irá fazer a classificação com dimensão efetiva de $44 \mu\text{m}$, para partículas de massa específica igual a $2,65 \text{ g/cm}^3$, com temperatura da água de 14°C e com tempo de elutriação de 20 min.

Neste caso, a equação básica (Equação 7) é usada novamente, bem como os fatores de correção obtidos nos respectivos gráficos, para a massa específica

da partícula, temperatura e tempo de elutriação, desde que as dimensões limite e efetiva de separação para esse caso sejam conhecidas.

Assim, de acordo coma Equação [7]:

$$d_e = d_i \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4, \text{ isto é, } 50 = 44 \cdot 1,075 \cdot 1,00 \cdot f_3 \cdot 0,95$$

$$f_3 = 1,11.$$

De acordo com o gráfico de correção da vazão, verifica-se que esse fator corresponde a uma vazão de 560 L/h. Os demais hidrociclones terão a mesma razão (d_e/d_i) que o hidrociclone 1.

O último procedimento convém à aplicação em classificações de rotina, quando muitas vezes se quer operar em condições hidrodinâmicas equivalentes e estabelecer um procedimento padrão, tal que, em todas as análises as frações do cicloclassificador tenham a mesma velocidade de sedimentação de Stokes.

Cabe ressaltar que há uma faixa coincidente, de 37 μm a aproximadamente 50 μm , na classificação granulométrica obtida por meio de cicloclassificador e por peneiras, sendo que, para tamanhos superiores a 37 μm , utiliza-se amplamente a operação de peneiramento para este fim.

Os ensaios de classificação granulométrica por peneiramento em laboratório são feitos até a malha 37 μm . Abaixo desta granulometria a eficiência do peneiramento é baixa e, então, o equipamento adequado para este fim é o cicloclassificador. Entretanto, na classificação por esse equipamento, na faixa granulométrica abaixo de 37 μm , pode não haver decantação nos hidrociclones 1 e 2. Cabe lembrar que o projeto do cicloclassificador baseou-se numa granulometria da amostra abaixo de 50 μm .

Tabela 4 – Registro dos dados e subseqüentes cálculos da análise granulométrica por cicloclassificador (coluna A: exemplo de cálculo).

Amostra	A	B	C	D	E
Peso da amostra inicial (g)	24,7				
Temperatura (°C)	29				
Massa específica (g/cm ³)	2,65				
Vazão (L/h)	696				
Tempo de elutriação (min)	15				
Fator de correção 1	0,90				
Fator de correção 2	1,00				
Fator de correção 3	1,00				
Fator de correção 4	0,94				
Peso da amostra nº 1	13,8				
Peso da amostra nº 2	3,0				
Peso da amostra nº 3	2,2				
Peso da amostra nº 4	2,0				
Peso da amostra nº 5	0,9				
% retida – hidrociclone nº 1	55,9				
% retida – hidrociclone nº 2	12,1				
% retida – hidrociclone nº 3	8,9				
% retida – hidrociclone nº 4	8,1				
% retida – hidrociclone nº 5	3,6				
% passada - hidrociclone nº1	44,1				
% passada - hidrociclone nº2	32,0				
% passada - hidrociclone nº3	23,1				
% passada - hidrociclone nº4	15,0				
% passada - hidrociclone nº5	11,4				
Fator de correção geral	0,846				
d _e - hidrociclone nº1 (µm)	44,1				
d _e - hidrociclone nº2 (µm)	33,1				
d _e - hidrociclone nº3 (µm)	24,2				
d _e - hidrociclone nº4 (µm)	16,0				
d _e - hidrociclone nº5 (µm)	11,4				

As colunas sombreadas em cinza são para preenchimento do operador

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

British Standard 3406-1, Methods for determination of particle size distribution. Guide to powder sampling, 1986, 24p.

Cicloclassificador, Manual do equipamento, Cimaq, [s.d.].

Kelly, E. G.; Spottiswood, D. J. Introduction to mineral processing. New York: John Wiley & Sons, 1982, p.199-236.

Kersall, D. F.; McAdam, J. C. H. Design and Operating Characteristics of a Hydraulic Cyclone Elutriator. Chemical Engineering Research and Design, v. 41a, 1963, p.84-95.

Mular, A. L.; Jull, N. J. The selection of cyclone classifiers, pumps and pump boxes for grinding circuit. In: Mular, A. e Baphpu, R. B. (Ed.). Mineral processing plant design. AIME, 1980, p.376-403.

Wills, B. A. Mineral Processing Technology. An Introduction of the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. (4ª Ed.) Pergamon Press. Oxford, 1988, 785p.