



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

MARIA VIRGÍNIA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MASSA ESPECÍFICA E PRESSÃO
NA OPERAÇÃO DO HIDROCICLONE**

ARAXÁ/MG

2019

MARIA VIRGÍNIA DA CUNHA

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MASSA ESPECÍFICA E PRESSÃO
NA OPERAÇÃO DO HIDROCICLONE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientadora: Prof. Dra. Michelly dos Santos Oliveira

ARAXÁ/MG

2019

MARIA VIRGÍNIA DA CUNHA

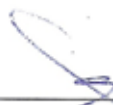
**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA MASSA ESPECÍFICA E PRESSÃO NA
OPERAÇÃO DO HIDROCICLONE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

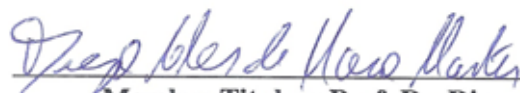
Araxá, 02 de dezembro de 2019



Presidente e Orientadora: Prof.^a Dr.^a Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Fábio de São José
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Diego Alves de Moro Martins
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, meus irmãos e aos meus amigos pelo apoio incondicional e por terem me ajudado em tudo o que foi preciso durante esses anos de graduação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela oportunidade que me concedeu de estar realizando mais um sonho em minha vida e a Nossa Senhora pela sua poderosa intercessão.

Aos meus pais José Vilmar e Maria Abadia e aos meus irmãos Gian, Geovani e Geciel, por tudo o que fizeram e fazem por mim e por terem me dado apoio e força para a realização de toda a minha graduação e desse trabalho de conclusão.

Ao CEFET – MG Unidade Araxá pelo uso dos laboratórios, além da concretização da minha formação e ao CEFET – MG Unidade Belo Horizonte pelos testes realizados.

À minha orientadora, professora Dra. Michelly dos Santos Oliveira que me acompanha desde o ensino médio/técnico e sempre me ajudou e deu suporte em tudo o que era necessário e a todos os professores que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho, especialmente ao professor Dr. Natal Junio Pires.

Ao técnico de laboratório João Victor da Silva Alves, que nunca mediu esforços para me ajudar no que fosse preciso, a técnica Mariana Pires e aos estagiários Tairony, Mateus e Ricardo.

Aos meus amigos que mesmo morando longe se fizeram tão presentes e ajudaram a tornar essa caminhada mais fácil. Em especial, deixo meu agradecimento a Mariana, a Ana Letícia, a Haylla, ao Sávio, a Késsia, a Renata, ao Ramires, a Lucélia e ao Matheus pelo apoio e pelas orações que tanto me sustentaram durante o tempo de realização desse trabalho.

Aos grandes amigos que ganhei durante o tempo de faculdade e que sempre seguraram a minha mão nos momentos mais difíceis, me incentivaram e contribuíram para a realização desse TCC. Meu muito obrigada principalmente a Bianca, a Talita, ao Mário, a Maria Luiza, ao Sócrates, a Thayná e ao Guilherme.

À minha companheira de laboratório Maria Clara por toda a ajuda na realização dos testes e quantificação de resultados.

EPÍGRAFE

“Até aqui nos socorreu o Senhor.” (1Samuel 7,12)

RESUMO

O hidrociclone é um tipo de equipamento muito utilizado na etapa de classificação dentro do tratamento de minérios. Pode estar presente nos circuitos fechados de moagem, na deslamagem de minérios para a flotação e no espessamento/desaguamento de polpas minerais e de rejeitos. Esse equipamento, opera através da sedimentação em queda impedida (retardada) e a densidade das partículas é um parâmetro que é de suma importância nesse tipo de sedimentação. Dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar a influência da densidade das partículas na classificação utilizando hidrociclone. Além da densidade também foi estudado o efeito da variação da pressão de alimentação na eficiência e no corte. Para a realização dos ensaios com hidrociclone, foram utilizadas duas amostras com minérios que apresentam densidades diferentes: minério de ferro com densidade de $3,74 \text{ g/cm}^3$ e proveniente de uma mina da cidade de Itatiaiuçu – MG e minério fosfático com densidade de $2,78 \text{ g/cm}^3$, proveniente de uma mina de Tapira – MG. Nos ensaios, foram avaliados três níveis de pressão de alimentação: 10, 20 e 30 psi, sem alterar a porcentagem de sólidos da polpa (5%) na alimentação do equipamento. Observou-se que o corte do hidrociclone diminuiu com o aumento da densidade e com o aumento da pressão, sendo que a densidade interferiu de forma mais significativa. Além disso, percebeu-se também que maiores densidades, combinadas com maiores pressões, aumentam a eficiência do ciclone e a porcentagem de sólidos no *underflow* e diminuem a porcentagem de sólidos no *overflow* e a relação de líquidos.

Palavras-chave: Hidrociclone. Corte. Densidade. Minério de ferro. Minério fosfático.

ABSTRACT

Hydrocyclone is a type of equipment widely used in the classification stage within ore treatment. It can be present in the closed grinding circuits, the flaking ore sludge and the thickening/dewatering of mineral and tailings pulps. This equipment operates through impeded fall (delayed) sedimentation and particle density is a parameter that is of paramount importance in this type of sedimentation, within the context, the present work aims to analyze the influence of particle density on classification using hydrocyclone. In addition to density, the effect of varying feed pressure on efficiency and shear was also studied. For the hydrocyclone tests, two ore samples with different densities were used: iron ore with density of 3,74 g/cm³ and from a mine in the city of Itatiaiuçu – MG and phosphate ore with density of 2,78 g/cm³, from a Tapira – MG mine. In the trials, three levels of feed pressure were evaluated: 10, 20 and 30 psi, without changing the percentage of pulp solids (5%) in the equipment feed. It was observed that the hydrocyclone cutoff decreased with increasing density and increasing pressure, and the density interfered more significantly. In addition, it was also found that higher densities combined with higher pressures increase cyclone efficiency and underflow solids percentage and decrease overflow solids percentage and liquid ratio.

Key words: Hydrocyclone. Cut. Density. Iron ore. Phosphate ore.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Bateria de hidrociclones.....	13
Figura 2: Distribuição do consumo de rocha fosfática pelos diferentes setores industriais no Brasil em 2005.....	17
Figura 3: Exemplo de sedimentação em queda livre e queda impedida.....	21
Figura 4: Representação esquemática de um hidrociclone convencional.....	23
Figura 5: Tipos de descarga do <i>apex</i>	27
Figura 6: Curva de partição.....	30
Figura 7: Fluxograma das etapas de preparação da amostra.....	31
Figura 8: Pilha cônica para pré-homogeneização.....	32
Figura 9: Pilha alongada.....	32
Figura 10: Testes de picnometria.....	34
Figura 11: Hidrociclone utilizado com suas geometrias.....	35
Figura 12: Unidade experimental.....	35
Figura 13: Análise granulométrica da alimentação de minério de ferro.....	37
Figura 14: Análise granulométrica da alimentação de minério fosfático.....	38
Figura 15: Análise granulométrica do minério de ferro após a classificação.....	39
Figura 16: Análise granulométrica do minério fosfático após a classificação.....	39
Figura 17: Análise granulométrica do <i>overflow</i>	40
Figura 18: Comparação das curvas de partição e partição corrigida para o minério de ferro na pressão de 10 psi.....	44
Figura 19: Comparação das curvas de partição e partição corrigida para o minério fosfático na pressão de 10 psi.....	44
Figura 20: Descarga do <i>apex</i> com minério de ferro.....	45
Figura 21: Descarga do <i>apex</i> com minério fosfático.....	45
Figura 22: Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados para as pressões de 10 e 30 psi.....	46
Figura 23: Gráfico de Efeitos Principais para Eficiência para as pressões de 10 e 30 psi.....	47
Figura 24: Otimização da eficiência utilizando as pressões de 10 e 30 psi.....	47
Figura 25: Curvas de partição comparando as pressões utilizadas para o ensaio com minério de ferro.....	48

Figura 26: Curvas de partição comparando as pressões utilizadas para o ensaio com minério de fosfático.....	48
Figura 27: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 10 psi.....	49
Figura 28: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 20 psi.....	49
Figura 29: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 30 psi.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reserva e produção mundial de minério de ferro.....	16
Tabela 2: Diâmetros encontrados para a alimentação de minério de ferro.	37
Tabela 3: Diâmetros encontrados para a alimentação de minério fosfático.	38
Tabela 4: Eficiência total, relação de líquidos e eficiência total reduzida para os ensaios realizados utilizando minério de ferro.....	41
Tabela 5: Eficiência total, relação de líquidos e eficiência total reduzida para os ensaios realizados utilizando minério fosfático.....	42
Tabela 6: Desvio padrão	43
Tabela 7: Densidade média do minério de ferro.....	56
Tabela 8: Densidade média do minério fosfático.....	56
Tabela 9: Teste 1 - Minério de ferro.	57
Tabela 10: Teste 2 - Minério de ferro.	57
Tabela 11: Teste 3 - Minério fosfático.	57
Tabela 12: Teste 4 - Minério fosfático.	58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Força de resistência para regime laminar.....	19
Equação 2: Velocidade terminal para regime laminar.....	19
Equação 3: Força de resistência para regime turbulento.....	19
Equação 4: Velocidade terminal para regime turbulento.....	19
Equação 5: Razão entre tamanho de duas partículas diferentes para que tenham a mesma velocidade terminal.....	20
Equação 6: Velocidade de sedimentação em queda impedida.....	20
Equação 7: Razão de sedimentação em queda impedida.....	21
Equação 8: Equação modificada de Stokes.....	28
Equação 9: Equação modificada de Newton.....	28
Equação 10: Partição.....	29
Equação 11: Partição da água.....	30
Equação 12: Partição corrigida.....	30
Equação 13: Equação para o cálculo da densidade por picnometria.....	33

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Minério de ferro	15
2.2	Minério fosfático	16
2.3	Classificação.....	18
2.3.1	Fundamentos da Classificação	18
2.4	Hidrociclone	22
2.4.1	Aplicabilidade	23
2.4.2	Princípios de funcionamento de um hidrociclone	25
2.4.3	Vantagens e desvantagens.....	26
2.5	Geometrias do hidrociclone	26
2.6	Efeito da pressão de operação em ciclones	27
2.7	Efeito da densidade das partículas em ciclones.....	28
2.8	Avaliação e quantificação de resultados.....	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	Preparação das amostras	31
3.2	Caracterização das amostras	33
3.3	Testes de hidrociclone	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Caraterização da amostra	37
4.2	Testes de hidrociclone	39
4.3	Planejamento fatorial.....	45
5	CONCLUSÕES	51
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
	REFERÊNCIAS	53
	APÊNDICE A.1 - DENSIDADES	56
	APÊNDICE A.2 - CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A classificação é uma etapa do tratamento de minérios que visa a separação da amostra original em duas faixas de produtos: uma faixa com produtos de menor granulometria e outra faixa com produtos de maior granulometria. Os equipamentos classificadores podem operar tanto em sedimentação em queda livre quanto em queda impedida (retardada). Um dos equipamentos utilizados na mineração é o hidrociclone. A Figura 1 mostra uma bateria, ou seja, um conjunto de hidrociclones utilizados na indústria.



Figura 1: Bateria de hidrociclones.

Fonte: Revista M&T, 2018.

Os hidrociclones são equipamentos muito utilizados na mineração e possuem inúmeras vantagens como a facilidade de construção, simplicidade na operação e baixo custo de manutenção. Eles são formados por uma parte cônica e outra parte cilíndrica e possuem uma abertura de entrada, chamada de *inlet* e duas de saída, chamadas de *apex* e *vortex finder*. A alimentação é inserida no equipamento de forma tangencial, criando dentro do mesmo um campo centrífugo. Isso permite que as partículas maiores sejam arremessadas para as paredes do equipamento e as partículas menores, para o interior do equipamento, sendo arrastadas por um fluxo de água ascendente até chegarem na abertura de saída (CHAVES, 2012).

Devido ao movimento criado dentro do equipamento, as partículas se dividem em dois fluxos: *overflow* e *underflow*. O *overflow* sai pelo *vortex finder* e nesse fluxo

se concentram a maior parte das partículas finas enquanto que o *underflow* sai pelo *apex* e aí se concentram a maior parte das partículas grosseiras. As partículas mais pesadas são movimentadas pelo vórtice parietal em direção ao *apex* e as partículas mais leves são movimentadas pelo vórtice de Rankine, sendo direcionadas para o *vortex finder*.

