

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DAS PARTÍCULAS NO DESEMPENHO DE CICLONE – ESTUDO DE CASO

Finkie, R.L.¹, Delboni Jr., H.²

1 – Depto. de Engenharia de Minas e de Petróleo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes 2373 – Butantã – São Paulo, SP
rlfinkie@hotmail.com

2 – Depto. de Engenharia de Minas e de Petróleo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes 2373 – Butantã – São Paulo, SP
hdelboni@usp.com

O trabalho apresenta uma investigação sobre a influência da densidade de partículas de minério de ferro no desempenho de uma operação de ciclone. A partir de amostragem na alimentação de uma operação industrial de classificação em ciclones foram executados ensaios em laboratório para obtenção de amostras de *underflow* e *overflow*, que foram peneiradas e submetidas a procedimentos de contagem de grãos de diferentes graus de liberação e densidade. Para análises do processo foram calculadas as partições corrigidas para cada classe de densidades e as distribuições assimiladas à equação de Rosin-Rammler, da qual foram estimados os parâmetros diâmetro mediano de partição e inclinação. Constatou-se que tanto o diâmetro mediano de partição como a inclinação, diminuem de forma acentuada, com o aumento de densidade da partícula. Essa conclusão não coincide com outros trabalhos publicados. Com base nos resultados obtidos foi desenvolvido um modelo para previsão do diâmetro mediano de separação em função da densidade da partícula, que posteriormente foi comparado com os modelos de Bradley, Lynch e Plitt. Os índices obtidos para o modelo desenvolvido indicaram que o modelo desenvolvido é muito mais adequado ao caso estudado do que os demais investigados.

Palavras-chave: Ciclone, classificação, densidade

Área Temática: Tratamento de Minérios

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Em usinas de tratamento de minérios, a classificação é uma operação unitária fundamental no tratamento de minérios sendo empregada para: separação em faixas granulométricas distintas; proteção de equipamentos; eliminação de partículas muito finas deletérias, recuperação de água de processo, entre outras.

Os equipamentos utilizados na operação de classificação são denominados classificadores, e um dos mais importantes é o ciclone.

Em ciclones a classificação é determinada por um conjunto de variáveis geométricas e operacionais, bem como pelas características físicas dos minerais a serem separados.

Dentre as características físicas dos minerais que influenciam a classificação em ciclone, destaca-se a densidade. Assim, em função da densidade as partículas apresentarão comportamentos diferenciados em um mesmo sistema de classificação. Essa característica é particularmente importante em circuitos fechados de moagem, onde minerais úteis e de ganga apresentam diferenças acentuadas de densidade.

O objetivo principal do presente trabalho foi investigar a influência da densidade dos minerais de um minério de ferro no processo de classificação em ciclone, bem como confrontar os resultados obtidos com os principais modelos existentes e propor soluções de ajustes.

DESENVOLVIMENTO

A amostra do minério de ferro utilizada neste trabalho foi coletada na descarga do moinho primário da usina de beneficiamento da Samarco Mineração S.A., situada no município de Mariana, MG.

A amostra-cabeça foi disposta sobre uma lona para secar em temperatura ambiente. Após a secagem, o material foi homogeneizado em pilha alongada e quarteado em 12 alíquotas. Uma alíquota foi escolhida aleatoriamente para estudo de caracterização tecnológica do material (caracterização granulométrica, química e mineralógica). As demais alíquotas foram encaminhadas para secagem em estufa, a 80° C, por 12 horas. Após a secagem, foram submetidas a peneiramento a seco, na malha 0,5 mm. Em cada alíquota, a fração passante em 0,5 mm foi acondicionada em saco plástico.

O peneiramento da amostra cabeça, assim como demais descritos ao longo deste trabalho, foi realizado a úmido e as peneiras utilizadas têm as seguintes aberturas: 500, 297, 149, 105, 74, 53, 44 e 38 μm . Amostras de cada fração granulométrica foram submetidas à separação em líquido denso, nesse caso tetrabromoetano com densidade de 2,95 g/cm^3 , em um funil de separação e centrífuga.

Os produtos da separação em meio denso foram encaminhados para análise química. A etapa seguinte consistiu em determinar os minerais constituintes do minério. Para tanto, foram selecionados os produtos afundado e flutuado da fração -105+74 μm e encaminhados para separação magnética, em equipamento Frantz, modelo LB-1. A determinação da composição mineralógica foi efetuada por Difração de Raios-X (DRX) e, para interpretação dos resultados, foi usado o programa X-PART High Score. Na caracterização química, foi utilizado o método Fluorescência de Raios-X (FRX) para identificar os principais óxidos presentes nas amostras, a saber: Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , MnO_2 e PPC (perda por calcinação).