Existem vários parâmetros e variáveis que devem ser conhecidos e podem ser alterados para otimizar os resultados de operação de um hidrociclone e um desses parâmetros é a densidade das partículas. Sabe-se que a densidade é de suma importância na operação do hidrociclone e pode influenciar em vários parâmetros como por exemplo, a eficiência e o corte do hidrociclone.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem por objetivo analisar qual a influência da densidade das partículas na classificação utilizando hidrociclone. Foram utilizadas duas amostras de minérios de diferentes densidades: de ferro e fosfático.

Os objetivos específicos foram estudar a influência da variável pressão de alimentação na eficiência e no corte, variando-a em 10, 20 e 30 psi. Além disso, foi realizada uma análise fatorial para prever qual das variáveis influenciou mais no processo.

Vale ressaltar sobre como foi organizado o presente trabalho, explicitando de forma muito breve o que será abordado em cada capítulo subsequente. O segundo capítulo se trata da revisão bibliográfica, onde serão abordadas as teorias que regem o assunto em questão. O terceiro capítulo traz a metodologia adotada para a realização dos ensaios, mostrando quais as atividades e equipamentos utilizados, além dos procedimentos realizados no CEFET – MG, Unidade Belo Horizonte. O quarto capítulo consiste na discussão dos resultados, onde será realizada uma explanação sobre as análises obtidas através desse estudo. E por fim, o quinto capítulo trata das conclusões obtidas, levando em consideração o objetivo geral e os objetivos específicos propostos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentro desse capítulo estão abordados assuntos relevantes para o presente trabalho. Inicialmente, são apresentadas algumas características e informações dos minérios fosfático e de ferro e a operação de classificação bem como seus princípios. Além disso, o equipamento hidrociclone, seu funcionamento, vantagens e desvantagens e o efeito da pressão e da densidade no funcionamento e eficiência do mesmo também são citados.

2.1 Minério de ferro

Na indústria, a única maneira de se adquirir o elemento ferro é através dos minerais. Esse elemento pode ser extraído levando em consideração a sua quantidade no mineral ou sua distribuição ou concentração nas rochas. Os minerais de ferro podem ser divididos e classificados em silicatos, carbonatos, sulfetos ou óxidos, porém apenas a exploração dos óxidos é econômica para a aquisição do ferro (CARVALHO *et al.*, 2014).

Os depósitos de ferro são organizados em cinco categorias: os relacionados a atividades vulcânicas, os sedimentares acamadados, os relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação, os formados por soluções hidrotermais e os resultantes de alteração e acúmulo na superfície terrestre. Dentre esses, a categoria mais importante é a dos sedimentares acamadados devido ao fato de compor os grandes depósitos das Formações Ferríferas Bandadas (FFB). Na metalurgia os minérios de ferro são agrupados em três categorias levando em consideração a granulometria: granulado (*lump ore*) que abrange a faixa granulométrica de 200 mm a 12,5 mm, finos para sinter (*sínter feed*), que compreende a granulometria entre 12,5 mm e 0,15 mm e o finos para pelotas (*pellet feed*) com a granulometria menor que 0,15 mm (CARVALHO *et al.*, 2014).

Segundo a Agência Nacional de Mineração (2019) o total de reservas que contém minério de ferro no mundo são de aproximadamente 170 bilhões de toneladas, sendo que as reservas brasileiras lavráveis correspondem a 16,8% das reservas mundiais, apresentando 45,7% de teor médio de ferro. Os principais estados onde estão concentrados esses minérios de ferro são Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul. A Tabela 1 mostra a reserva e produção mundial de minério de ferro.

Tabela 1: Reserva e produção mundial de minério de ferro.

Discriminação	Reservas (10 ⁶ t) ¹		Produção (10 ³ t) ²		
	Países	2016 ³	2015 ³	2016 ³	% (2016)
Brasil		28.630	430.838	421.358	19,0
Austrália		52.000	817.000	825.000	37,0
China		21.000	375.000	353.000	16,0
Índia		8.100	156.000	160.000	7,0
Rússia		25.000	101.000	100.000	5,0
África do Sul		1.200	73.000	60.000	3,0
Ucrânia		6.500	67.000	58.000	3,0
Outros países		27.597	240.162	252.642	11,0
Total		170.000	2.260.000	2.230.000	100,0

(1) reserva lavrável; (2) produção beneficiada; (3) dados estimados, exceto Brasil.

Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Mineração, 2019.

Na última década o mercado desse minério teve uma forte influência do rápido crescimento mundial iniciado na China e começou a ser um produto lucrativo. A oferta de minério de ferro depende principalmente da sua distribuição na natureza (CARVALHO *et al*, 2014).

Devido as suas propriedades tanto químicas quanto físicas, 99% de todo o ferro é utilizado em indústrias siderúrgicas. A quantidade restante é aproveitada como carga em indústrias de cimento, ferro-liga e em alguns casos, na construção de estradas (QUARESMA, 2001).

2.2 Minério fosfático

O fósforo é um elemento abundante na natureza e os minérios de onde é obtido são formados em ambientes geológicos variados. Há ocorrência de mais de um tipo de fosfato (minérios que contém o elemento fósforo) sendo que os mais comuns são os fosfatos de cálcio, pertencentes ao grupo da apatita. Esses minérios podem ser

utilizados na forma natural (sem passar por beneficiamento) ou após o beneficiamento (LUZ e LINS, 2005).

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (2009) a apatita é um dos minerais-minério de fósforo, sendo frequentemente encontrada nas rochas carbonatíticas. Dos minérios de fósforo que fazem parte do grupo da apatita, a maioria é representada por um fosfato cristalino de cálcio com flúor que possui características como o brilho vítreo, cor variável e fratura conchoidal.

Mundialmente, a rocha fosfática é a única fonte viável de extração do elemento fósforo, estando presente em depósitos ígneos, sedimentares e biogénicos. Dos três tipos de depósitos, os mais importantes economicamente são os ígneos (localizados na África do Sul, Finlândia, Brasil e Rússia) e os sedimentares (Marrocos, noroeste do Saara, Oriente Médio e Estados Unidos) (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2009).

Os maiores detentores de minério fosfático, cerca de 60% de todas as reservas mundiais, são Estados Unidos, Rússia e Marrocos. Já o Brasil, contempla 0,72% das reservas mundiais, dispostas principalmente em Minas Gerais, São Paulo e Goiás (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, 2009).

De toda a rocha fosfática que é comercializada no mundo, a grande maioria é utilizada na indústria de fertilizantes. Além desse tipo de indústria, a rocha também pode ser utilizada na produção de ácido fosfórico e na fabricação de diversos outros produtos como detergentes, produtos de limpeza e ração animal (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009; PEIXOTO, 2002; OLIVEIRA, 2007). No Brasil não é diferente e muitos são os produtos que utilizam fosfato em sua produção, conforme é mostrado na Figura 2.

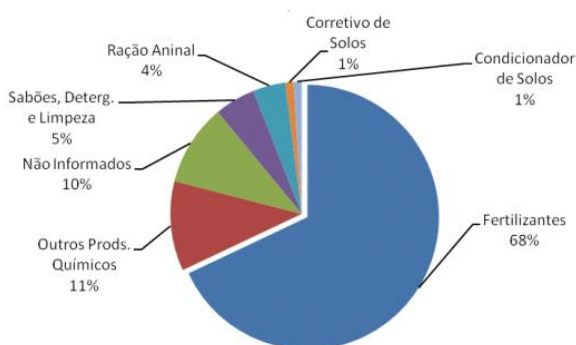


Figura 2: Distribuição do consumo de rocha fosfática pelos diferentes setores industriais no Brasil em 2005.

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2009.

2.3 Classificação

A classificação em tratamento de minérios pode ser definida como a separação da alimentação (população original) em dois produtos que se distinguem pela distribuição granulométrica das partículas presentes em cada população: população grossa onde se encontram predominantemente as partículas da alimentação que possuem as maiores dimensões e a população fina, constituída predominantemente pelas partículas com menores dimensões (CHAVES, 2012).

Todas as operações que compõem a classificação são realizadas através de um equipamento que comporta um meio fluido que está sempre em movimento. Os equipamentos de classificação devem ser construídos de maneira que as partículas mais grosseiras afundem e com isso sejam coletadas na parte inferior do equipamento (fluxo de *underflow*) e que as partículas mais finas sejam arrastadas por uma corrente de água e sejam coletadas na parte superior do equipamento (fluxo de *overflow*) (CHAVES, 2012; VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

2.3.1 Fundamentos da Classificação

Quando uma partícula está caindo no vácuo, ela fica submetida a uma aceleração que é constante e a uma velocidade que vai aumentando na queda, independentemente do tamanho ou da densidade que a partícula possui. Quando essa partícula começa a cair em qualquer outro meio que não seja o vácuo, surge uma resistência do meio em relação ao movimento da partícula que vai aumentando até atingir um valor constante. A resistência apresentada pelo fluido está ligada a velocidade de queda das partículas: quando a velocidade é baixa, a partícula está em movimento enquanto que o fluido permanece estático portanto estabelece-se um regime denominado laminar; quando a velocidade é alta, há uma perturbação do fluido e o regime é chamado de regime turbulento (LUZ *et al.*, 2010; VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

2.3.1.1 Sedimentação em queda livre

Está ligada ao movimento de partículas que estão submersas em um fluido e que tem a tendência de atravessar distância que na teoria é infinita. Essa

sedimentação é verificada quando a porcentagem de sólidos possuir valor inferior a 15% em peso (LUZ *et al.*, 2010).

Quando se trata de velocidade terminal desse tipo de sedimentação, ou seja, da velocidade que é adquirida pela partícula quando ela se sedimenta em um meio fluido, obtêm-se que a soma das forças que atuam sobre a partícula (empuxo, gravidade e de resistência) tem valor igual a zero (OLIVEIRA e SOUZA, 2012).

Já para a força de resistência, o cálculo se dá baseando-se nas leis de Stokes (regime laminar) e Newton (regime turbulento). O movimento relativo ao fluido de partículas pequenas enquadra-se no regime laminar e de partículas grosseiras no regime turbulento (LUZ *et al.*, 2010; VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

A Equação 1 mostra a força de resistência e a Equação 2 mostra a velocidade terminal para partículas que estão no regime laminar (LUZ *et al.*, 2010; VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

$$R = 6\pi\mu rV_t \quad (1)$$

$$V_t = \frac{4r^2g}{18\mu}(\rho_s - \rho_f) \quad (2)$$

onde:

μ = viscosidade do fluido (kg/ms);

r = raio da esfera (m);

V_t = velocidade terminal da partícula m/s);

ρ_s = densidade do sólido;

ρ_f = densidade do fluido.

Já a Equação 3 mostra a força de resistência e a Equação 4 mostra a velocidade terminal para o regime turbulento.

$$R = Q\left(\frac{\pi}{2}\right)\rho_f r^2 v^2 \quad (3)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{8gr}{3Q}\left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}\right)} \quad (4)$$

onde:

Q = coeficiente de resistência.

Essas equações evidenciam que a velocidade terminal é função apenas da densidade e do tamanho das partículas, sendo que se as partículas possuírem a

mesma densidade, a partícula maior terá maior velocidade terminal e se as partículas tiverem o mesmo tamanho, a mais densa terá maior velocidade terminal. Com base nessas informações, é possível estabelecer uma razão entre o tamanho de duas partículas diferentes para que ambas tenham a mesma velocidade terminal de sedimentação (LUZ *et al.*, 2010; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). Essa razão é mostrada na Equação 5.

$$\rho_r = \frac{D_a}{D_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_f}{\rho_a - \rho_f} \right)^n \quad (5)$$

onde:

D_a e D_b = diâmetro de uma partícula a e uma partícula b, respectivamente;

ρ_a e ρ_b = densidade da partícula a e da partícula b, respectivamente;

ρ_f = densidade do fluido;

$n = 1$ para Lei de Newton e $0,5$ para lei de Stokes.

2.3.1.2 Sedimentação em queda impedida (retardada)

A sedimentação em queda impedida, é caracterizada quando há diminuição da velocidade de sedimentação das partículas. Quando a porcentagem de sólidos da polpa é aumentada, conseqüentemente há aumento também da viscosidade e da densidade aparentes da polpa, fazendo com que o movimento de sedimentação de cada uma das partículas sofra influência do movimento das demais e também do deslocamento da água nos espaços vazios. Levando isso em consideração, a velocidade terminal de sedimentação para a sedimentação em queda impedida é menor do que para a sedimentação em queda livre (LUZ *et al.*, 2010; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006; ALVES, 2019). Essa velocidade (mostrada na Equação 5) pode ser calculada através da modificação da Equação 6.

$$V = k[D(\rho_s - \rho_p)]^{1/2} \quad (6)$$

onde:

k = constante;

D = diâmetro da partícula (m);

ρ_p = densidade da polpa.

Já a Equação 7 mostra a razão de sedimentação em queda impedida. A condição para essa equação é que $\rho_b > \rho_a$.

$$Z = \frac{D_a}{D_b} = \left(\frac{\rho_b - \rho_p}{\rho_a - \rho_p} \right) \quad (7)$$

A razão de sedimentação em queda impedida é sempre maior que a em queda livre e quanto maior a densidade da polpa também será maior a razão do diâmetro de partículas que possuem a mesma velocidade de sedimentação (LUZ *et al.*, 2010; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

2.3.1.3 Aplicações de sedimentação em queda livre e queda impedida na classificação

Segundo Luz *et al.* (2010) as aplicações da sedimentação dentro da classificação podem ser explicadas de maneira fácil pegando como exemplo partículas esféricas de galena e de quartzo. Considera-se cinco pares de partículas com diâmetro de 10, 20, 30, 40 e 50 mm e outros cinco pares com diâmetro de 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 e 0,5 mm de diâmetro, que estão em queda livre e logo após em queda retardada em polpa com 40% de sólidos. Considera-se também a densidade relativa da galena de 7,5, do quartzo de 2,65 e da polpa de 1,66. Esse exemplo é ilustrado na Figura 3.

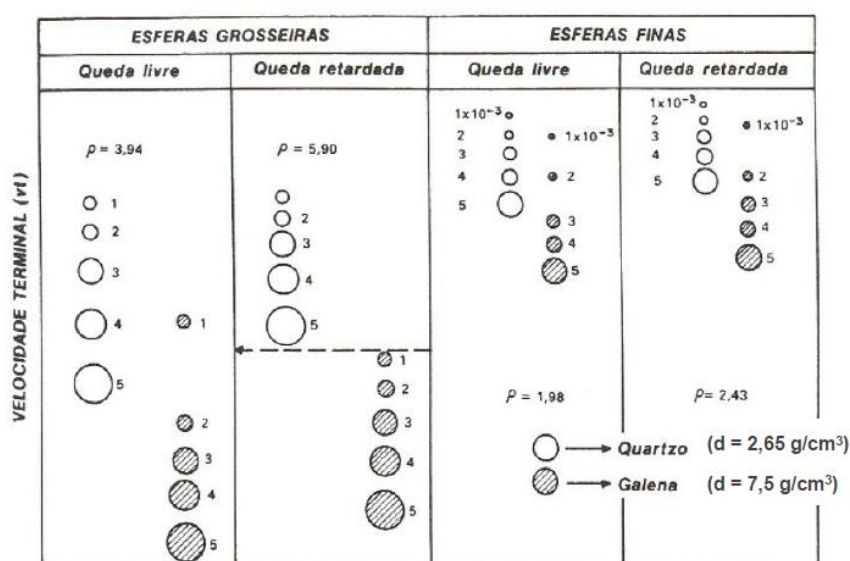


Figura 3: Exemplo de sedimentação em queda livre e queda impedida.

Fonte: Luz *et al.*, 2010.

Com base na Figura 3, percebe-se que quando se trata de classificação por tamanho em meio fluido, as condições ideais são definidas pela sedimentação em queda livre de partículas pequenas, o que está evidenciado na terceira coluna. Já quando se trata de classificação por diferença de densidade, as condições ideais são definidas pela sedimentação em queda retardada de partículas grossas, como é mostrado na segunda coluna. Enfim, pode-se chegar à conclusão de que a sedimentação em queda livre é utilizada quando se deseja dar ênfase no efeito gerado pelo tamanho das partículas. Já a sedimentação em queda impedida é utilizada quando se deseja aumentar o efeito causado pela densidade na classificação (Luz *et al.*, 2010).

2.4 Hidrociclone

Existem vários equipamentos de classificação e um deles é o hidrociclone. Ele é formado basicamente por uma parte cilíndrica (o diâmetro interno da parte cilíndrica, determina qual será o diâmetro do equipamento) e uma parte cônica. O mesmo possui uma entrada e duas saídas, a entrada é chamada *inlet* (injetor). O equipamento é alimentado com polpa ou com líquido sob pressão e tangencialmente à parte cilíndrica. Esse tipo de alimentação provoca dentro do equipamento um movimento de rotação (CHAVES, 2012; ALVES, 2019; SANTOS, 2018).

A polpa ou a suspensão sólido-líquido, é alimentada e se divide para sair nas duas extremidades. Uma dessas extremidades está localizada na parte inferior da parte cônica e recebe o nome de *apex* e por ela é retirado o produto chamado *underflow*, onde estão concentradas a maior parte das partículas mais grosseiras da alimentação (no caso de polpas). A outra extremidade recebe o nome de *vortex finder* e consiste em um cano que é colocado na porção superior da parte cilíndrica, descarregando o material para cima. Por essa abertura, sai o produto chamado *overflow* onde estão concentradas a maior parte das partículas finas da alimentação (CHAVES, 2012; SAMPAIO *et al.*, 2007).

A Figura 4 mostra um desenho esquemático de um hidrociclone bem como cada uma das suas partes e extremidades de entrada e saída.

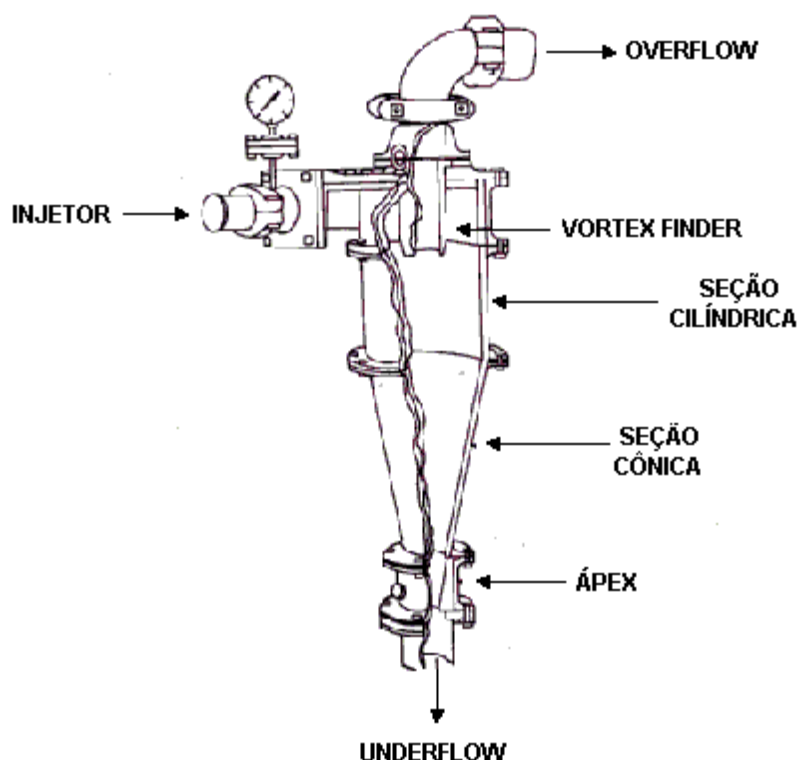


Figura 4: Representação esquemática de um hidrociclone convencional.

Fonte: Luz *et al.*, 2010.

2.4.1 Aplicabilidade

O hidrociclone é de fácil construção, possui grande aplicação na indústria mineral e é o equipamento mais utilizado na área de classificação. Pode ser empregado em atividades como deslamagem, desaguamento e em circuitos fechados da operação de moagem (CHAVES, 2012; SAMPAIO *et al.*, 2007; BERALDO, 1987).

O trabalho de Ribeiro *et al.* (2015), avaliou o efeito das variáveis operacionais (porcentagem de sólidos da polpa de minério fosfático e pressão de alimentação) no corte de um hidrociclone e Couto e França (2013) avaliaram o efeito da geometria do ciclone para deslamagem de minério sulfetado.

Já Gonçalves *et al.* (2015) analisaram um hidrociclone com geometria cônico-filtrante (Hidrociclone Cônico Filtrante Otimizado). Foi estudado o efeito das variáveis de diâmetro do *apex* e percentual volumétrico de sólidos na alimentação. Com esse estudo, concluiu-se que através do uso do maior percentual volumétrico de quartzito e do menor diâmetro do *apex*, pode-se alcançar resultados satisfatórios para a concentração de partículas e também, houve menor gasto de energia. Mendes (2015)

analisou a possibilidade de uso e a eficiência de placas de poliuretano para serem utilizadas como revestimento do equipamento, além de compará-las com uma placa constituída de material cerâmico. O desenvolvimento desse trabalho trouxe como conclusão que a resistência a abrasão apresentada pelo poliuretano foi maior que a apresentada pelo material cerâmico.

Além dessas utilizações, o hidrociclone ainda pode ser utilizado até mesmo fora da área da mineração. No trabalho de Andrade (2007) foi estudada a utilização de hidrociclones na área ambiental, para funcionar como um separador de fases como pré-depurador reduzindo assim a carga poluidora e também o tempo de tratamento gasto em uma Estação de Tratamento de Esgoto. A autora verificou a eficiência de ciclones para a separação de óleo emulsionado de água. Já Soccol (2003) analisou a pré-filtragem de água para irrigação utilizando hidrociclones, pois em alguns casos os equipamentos de filtragem para preparar água para irrigação não apresentam alta eficiência.

O trabalho de Moura *et al.* (2014) foi realizado para construir e analisar tipos de hidrociclones utilizados para o espessamento de lodo que é produzido por indústrias têxteis. Com os hidrociclones construídos, foram realizadas análises a fim de verificar a eficiência de separação do sistema, alterando tanto as propriedades dos efluentes quanto as variáveis de processo. Chegou-se à conclusão de que os hidrociclones projetados para o trabalho, são uma boa alternativa para o espessamento do lodo produzido por empresas têxteis.

DOS ANJOS *et al.* (2014) analisaram quais geometrias deveriam ser utilizadas para que fossem minimizadas as tensões de cisalhamento dentro de um hidrociclone, utilizado na separação de células animais e através da fluidodinâmica computacional. Verificou-se que as tensões cisalhantes no seio do fluido foram muito inferiores as tensões geradas nas paredes do equipamento. Foram propostas três geometrias para reduzir essa tensão, sendo que apenas uma das três (com ângulo do tubo de *underflow* de 15°) foi favorável.

Por fim, o trabalho de Bicalho (2011) buscou otimizar (através da utilização de hidrociclone) a separação de leveduras da fermentação alcoólica. Para isso, foram realizadas análises acerca da influência das variáveis operacionais e geométricas relacionadas ao desempenho de hidrociclones. Com isso verificou-se que diminuir as variáveis geométricas juntamente com a diminuição da pressão e com o uso de

suspensões com concentração menor de leveduras, fez com que a eficiência de separação aumentasse.

2.4.2 Princípios de funcionamento de um hidrociclone

Devido à maneira que acontece a alimentação, há o aparecimento de um movimento circular que gera força centrífuga sobre as partículas em suspensão, fazendo com que elas sejam arremessadas para a parede do ciclone.

As partículas que se encontram no equipamento ficam submetidas a duas velocidades: a centrífuga e outra que apresenta direção vertical. A centrífuga, é aquela que tende a fazer com que as partículas sejam arrastadas em direção as paredes do ciclone e a outra velocidade, é imposta pelo movimento da água no sentido descendente e nas proximidades das regiões de periferia. Nessas regiões, a polpa está sendo direcionada para o *underflow*. Já no sentido ascendente, a polpa está sendo direcionada para o *overflow* (CHAVES, 2012; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

Pode-se falar também em velocidade tangencial. A velocidade tangencial que surge dentro do equipamento nada mais é que uma combinação entre o vórtice livre na região externa da parede do hidrociclone e o vórtice forçado que está próximo ao eixo do equipamento. Esse comportamento recebe o nome de vórtice de Rankine (SIMÕES, 2005).