Para efeito de determinação de densidades de minerais individuais, o produto magnético da fração afundada e o produto não-magnético da fração flutuada foram encaminhados à análises mineralógicas e químicas. Uma alíquota representativa do minério, bem como as frações consideradas representativas dos minerais hematita e quartzo foram encaminhadas para determinação de densidade em picnômetro.

Para efeito de cálculo da densidade de grãos misto de quartzo e hematita foi adotada a média ponderada entre as espécies.

Para a execução dos ensaios de classificação foi montado um circuito no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP de forma a permitir operação contínua de um ciclone, que permitisse alterações de condições de operação, conferindo a flexibilidade desejada a um trabalho experimental. O conjunto era constituído de um tanque, uma bomba de polpa e ciclone, sendo dotado de recursos para amostragem do fluxo da alimentação, do fluxo UF e OF.

O ensaio foi realizado em circuito fechado, conforme mostra a Figura 1, no ciclone da marca Warmann, com diâmetro de 102 mm, área de entrada de 35 mm, diâmetro de orifícios de apex e vortex, respectivamente de 24 mm e 35 mm. A Pressão de operação foi mantida em 20 psi.

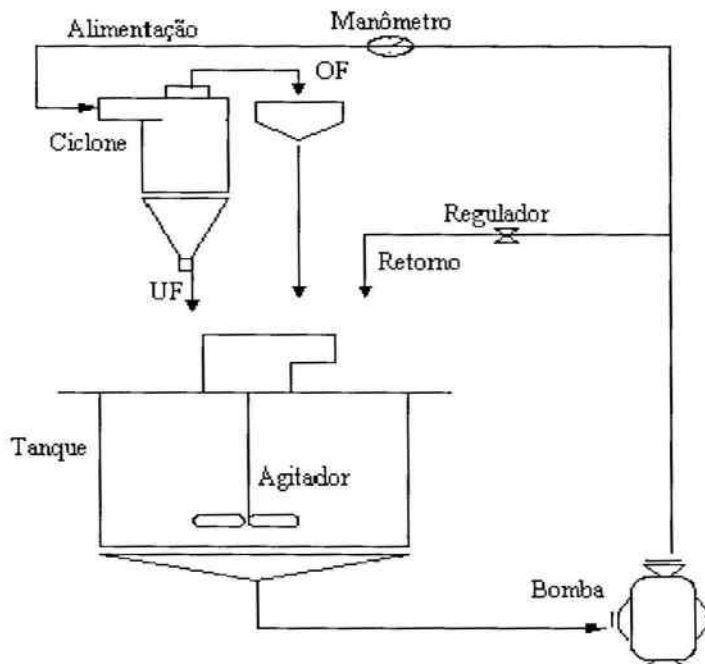


Figura 1- Circuito empregado no ensaio de ciclonagem.

As amostragens incluíram os fluxos de UF e OF, bem como da alimentação do ciclone no fluxo de retorno. Após o ensaio, as amostras foram pesadas e secadas em estufa para, posteriormente, serem calculadas as vazões e as percentagens de sólidos e determinadas as distribuições granulométricas.

Após o peneiramento, cada fração granulométrica de cada um dos três fluxos foi quarteada e uma alíquota encaminhada à preparação de lâminas para a quantificação de partículas por classe de liberação. Cada uma das 21 alíquotas (7 classes granulométricas para cada um dos 3 fluxos) foi então preparada com resina “Araldite”, posteriormente secadas em estufa para, na seqüência, serem submetidas a polimento em politriz, marca Logitech, com utilização de óxido de alumínio em meio aquoso, até as partículas de cada lâmina ficarem visíveis para a realização da contagem.

Para quantificar as partículas, optou-se pela microscopia óptica como técnica alternativa de mineralogia quantitativa. Para essa quantificação, foi usado um microscópio da marca Olympus – BX60M e um contador da marca Clay Adams. As partículas foram divididas em classes de liberação de hematita, a saber: 100% (hematita pura), 100-75%, 75-50%, 50-25%, 25-0% e 0% (quartzo puro).

Foram contados e classificados nessa etapa mais de 20.000 grãos.

Com base em um mínimo de 1000 grãos contados em cada alíquota foi determinado o volume equivalente de cada classe de partículas, dividindo-se o número de grãos de cada classe pelo número total de grãos do total da respectiva classe. Esse volume foi convertido em massa, utilizando-se a densidade da classe correspondente.