Como as partículas grosseiras têm maior massa, elas tendem a afundar mais rapidamente com a força centrífuga e isso faz com que ocupem regiões próximas as paredes do equipamento. Ao chegarem nessa região, essas partículas sofrem com o atrito (perdendo sua velocidade) e são arrastadas para a parte debaixo do equipamento, até chegarem à abertura de saída (*apex*) onde há a descarga de *underflow*. Por outro lado, as partículas mais finas são jogadas para o centro do equipamento e são levadas para sua parte superior (*vortex finder*) através do fluxo ascendente de água e com isso, há a descarga do *overflow* (CHAVES 2012; VALADÃO e ARAÚJO, 2007).

2.4.3 Vantagens e desvantagens

Se comparado a outros equipamentos de classificação, o hidrociclone apresenta vantagens e desvantagens. É um equipamento que possui controle operacional simples, elevada capacidade e disponibilidade, facilidade na construção e manutenção. Além disso, possui baixo investimento, baixo custo de manutenção, ocupa pouco espaço se comparado a outros equipamentos, não utiliza partes móveis e é versátil em relação as suas aplicações (GAMA *et al.*, 2017; MEDRONHO, 1984 *apud* ALVES, 2012; SVAROVSKY, 1984 *apud* ALVES, 2012; BAI e WANG, 2006, CHAVES, 2012).

Por outro lado, esse equipamento possui efeito regulador pois é incapaz de armazenar grandes quantidades de polpa e é suscetível a abrasão quando comparado a outros equipamentos. Além disso, possui maior custo operacional e menor eficiência em relação aos classificadores espirais (SANTOS, 2017; CHAVES, 2012; BERALDO, 1987).

2.5 Geometrias do hidrociclone

As dimensões dos hidrociclones, as variáveis de operação bem como as propriedades físicas dos sólidos e da polpa alimentada influenciam no desempenho dos equipamentos. Alguns exemplos são porcentagem de sólidos, viscosidade, densidade, pressão de alimentação, presença de lamas, geometria do ciclone e granulometria das partículas (CHAVES, 2012; SAMPAIO *et al.*, 2007; ALMEIDA, 2008).

No hidrociclone os parâmetros que mais exercem influência no diâmetro de corte (tamanho onde ocorre a separação das partículas) da classificação são as dimensões do ciclone, sendo que o diâmetro interno da seção cilíndrica é o que determina qual será a capacidade do equipamento. Para a classificação em granulometrias finas, é necessária a utilização de hidrociclones que apresentem pequenos diâmetros e isso exige que se trabalhe com mais de um desses equipamentos simultaneamente. Essa junção desses equipamentos é conhecida como bateria (SAMPALIO *et al.*, 2007; CHAVES, 2012).

As operações de um hidrociclone podem ser avaliadas levando em consideração os tipos de descarga do *apex*. A Figura 5 mostra os tipos de descarga que são possíveis.

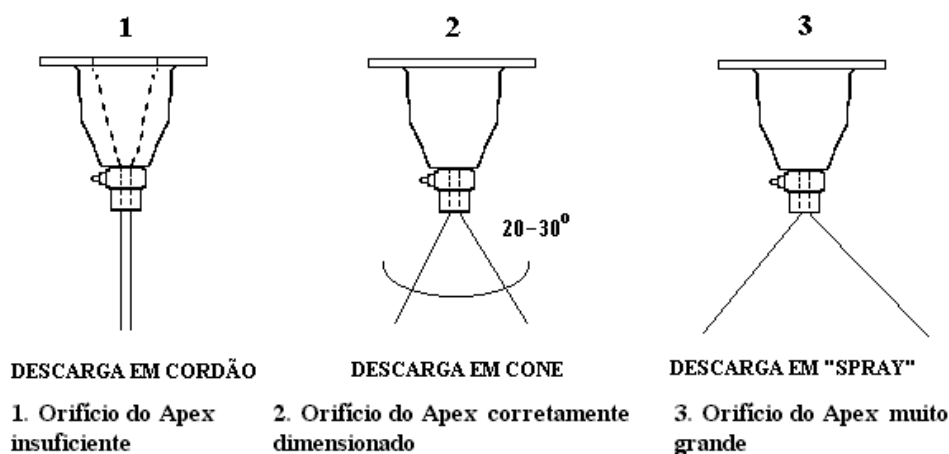


Figura 5: Tipos de descarga do *apex*.

Fonte: Luz *et al.*, 2010.

Segundo Luz *et al.* (2010), Beraldo (1987) e Melo (2010) quando a descarga está em cordão significa que o diâmetro do *apex* é insuficiente e isso acarreta o direcionamento de partículas grossas para o *overflow*. Já a descarga em cone configura uma operação normal, onde o orifício do *apex* se encontra bem dimensionado. E por fim, na descarga em pulverizador (*spray*) o diâmetro do *apex* é maior que o recomendado, sendo assim, as partículas finas irão dirigir-se para o *underflow*.

2.6 Efeito da pressão de operação em ciclones

Quando se aumenta a pressão de operação, acontece o afinamento do corte do ciclone. Esse aumento de pressão, está relacionado com o aumento da velocidade de rotação da bomba. Isso acarreta no aumento da capacidade do hidrociclone, gerando também um aumento tanto na velocidade angular quanto na velocidade tangencial (LUZ *et al.*, 2010).

Devido a esses fatores, se obtêm um campo centrífugo que possui maior intensidade e isso faz com que haja maior probabilidade de decantação das partículas com menores diâmetros, diminuindo assim o corte (LUZ *et al.*, 2010; CHAVES, 2012).

2.7 Efeito da densidade das partículas em ciclones

Segundo Chaves (2012) quando as partículas apresentam densidade maior, a separação delas ocorrerá em um menor diâmetro do que a separação de partículas que possuem menor densidade. Isso acontece devido a força centrífuga gerada que é maior em partículas com maiores densidades. Além disso, quando se diminui a porcentagem de sólidos na polpa, também se diminui a densidade e a viscosidade da mesma, acarretando na diminuição do diâmetro de corte. Isso também influencia na sedimentação das partículas fazendo com elas se sedimentem mais facilmente.

Quando se utiliza hidrociclones, é predominante a sedimentação das partículas através de queda impedida e essa, sofre influência pela passagem de água entre os espaços deixados pelas partículas e pela movimentação das demais partículas e assim, as partículas adquirem uma velocidade de sedimentação (FINKIE, 2003; WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

Segundo Finkie (2003) a densidade das partículas é de suma importância na sedimentação por queda impedida e isso pode ser evidenciado pelo cálculo das velocidades terminais das partículas, utilizando as equações modificadas de Stokes e Newton (Equações 8 e 9). A densidade da partícula é diretamente proporcional a velocidade terminal de sedimentação, ou seja, quanto mais densa for a partícula, maior será a sua velocidade terminal de sedimentação.

$$V = \frac{d^2(\rho_s - \rho_p)g}{18\mu_p} \quad (8)$$

$$V = k\sqrt{d(\rho_s - \rho_p)} \quad (9)$$

onde:

d = diâmetro da partícula (μm);

ρ_s = densidade do minério (g/cm^3);

ρ_p = densidade da polpa (g/cm^3);

μ_p = viscosidade da polpa (cP);

K = constante

Além de influenciar na velocidade de sedimentação, a densidade interfere também no d_{50c} , ou seja, o tamanho no qual as partículas são separadas igualmente

no *underflow* e no *overflow*. Minerais com maior densidade, apresentam valores menores de d_{50c} . É por essa razão que em circuitos fechados de hidrociclone e moinho, os minerais mais liberados e densos encontram-se no *underflow* do ciclone mesmo se eles já estiverem com granulometria adequada para a operação subsequente. Nesses casos, há chance de acontecer sobre모agem (FINKIE, 2003).

Finkie (2003) estudou sobre a influência da densidade de partículas no desempenho do ciclone. O autor separou quatro frações de partículas de minério de ferro, de acordo com a porcentagem de hematita contida nos grãos das partículas. As conclusões obtidas através desse estudo, foi que a densidade tem uma grande importância no processo de classificação utilizando hidrociclone, principalmente quando se fala em d_{50c} e na inclinação da curva de partição (relacionada a eficiência). Tanto o d_{50c} , quanto a inclinação da curva aumentam quando a densidade das partículas diminui.

2.8 Avaliação e quantificação de resultados

O método mais utilizado para mostrar a eficiência de um hidrociclone é através da construção de curvas de partição (porcentagem em massa da alimentação que vai para o *underflow*). Com a curva de partição construída é possível encontrar o D_{50} , que é o diâmetro mediano de separação, ou seja, o tamanho de abertura onde as partículas se dividem igualmente entre *underflow* e *overflow* (CHAVES, 2012; VALADÃO e ARAÚJO, 2007; SANTOS, 2017; SAMPAIO *et al.*, 2007). A Equação 10 mostra a equação utilizada para o cálculo da partição, que também pode ser chamada de eficiência total e a Figura 6 ilustra um exemplo de curva de partição.

$$Y = \frac{\text{Underflow}}{\text{Alimentação}} * 100 \quad (10)$$

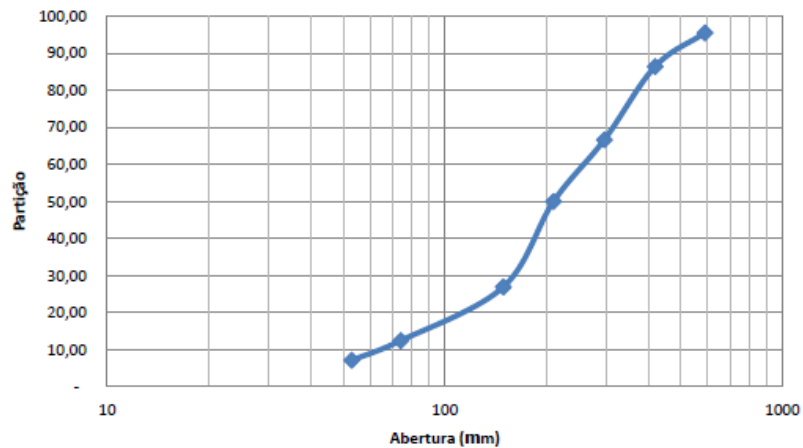


Figura 6: Curva de partição.

Fonte: Santos, 2017.

Usualmente, é utilizada uma correção para as curvas de partição pois considera-se que algumas partículas se dirigem para o *underflow* sem passar pelo processo de classificação. Isso se dá devido a quantidade de partículas finas que vão para o *underflow*, levadas pelo fluxo de água. Esse processo em que algumas partículas não passam pela classificação é chamado de *by-pass* (VALADÃO e ARAÚJO, 2007; OLIVEIRA e SOUZA, 2012). A Equação 11, é utilizada para o cálculo da partição de água (razão de líquido ou *by-pass*) e a Equação 12, é utilizada para corrigir as curvas de partição, retirando assim a influência do *by-pass*. Essa equação pode ser chamada também de eficiência total reduzida.

$$R = \frac{\text{Vazão de água no UF}}{\text{Vazão de água na alimentação}} \quad (11)$$

onde:

R = partição de água.

$$Y_{cr} = \frac{Y-R}{100-R} \quad (12)$$

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo serão abordados os procedimentos experimentais utilizados para preparação, bem como para caracterização das amostras utilizadas e os testes com hidrociclone. Esses procedimentos foram todos realizados no laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET – MG, Unidade Araxá, exceto a distribuição granulométrica que foi realizada no laboratório de Materiais do CEFET – MG, Unidade Belo Horizonte.

3.1 Preparação das amostras

Para a realização desse trabalho, foram utilizadas duas amostras diferentes: amostra de rejeito de minério de ferro e amostra de minério fosfático. A amostra de minério de ferro é proveniente de uma mina situada na cidade de Itatiaiuçu – MG. Já a amostra de minério fosfático é proveniente de uma mina localizada na cidade de Tapira, região do Alto Paranaíba.

Para ambas as amostras serem preparadas, foram realizadas etapas de escalpe, homogeneização e quarteamento e em seguida, os testes de hidrociclonação. A Figura 7 mostra o fluxograma das atividades realizadas no laboratório.

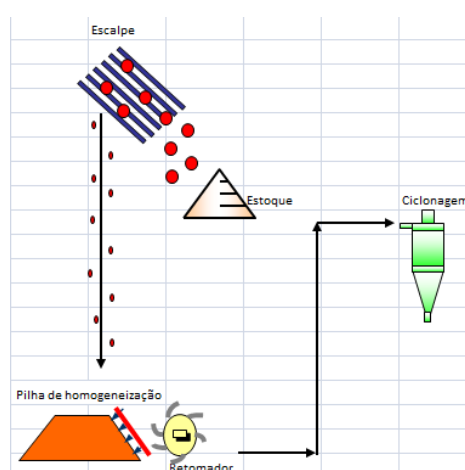


Figura 7: Fluxograma das etapas de preparação da amostra.

O escalpe foi realizado utilizando uma peneira de 0,296 mm (48#). Após o escalpe, deu-se seguimento nas atividades através do processo de homogeneização. Inicialmente foi realizada uma pré-homogeneização por meio da construção de pilha

cônica, utilizando uma lona e o processo de tombamento da mesma em oito ciclos consecutivos. A Figura 8 mostra essa pilha.



Figura 8: Pilha cônica para pré-homogeneização.

Em seguida, foi construída uma pilha alongada de 1,40m de comprimento, conforme é mostrada na Figura 9. Ela foi construída em movimento de “ida e volta” e depois de finalizada, o material presente nas pontas da pilha foi retomado. Através dela, foram coletadas as amostras para análise granulométrica, para análise de densidade e para os testes de hidrociclone.



Figura 9: Pilha alongada.

3.2 Caracterização das amostras

Para a caracterização granulométrica das amostras foram realizadas análises de distribuição granulométrica da alimentação, utilizando o granulômetro a laser CILAS 1090 Líquido. Além disso, também foram realizados ensaios de picnometria para determinação da densidade relativa.

Para a realização da picnometria, os picnômetros foram inicialmente pesados vazios e em seguida, preenchidos por minério. O mesmo procedimento aconteceu quando os picnômetros foram preenchidos com minério e minério juntos também apenas com água.

Depois dos dados coletados, a densidade encontrada para cada picnômetro foi calculada através da Equação 13 e posteriormente foi realizado o cálculo da densidade média que foi utilizada no presente trabalho. A Figura 10 ilustra o teste de picnometria.

$$ds = \frac{(A2)-(A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad (13)$$

Onde:

ds = densidade dos sólidos (g/cm³);

A1 = massa do picnômetro (g);

A2 = massa do picnômetro + amostra (g);

A3 = massa do picnômetro + amostra + água (g);

A4 = massa do picnômetro + água (g).

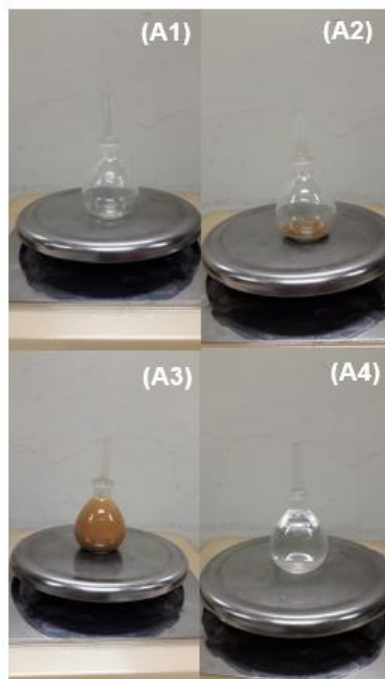


Figura 10: Testes de picnometria.

3.3 Testes de hidrociclone

Quando toda a preparação das amostras chegou ao final, passou-se para os testes com hidrociclone e para a avaliação da diferença causada na classificação pela densidade das partículas. O ciclone utilizado, está inserido em um conjunto de hidrociclonagem de escala laboratorial (CHP – 2). Esse conjunto contém hidrociclone, registro, reservatório para polpa com agitador e uma bomba de polpa. A Figura 11 mostra o hidrociclone utilizado com a sua geometria e a Figura 12 mostra o conjunto de hidrociclonagem utilizado, com o hidrociclone em destaque. Os testes foram realizados variando-se a pressão em 10, 20 e 30 psi e mantendo-se a porcentagem de sólidos constante em 5%.

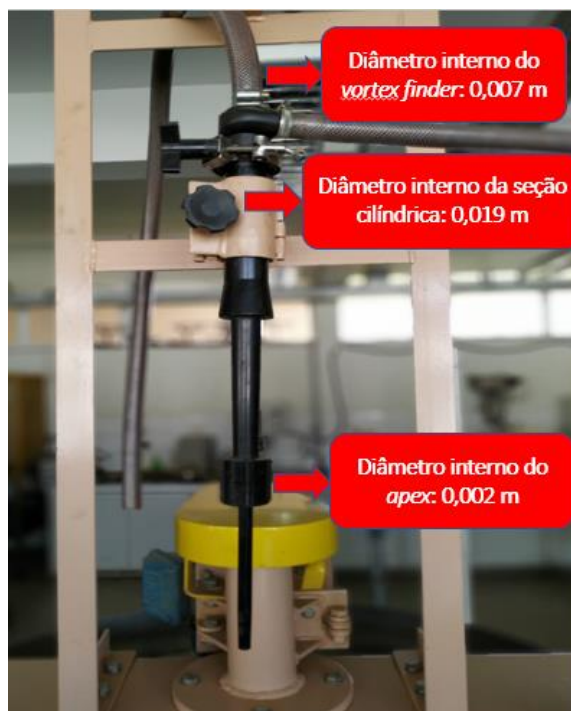


Figura 11: Hidrociclone utilizado e sua geometria.

Inicialmente, o reservatório de polpa foi alimentado com a água e o agitador foi ligado para evitar que houvesse sedimentação do material e só após esse agitador ligado que a amostra foi colocada dentro do reservatório. Posteriormente, a bomba foi ligada e o manômetro regulado na pressão que seria utilizada. Com isso, foram realizadas as coletas das amostras de *underflow* e *overflow*. O tempo de coleta das amostras foi de 15 segundos em cada variação de pressão. Os testes foram realizados em duplicata.



Figura 12: Unidade experimental.

Após os testes, foi realizada a caracterização dos produtos. As amostras provenientes do hidrociclone foram coletadas em baldes e logo em seguida foram aferidos massas e volumes. Posteriormente, foram secadas, homogeneizadas, quarteadas e enviadas para o Laboratório de Materiais do CEFET, Unidade Belo Horizonte para determinação da distribuição granulométrica utilizando também o granulômetro a laser CILAS 1090 Líquido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os resultados de caracterização da amostra e dos ensaios com hidrociclone obtidos no presente trabalho bem como as discussões.

4.1 Caraterização da amostra

A Figura 13, mostra a distribuição granulométrica da alimentação da amostra de minério de ferro. Por meio dessa curva, foi possível obter os diâmetros característicos que representam a distribuição granulométrica da amostra. Esses diâmetros são mostrados na Tabela 2. Observa-se que 50% da amostra possui granulometria inferior a 75 μm , ou seja, 50% das partículas passaram em uma peneira de abertura igual a 75 μm .

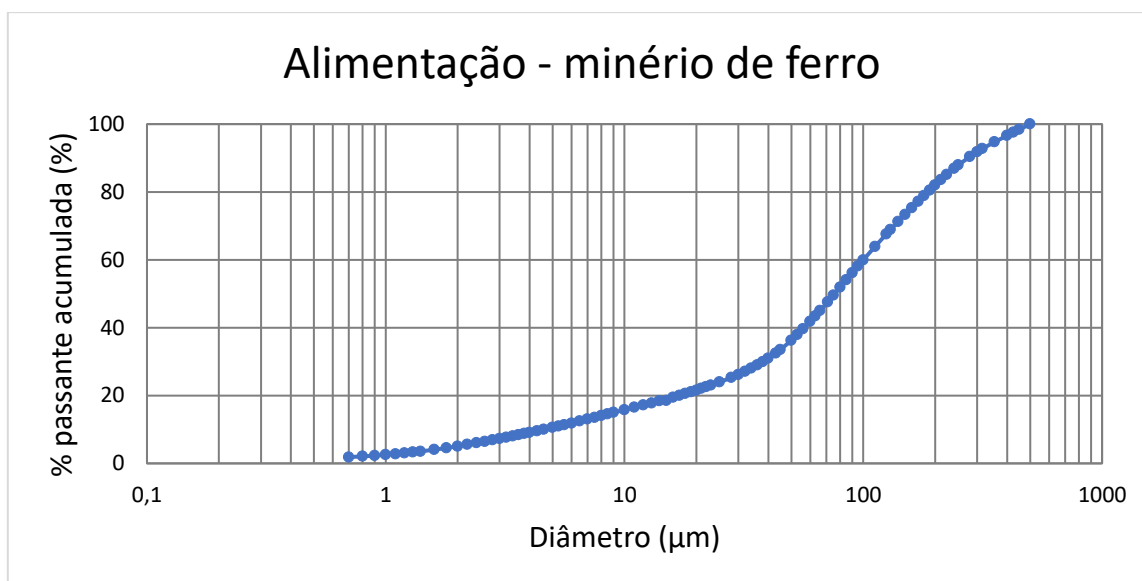


Figura 13: Análise granulométrica da alimentação de minério de ferro.

Tabela 2: Diâmetros encontrados para a alimentação de minério de ferro.

% passante acumulada (%)	Diâmetro (μm)
25	28
50	75
75	160
95	355

A mesma análise foi realizada para a alimentação de minério fosfático. A Figura 14 mostra a distribuição granulométrica e a Tabela 3, os diâmetros encontrados. Para o minério fosfático nota-se, analisando os resultados, que 50% da amostra possui granulometria inferior a 50 μm , ou seja, 50% das partículas passaram em uma peneira de abertura igual a 50 μm . Sendo assim a amostra de minério fosfático estava mais fina que a amostra de minério de ferro.

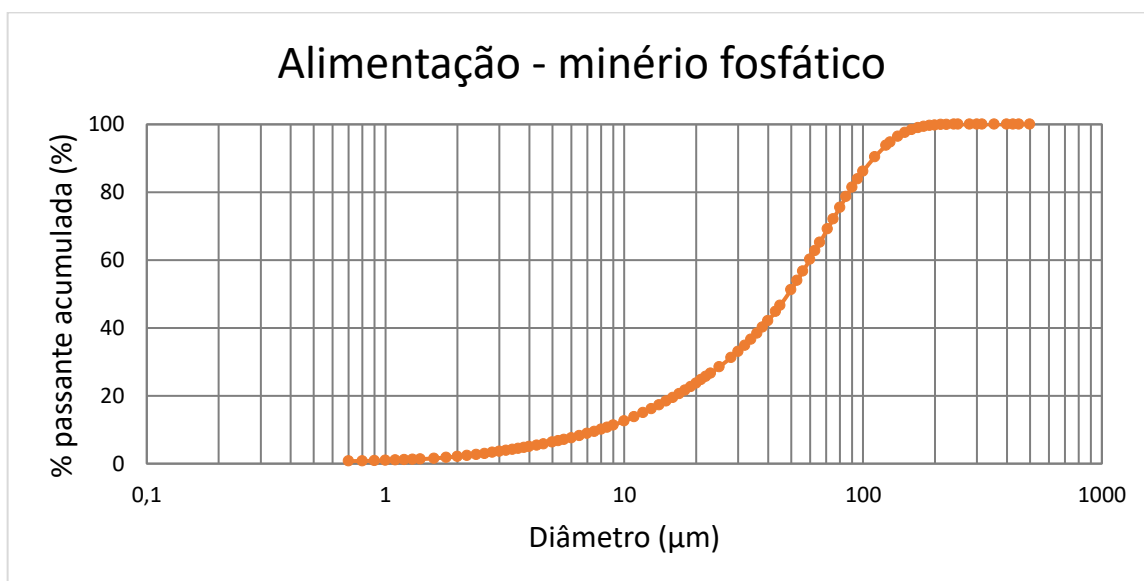


Figura 14: Análise granulométrica da alimentação de minério fosfático.

Tabela 3: Diâmetros encontrados para a alimentação de minério fosfático.

% passante acumulada (%)	Diâmetro (μm)
25	21
50	50
75	80
95	130

As amostras de minério de ferro e de minério fosfático utilizadas possuem densidade de 3,74 g/cm^3 e 2,78 g/cm^3 , respectivamente. Os resultados dos testes de picnometria estão apresentados no Apêndice A1.