Os dados de vazão e porcentagem de sólidos, bem como nas distribuições granulométricas foram empregados para cálculo do balanço de massas da operação e, posteriormente calculada a partição de cada classe de liberação em cada fração granulométrica.

Para determinação da partição corrigida foi empregada uma expressão derivada do método de Kelsall porém, considerando-se o “by pass” como numericamente igual à partição na última malha analisada (38 µm). A expressão utilizada foi a seguinte:

$$Y_c = \frac{Y_r - Y_{rum}}{1 - Y_{rum}} \quad (1)$$

onde: Y_c = Partição corrigida; Y_{rum} = Partição real na última malha;

As partições corrigidas foram parametrizadas pela equação de Rosin-Rammler, conforme a equação abaixo:

$$Y_{ci} = 1 - e^{-\ln 2(d_i/d_{50c})^\alpha} \quad (2)$$

onde: Y_{ci} = partição corrigida por fração; α = parâmetro que caracteriza a qualidade de separação; d_{50c} = diâmetro mediano de partição corrigida

A literatura específica descreve vários métodos para cálculos do d_{50c} correspondente à cada classe de densidade de partículas. No presente trabalho foram analisados inicialmente os métodos propostos por Bradley(1965) e Plitt(1976), respectivamente:

$$d_{50c} = k \left[\frac{D_c^3 \mu}{Q_f (\rho_s - \rho_l)} \right]^n \quad (3)$$

$$d_{50c} = \frac{k_1 39,7 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} \mu_a^{0,5} e^{0,063 C_v}}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q_v^{0,45} \left(\rho_s - \frac{1}{1,6} \right)^n} \quad (4)$$

onde: Q_v =vazão volumétrica de polpa na alimentação (L/min); μ =viscosidade da polpa (cP); μ_a = viscosidade da água (cP); D_c , D_i , D_u , D_o respectivamente diâmetros do ciclone, do círculo com área equivalente à da entrada do ciclone, apex e vortex,.

De acordo com Napier-Munn et al. (1996), Lynch (1977) apresentou uma correção para relacionar o d_{50} com as densidades das partículas, baseando-se na equação Bradley:

Tabela 2- Distribuições granulométricas na alimentação, no UF e OF.

Abertura da Malha (μm)	% Retida simples		
	Alimentação	UF	OF
297	3,78	5,40	0
149	20,35	24,71	4,14
105	14,72	13,90	6,76
74	22,94	17,56	14,42
53	14,70	9,58	10,82
44	10,75	7,44	7,51
38	12,76	7,14	10,51
-38	12,76	14,26	45,85
Total	100	100	100

A recuperação de água no UF foi calculada em 36% e a concentração de sólidos na alimentação foi determinada em 65,1%.

Em função das dificuldades encontradas na contagem de grãos na fração $-38 \mu\text{m}$, decidiu-se excluir esta fração nos cálculos subseqüentes.

A Figura 2 apresenta as curvas de partição corrigidas para cada classe de partículas, conforme a parametrização pela equação Rosin-Rammler.

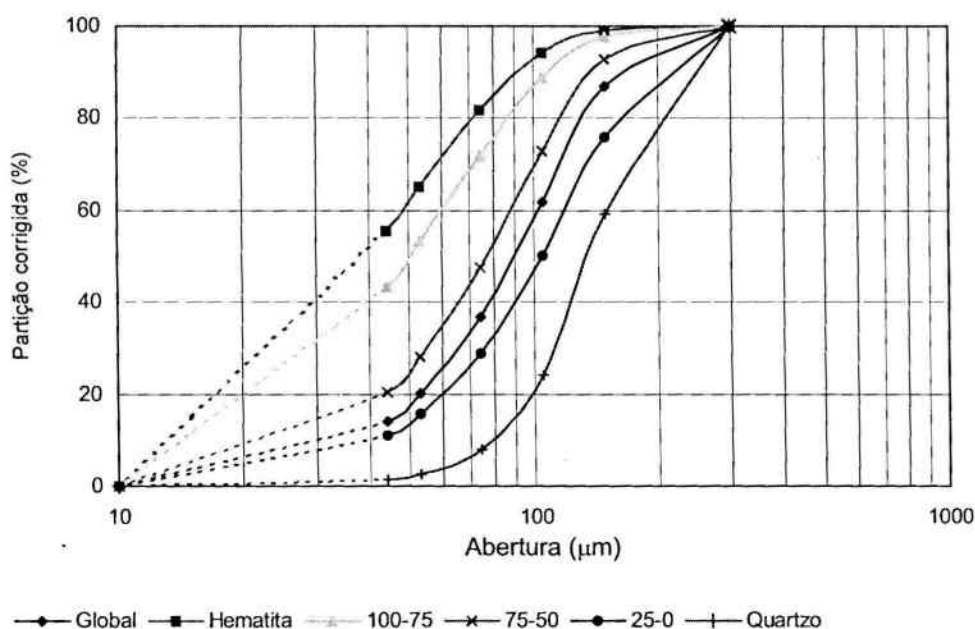


Figura 2 - Curvas de partição corrigidas conforme resultantes de regressão.