4.2 Testes de hidrociclone

As Figuras 15 e 16 mostram resultados de análise granulométrica na pressão de 30 psi para os minérios de ferro e fosfático, respectivamente. As figuras mostram a separação por tamanho realizada pelo hidrociclone, a curva de alimentação está entre as curvas de *underflow* e *overflow*. Percebe-se ainda que quando a densidade é maior (minério de ferro), a classificação é mais eficiente. Isso é visto devido ao posicionamento das curvas de *underflow* e *overflow* que estão mais distantes da curva granulométrica da alimentação. O que pode ser explicado pela diferença de densidade observada nesses dois minérios, de acordo com Chaves (2012).

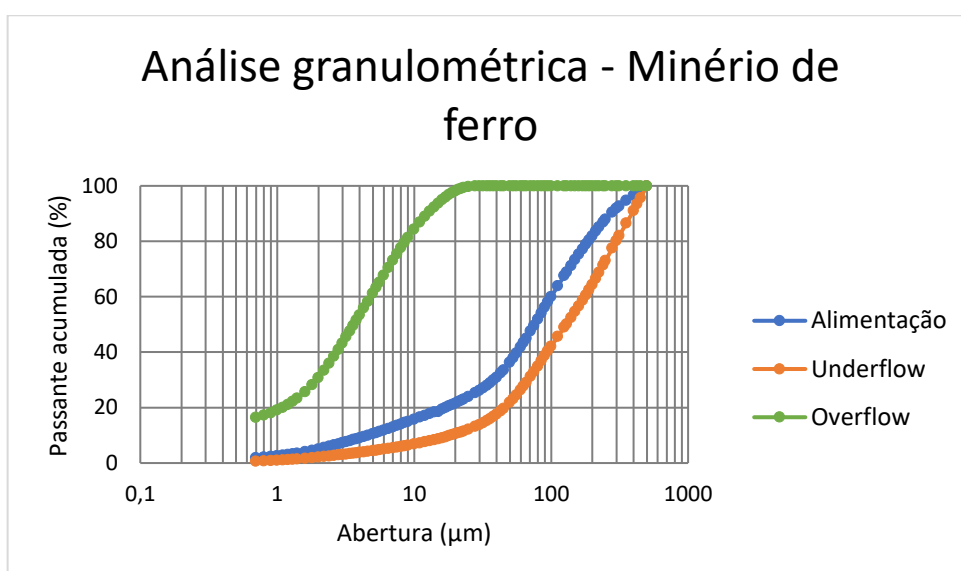


Figura 15: Análise granulométrica do minério de ferro após a classificação.

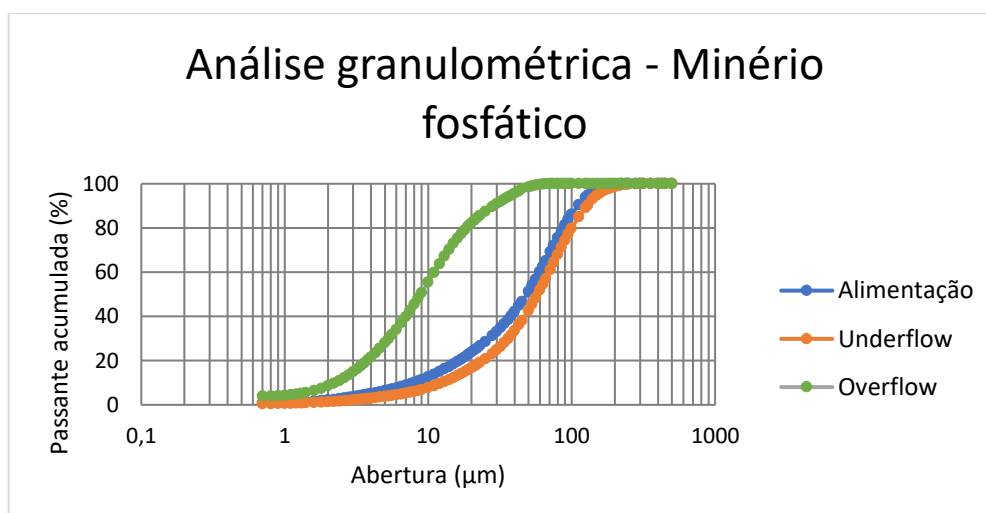


Figura 16: Análise granulométrica do minério fosfático após a classificação.

Além da análise granulométrica, é possível observar a maior eficiência na classificação através da análise do d_{95} do *overflow*, ou seja, o diâmetro onde 95% das partículas é passante. Percebe-se que para o minério com maior densidade, acarreta um valor menor de d_{95} , ou seja, o *overflow* é composto de partículas mais finas, apesar da granulometria da alimentação ser maior. Os valores encontrados para d_{95} para minério de ferro e minério fosfático são de 16 μm e 40 μm , respectivamente. Essa informação pode ser evidenciada através das curvas de análise granulométrica mostradas na Figura 17.

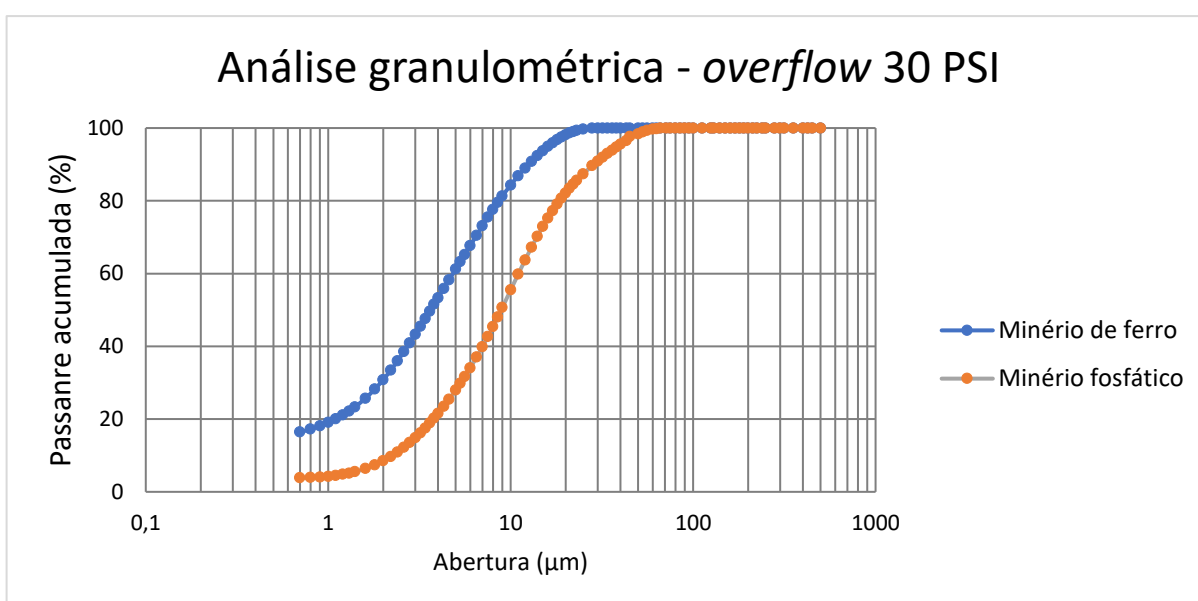


Figura 17: Análise granulométrica do *overflow*.

Através dos valores obtidos para massa de polpa, sólido e volume de água, foi possível montar uma tabela de eficiência. A Tabela 4, mostra os valores de eficiência total, relação de líquidos e eficiência total reduzida para cada ensaio utilizando minério de ferro. O teste de número 2 é uma réplica do teste de número 1. Já a Tabela 5 mostra os mesmos parâmetros para o minério fosfático, sendo que o teste 4 é uma réplica do teste 3.

Tabela 4: Eficiência total, relação de líquidos e eficiência total reduzida para os ensaios realizados utilizando minério de ferro.

Ensaio – Minério	Pressão (psi)	Corrente	W_p (g/min)	W_s (g/min)	% sólidos	ET (%)	RL (%)	E'T (%)
1 – Minério de ferro	10	<i>Overflow</i>	12.624,00	60,60	0,48	94,79	32,82	92,25
		<i>Underflow</i>	7.240,00	1103,56	15,24			
		Alimentação	19.864,00	1164,16	5,86			
1 – Minério de ferro	20	<i>Overflow</i>	17.064,00	77,88	0,46	95,48	30,58	93,49
		<i>Underflow</i>	9.128,00	1.645,96	18,03			
		Alimentação	26.192,00	1.723,84	6,58			
1 – Minério de ferro	30	<i>Overflow</i>	21.264,00	96,23	0,45	96,42	27,42	95,07
		<i>Underflow</i>	10.592,00	2.594,40	24,49			
		Alimentação	31.856,00	2.690,72	8,45			
2 – Minério de ferro	10	<i>Overflow</i>	12.240,00	56,80	0,46	95,26	32,54	92,97
		<i>Underflow</i>	7.016,00	1.140,28	16,25			
		Alimentação	19.256,00	1.197,08	6,22			
2 – Minério de ferro	20	<i>Overflow</i>	16.408,00	65,36	0,40	96,33	32,83	94,53
		<i>Underflow</i>	9.704,00	1.714,68	17,67			
		Alimentação	26.112,00	1.780,04	6,82			
2 – Minério de ferro	30	<i>Overflow</i>	20.760,00	79,76	038	97,27	29,17	96,14
		<i>Underflow</i>	11.360,00	2.841,28	25,01			
		Alimentação	31.120,00	2.921,00	9,09			

Tabela 5: Eficiência total, relação de líquidos e eficiência total reduzida para os ensaios realizados utilizando minério fosfático.

Ensaio – Minério	Pressão (psi)	Corrente	W_p (g/min)	W_s (g/min)	% sólidos	ET (%)	RL (%)	E'T (%)
3 – Minério fosfático	10	<i>Overflow</i>	7.664,00	86,20	1,12	86,38	37,72	78,14
		<i>Underflow</i>	5.136,00	546,96	10,65			
		Alimentação	12.800,00	633,16	4,95			
3 – Minério fosfático	20	<i>Overflow</i>	12.520,00	116,36	0,93	88,35	32,57	82,72
		<i>Underflow</i>	6.872,00	882,08	12,84			
		Alimentação	19.392,00	998,44	5,15			
3 – Minério fosfático	30	<i>Overflow</i>	15.328,00	131,80	0,86	90,13	29,07	86,09
		<i>Underflow</i>	7.432,00	1.204,04	16,20			
		Alimentação	22.2760,00	1.335,84	5,87			
4 – Minério fosfático	10	<i>Overflow</i>	9.008,00	120,32	1,34	86,03	35,94	78,19
		<i>Underflow</i>	5.728,00	740,96	12,94			
		Alimentação	14.736,00	861,28	5,84			
4 – Minério fosfático	20	<i>Overflow</i>	12.568,00	131,44	1,05	88,22	33,27	82,34
		<i>Underflow</i>	7.736,00	984,08	13,70			
		Alimentação	19.752,00	1.115,52	5,65			
4 – Minério fosfático	30	<i>Overflow</i>	14.944,00	139,76	0,94	90,38	30,26	86,21
		<i>Underflow</i>	7.736,00	984,08	12,72			
		Alimentação	22.680,00	1.123,84	4,96			

onde: W_p = vazão de polpa (g/min);

W_s = vazão de sólidos (g/min);

ET – eficiência total (%);

RL = relação de líquidos (%);

E'T = eficiência total reduzida

A Tabela 6 mostra o desvio padrão encontrado para a eficiência obtida em cada teste e sua réplica.

Tabela 6: Desvio padrão

Teste	Pressão	Desvio padrão
Minério de ferro	10	0,235
	20	0,425
	30	0,425
Minério fosfático	10	0,175
	20	0,065
	30	0,125

Através das tabelas observa-se que o aumento da pressão propiciou também um aumento da eficiência. Já quando se trata da densidade, percebe-se a mesma tendência, ou seja, o aumento da densidade acarreta aumento na eficiência. Além disso, nota-se que os maiores valores para porcentagem de sólidos obtidos pelo *underflow* e os menores para *overflow* foram encontrados quando a densidade era maior. Outra observação é que a relação de líquidos foi menor nos testes usando minério com maior densidade, o que acarretou a menor diferença entre a eficiência total e a eficiência total reduzida, ou seja, um *by pass* menor.

As Figuras 18 e 19 mostram a comparação entre a curva de partição e a curva de partição corrigida para os minérios de ferro e fosfático, respectivamente, considerando a pressão de alimentação igual 10 psi. Para o minério fosfático, percebe-se a maior influência da relação de líquidos devido ao maior distanciamento das duas curvas. Essa maior relação de líquidos indica maior proporção de partículas finas direcionada para o *underflow* sem sofrer classificação, ou seja, maior *by pass* para o minério fosfático. Esse comportamento pode ser devido a granulometria mais fina do minério fosfático ($d_{95} = 130 \mu\text{m}$) em relação ao minério de ferro ($d_{95} = 355 \mu\text{m}$). O mesmo resultado foi obtido analisando as curvas das pressões de 20 e 30 psi.

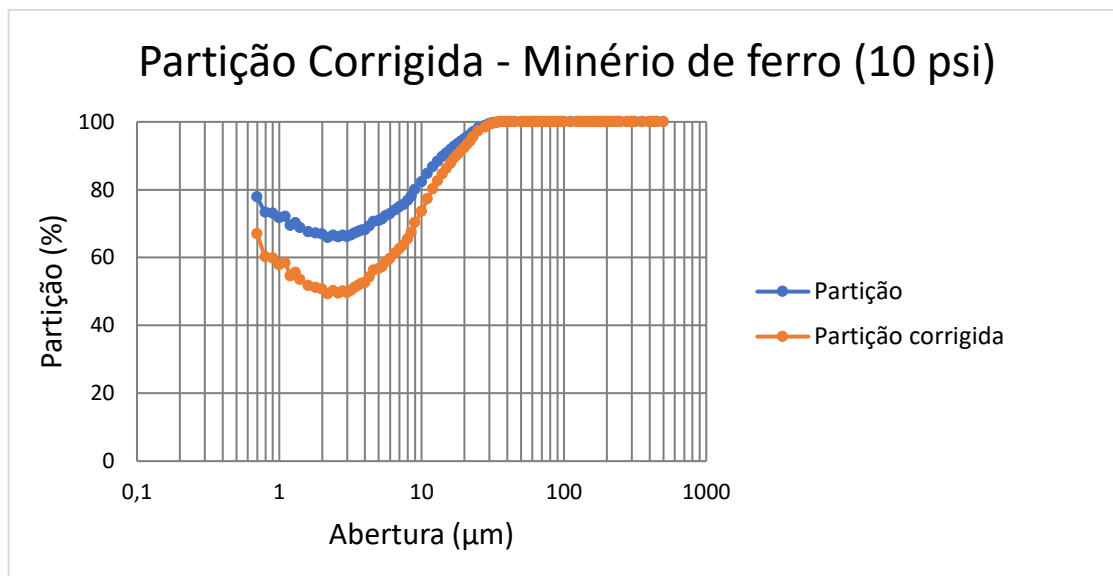


Figura 18: Comparação das curvas de partição e partição corrigida para o minério de ferro na pressão de 10 psi.

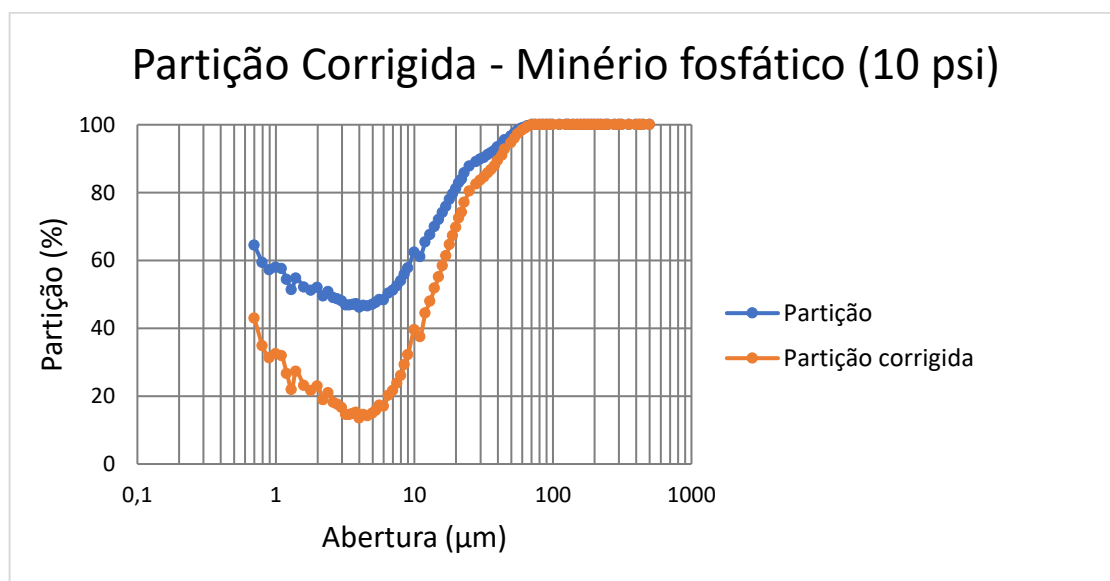


Figura 19: Comparação das curvas de partição e partição corrigida para o minério fosfático na pressão de 10 psi.

Como é visto nas Figuras 18 e 19 houve um aumento da eficiência para partículas que se encontram abaixo de 5 μm . Isso pode ter ocorrido devido a imprecisão da análise para partículas com granulometria tão fina.

Outro ponto a ser analisado é o tipo de descarga do *apex*. Observou-se que nos ensaios realizados para os dois minérios estudados, o tipo de descarga encontrada foi a descarga em cordão. Isso significa que há um subdimensionamento do *apex*, ou seja, o hidrociclone começa a ser utilizado também como separador

sólido-líquido. As Figuras 20 e 21 mostram a descarga do *apex* para o minério de ferro e para o minério fosfático, respectivamente.



Figura 20: Descarga do *apex* com minério de ferro.



Figura 21: Descarga do *apex* com minério fosfático.

4.3 Planejamento fatorial

Com os resultados de eficiência descritos na Tabela 6 foi realizada a análise estatística por meio de planejamento fatorial através do *software* Minitab. Dessa forma fez-se uma previsão de qual densidade e pressão devem ter sido utilizadas para aumentar a eficiência do sistema.

Os níveis máximo e mínimo de pressão, 10 e 30 psi, foram utilizados para análise no *software*. A Figura 22, mostra o Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados para as pressões de 10 e 30 psi.

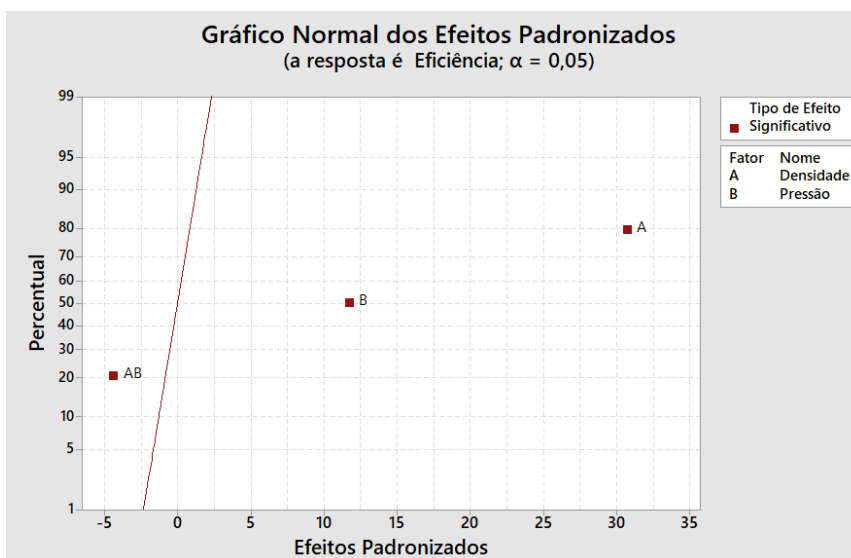


Figura 22: Gráfico Normal dos Efeitos Padronizados para as pressões de 10 e 30 psi.

Com base nesse gráfico, é possível perceber que as duas variáveis em questão (pressão e densidade) são significativas e a interação de ambas também pois estão distantes da reta. A densidade, por estar mais afastada da reta, é a que possui maior influência sobre a eficiência do hidrociclone.

Pode-se observar também que tanto pressão quanto densidade estão do lado direito da reta (efeitos principais), o que significa que ambas influenciam positivamente na eficiência do hidrociclone. Em outras palavras, quando há aumento da densidade e aumento da pressão há aumento da eficiência.

Isso não acontece quando se leva em conta a interação da pressão com a densidade (efeito de interação), ou seja, a interação de ambas interfere negativamente na eficiência. Pode-se chegar a essa conclusão pois a interação está localizada do lado esquerdo da reta.

A Figura 23 mostra o Gráficos de Efeitos Principais para a eficiência. Esse gráfico confirma a interferência positiva dos efeitos principais na eficiência. Pode-se observar que quando as variáveis passam do valor codificado “-1” para o valor codificado “+1”, ou seja, passam do menor valor para o maior valor de pressão e de densidade, a reta apresenta sentido crescente.

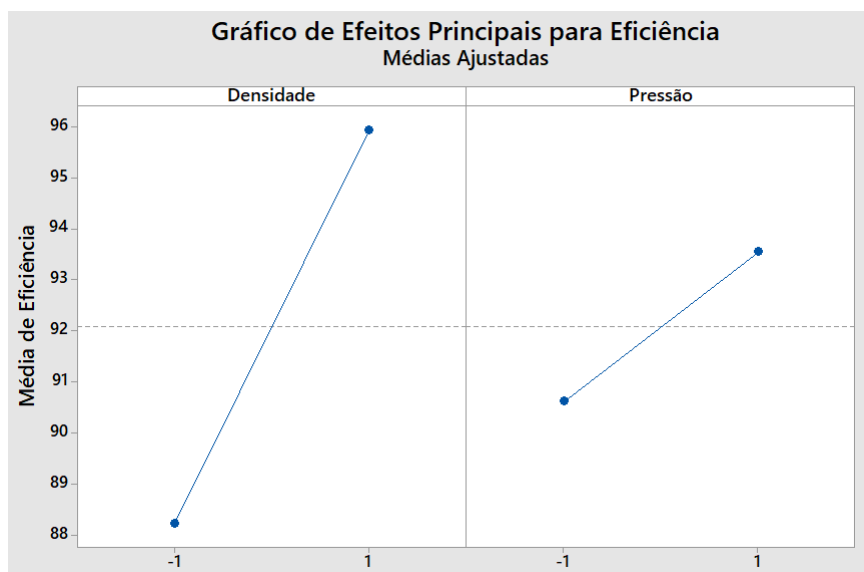


Figura 23: Gráfico de Efeitos Principais para Eficiência para as pressões de 10 e 30 psi.

Por fim, encontrou-se as melhores condições após otimização dos ensaios, buscando maximizar o valor de eficiência. Percebe-se que para obter o resultado de eficiência otimizado, é necessário utilizar a pressão e a densidade com o índice codificado “+1”, ou seja, a maior pressão e maior densidade, 30 psi e 3,9 g/cm³ respectivamente. Utilizando esse conjunto de fatores, a eficiência (y) foi de 96,845%, como mostrado na Figura 24. Além disso o valor do fator desejabilidade (d) também mostrou um bom resultado pois quanto mais próximo esse valor for de 1, mais perto se chega do resultado otimizado.

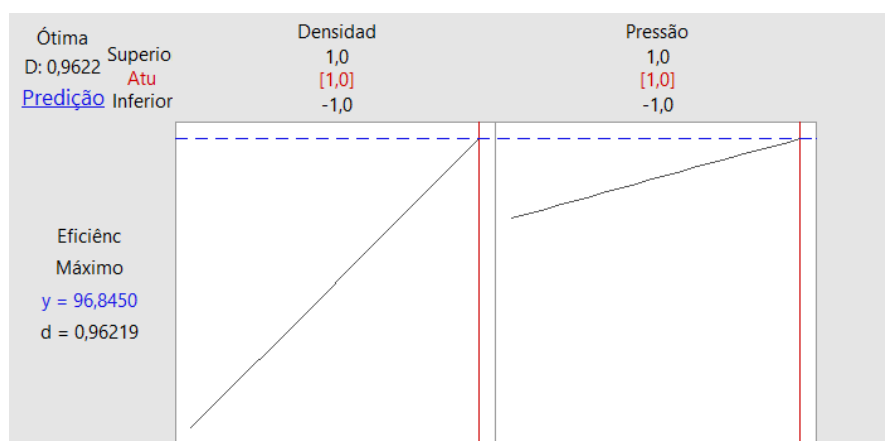


Figura 24: Otimização da eficiência utilizando as pressões de 10 e 30 psi.