Na Figura 2 observa-se a diminuição de d_{50c} em função do aumento do conteúdo de hematita e, conseqüentemente, da densidade das classes de partículas.

Os valores dos parâmetros α e d_{50c} do ensaio global e de cada classe de partículas, calculados por meio de regressões da equação de Rosin-Rammler estão apresentados na Tabela 3.

$$\frac{(d_{50c})_a}{(d_{50c})_b} = \left[\frac{(\rho_s)_b - \rho_l}{(\rho_s)_a - \rho_l} \right]^{0,5} \quad (5)$$

onde:

a e b representam minerais com densidade $(\rho_s)_a$ e $(\rho_s)_b$, respectivamente. Os minerais relativamente mais densos apresentam, portanto, valores de d_{50c} menores que os minerais menos densos.

Na comparação descrita no presente trabalho vários parâmetros foram comuns aos três métodos, o que permitiu uma simplificação das equações (3), (4) e (5), conforme descritas pelas equações (6) e (7).

$$d_{50c} = \frac{k_B}{(\rho_s - \rho_l)^n} \quad (6)$$

$$d_{50c} = \frac{k_P}{\left(\frac{\rho_s - \rho_l}{1,6} \right)^n} \quad (7)$$

Assim a equação (6) representa tanto o modelo de Bradley como o de Lynch e a equação (7) a de Plitt. Os parâmetros k_B e k_P , respectivamente dos métodos de Bradley e Plitt, são assim constantes para o trabalho desenvolvido. Para efeito de cálculos dos valores de d_{50c} para cada classe de densidade, n foi considerado igual a 0,5.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados da determinação das densidades do minério, da hematita e do quartzo por picnômetro, e das classes de grãos mistos calculadas a partir das densidades da hematita e do quartzo.

Tabela 1- Densidades de grãos.

Material	Densidade (g/cm ³)
Minério	3,91
Hematita	4,83
Classe 100-75	4,56
Classe 75-50	4,02
Classe 50-25	3,48
Classe 25-0	2,94
Quartzo	2,67

Os resultados da análise qualitativa dos minerais presentes no minério indicaram a presença de hematita, goethita, magnetita e quartzo.

Os resultados da análise química mostraram a predominância de óxidos de ferro (62% de Fe₂O₃) e quartzo (34 de SiO₂). A amostra denominada “hematita” apresentou 97,4% de Fe₂O₃ e a amostra denominada “quartzo” (SiO₂) apresentou 97,6 % de sílica. Os outros óxidos presentes apresentam menos de 0,1% cada

A Tabela 2 apresenta as distribuições granulométricas na alimentação, no UF e OF.

Tabela 3 - Valores calculados de α e d_{50c}

Classe	Densidade (g/cm^3)	α	d_{50c} (μm)
Hematita	4,83	1,44	40
100-75	4,56	1,55	50
75-50	4,02	2,01	77
25-0	2,94	2,05	105
Quartzo	2,67	3,39	138
Global	3,91	2,13	90

A Tabela 3 indica que a inclinação da curva de partição, parâmetro α , apresentou valores crescentes com a diminuição das densidades. A classe hematita apresenta o menor valor de α e o quartzo o maior. A tendência observada contraria a afirmação de Weedon (1990) apud Napier-Munn et al. (1996) de que o parâmetro da inclinação da curva apresenta valores superiores para partículas mais densas.

A Figura 03 apresenta o gráfico dos valores de d_{50c} em função das densidades de cada classe.

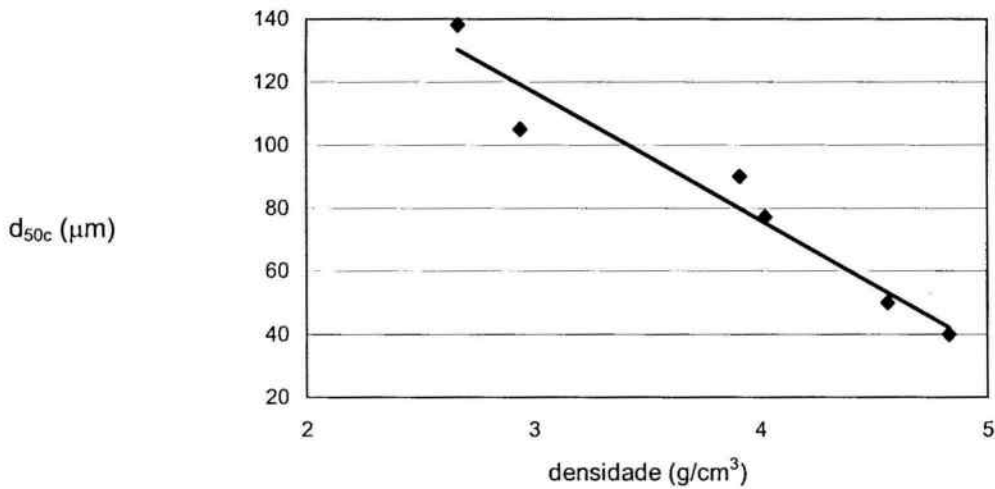


Figura 3- Relação entre a densidade e d_{50c}

Na Figura 3 observa-se que o aumento da densidade acompanha um decréscimo no d_{50c} . Para efeito da modelagem do fenômeno, foi traçada a reta de regressão, cuja equação é apresentada a seguir:

$$d_{50c} = 238,8 - 40,68\rho \quad (8)$$

O coeficiente de correlação da regressão foi calculado em 0,941 indicando assim, a qualidade razoável das estimativas de d_{50c} a partir da expressão acima. Portanto, a equação (9) representa a relação entre o d_{50c} e a densidade, conforme obtida para o minério da Samarco Mineração S.A.

Para efeito de comparação da expressão desenvolvida, foram calculadas as estimativas do d_{50c} em função da densidade, segundo os métodos de Bradley, Plitt e Lynch. A Tabela 4 apresenta os valores calculados. A coluna denominada Caso Base refere-se aos valores da Tabela 3.

Tabela 4 - Valores calculado de d_{50c}

Classe	ρ (g/cm ³)	d_{50c} (μ m)				
		Caso Base	Finkie	Bradley	Plitt	Lynch
Hematita	4,83	40	42	99	98	98
100-75	4,56	50	53	102	102	102
75-50	4,02	77	75	111	111	111
25-0	2,94	105	119	139	138	138
Quartzo	2,67	138	130	149	149	149
Global	3,91	90	80	113	113	113

Com base nos dados da Tabela 4 observa-se que os valores de d_{50c} obtidos dos diversos modelos mostram qualitativamente a mesma tendência, a saber, o d_{50c} cresce quando a densidade decresce. Ainda nesta tabela pode-se observar que os resultados obtidos baseados no modelo desenvolvido (equação 8), denominado Finkie, mostram valores próximos dos correspondentes ao Caso Base.

A soma dos quadrados dos desvios nos modelos de Bradley, Plitt e Lynch é igual a 9168, enquanto que para o modelo desenvolvido, o valor foi calculado em 389.

CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida neste trabalho permitiu avaliar a influência da densidade no desempenho do ciclone. A densidade das partículas desempenha um papel determinante no processo de classificação em ciclone, principalmente, no diâmetro mediano de partição d_{50c} e na inclinação da curva de partição α .

Os resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido neste trabalho mostram que tanto o d_{50c} quanto a inclinação da curva de partição aumentam com a diminuição da densidade das partículas.

Os resultados dos d_{50c} obtidos, utilizando-se o modelo desenvolvido neste trabalho, mostram qualitativamente a mesma tendência apresentada nos modelos de Bradley, Plitt e Lynch.

O modelo desenvolvido apresenta, para as condições estudadas, desvios muito menores do que os demais modelos utilizados para estimar d_{50c} em função da densidade.

AGRADECIMENTOS

Ao "Bureau van Onderwijs en Studie Faciliteiten" – Suriname, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e "Organization of American States"- OAS pelo apoio. À Samarco Mineração S.A. pelo fornecimento do minério para execução do trabalho e pelas análises químicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADLEY, D. **The hydrocyclone**. Oxford: Pergamon Press, 1965. Cap3, 328 p.
- LYNCH, A.J.; RAO, T.C. Modelling and scale-up of hydrocyclone classifiers. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., Cagliari, 1975. **Proceedings**. Cagliari, 1975. p. 245-269.
- NAPIER-MUNN, T.J.; MORRELL, S.; MORRISSON, R.D.; KOJOVIC, T. In: Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996. Cap. 12, p.273-330.
- PLITT, L.R. (1976) A mathematical model of the hydrocyclone classifier. **CIM Bulletin**, Quebec, v. 69 n. 776, p. 114-23, Dec.