A influência da pressão e da densidade ainda pode ser observada através das curvas de partição construídas. As Figuras 25 e 26, mostram as curvas de partição

para os ensaios com os minérios de ferro e fosfático, respectivamente, comparando a influência da pressão sobre eles.

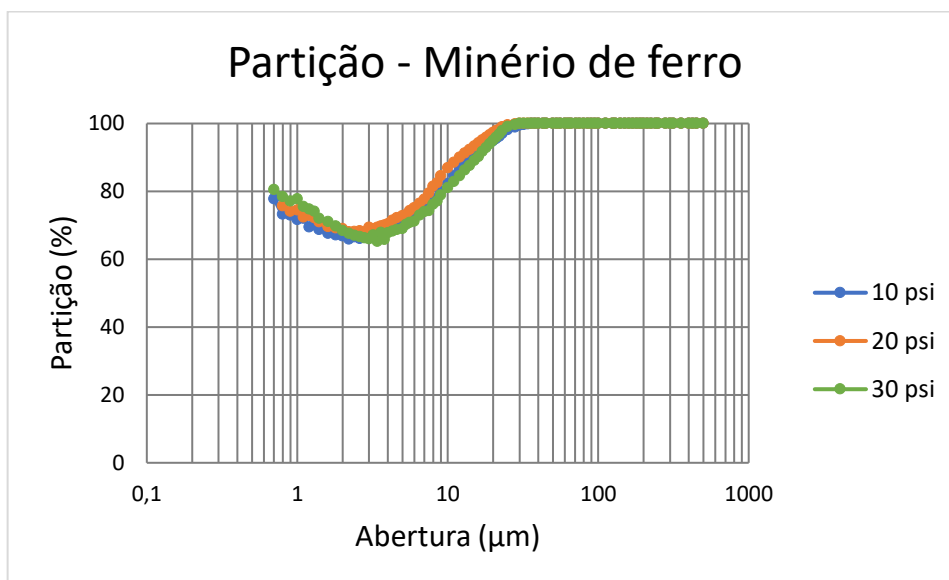


Figura 25: Curvas de partição comparando as pressões utilizadas para o ensaio com minério de ferro.

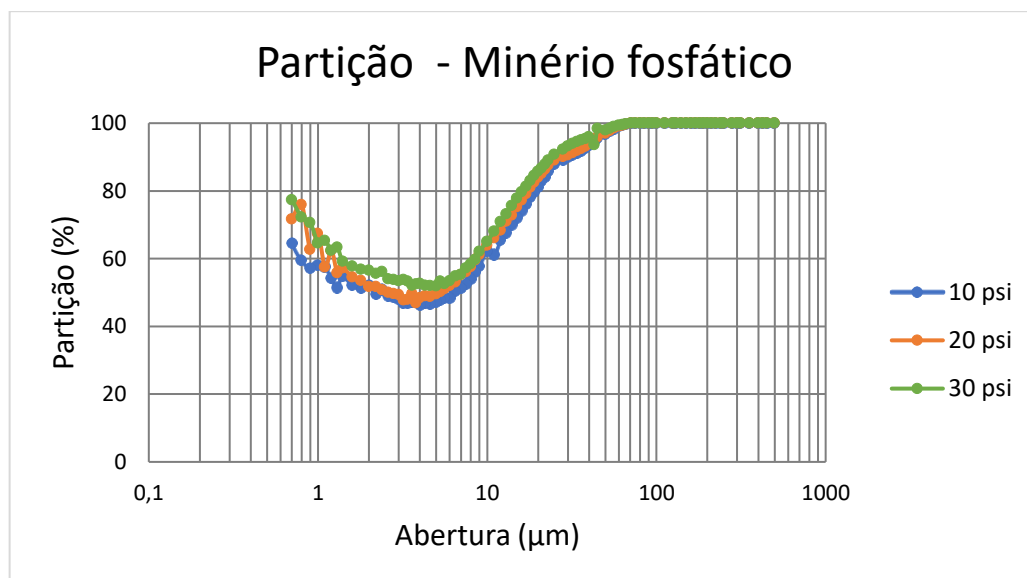


Figura 26: Curvas de partição comparando as pressões utilizadas para o ensaio com minério de fosfático.

Em relação às curvas de partição do minério de ferro, não se observou nitidamente o efeito da pressão no corte devido a maior densidade. Já para o minério fosfático, nota-se que à medida que se aumenta a pressão há um afinamento do. Isso confirma o que é mencionado por Luz *et al.* (2010). Percebe-se então, que a pressão

influenciou de forma mais significativa no corte do minério com menor densidade, devido ao efeito de interação mencionado anteriormente.

Já as Figuras 27, 28 e 29, mostram as curvas de partição comparando-se as duas densidades utilizadas nos ensaios em cada nível de pressão.

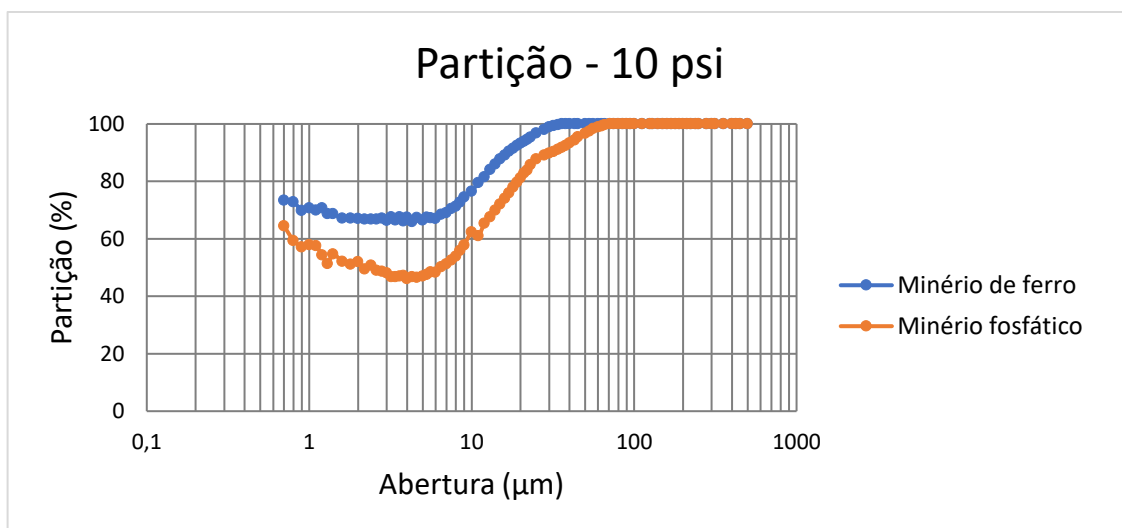


Figura 27: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 10 psi.

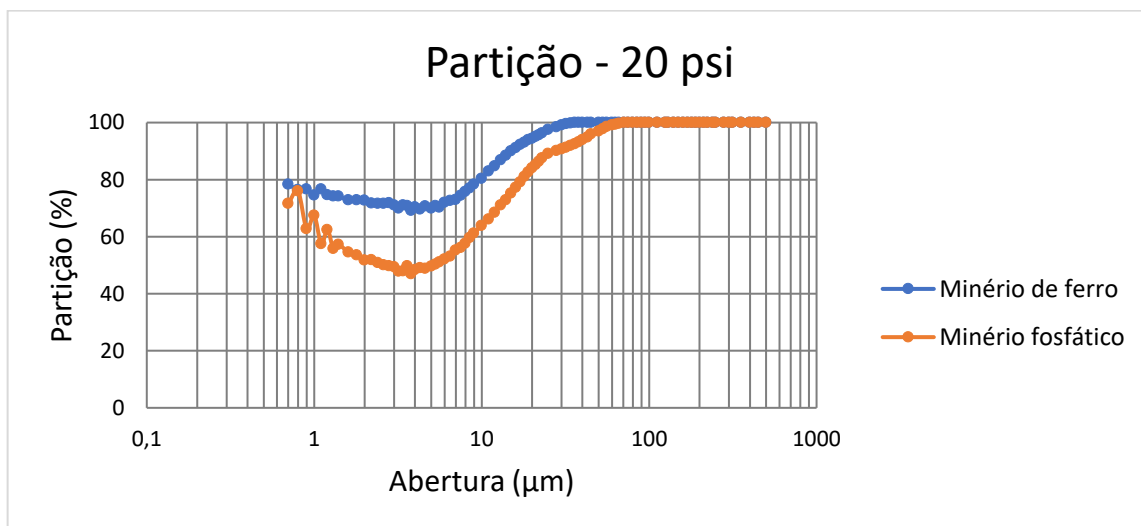


Figura 28: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 20 psi.

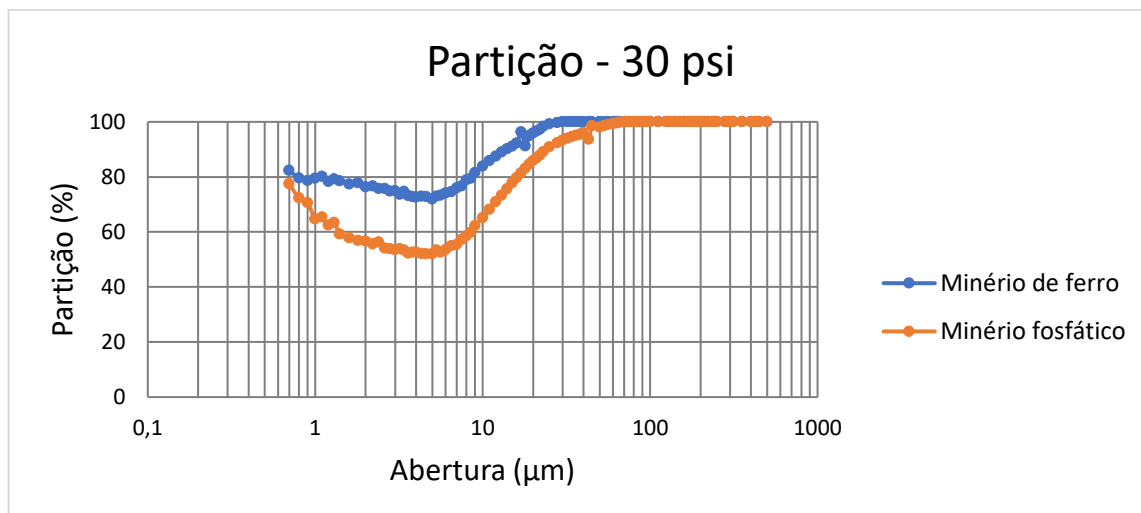


Figura 29: Curvas de partição comparando as densidades utilizadas para os ensaios com a pressão de 30 psi.

A Figura 29 mostra que para o minério fosfático 60% das partículas de 10 μm são direcionadas para o *underflow* enquanto que no minério de ferro esse percentual corresponde a 78%.

5 CONCLUSÕES

Através da realização desse trabalho foi possível estudar o efeito da densidade sobre a classificação nos hidrociclones. Ademais, com a utilização de planejamento fatorial foi possível obter os valores ótimos de pressão e densidade de sólidos, assim como foi proposto nos objetivos geral e específicos.

As densidades encontradas para os minérios de ferro e fosfático foram de 3,74 g/cm³ e 2,78 g/cm³, respectivamente. Conclui-se, por meio da análise das curvas granulométricas, que a maior densidade acarreta a classificação em menores diâmetros e em um valor de d_{95} do *overflow* menor.

A maior eficiência pode ser obtida através do cálculo da partição. A maior densidade gerou a maior eficiência total, menor relação de líquidos e maior eficiência total reduzida, ou seja, foi melhor para a separação sólido-líquido. Além disso, foram encontrados os maiores valores de porcentagem de sólidos do *underflow* e menores para o *overflow*. Conclui-se ainda que o aumento da densidade, bem como o aumento de pressão, gera maior eficiência.

Quando se trata da descarga do *apex*, conclui-se que tanto para o minério de ferro quanto para o minério fosfático foi observada descarga em cordão.

Através da realização do planejamento fatorial, previu-se que tanto a densidade quanto a pressão são variáveis significativas e interferem positivamente sobre o sistema, sendo que a densidade é mais significativa. Além disso, os valores otimizados encontrados para pressão e densidade foram respectivamente de 30 psi e 3,74g/cm³. O valor de eficiência otimizado foi de 96,85% e o valor do fator desejabilidade foi de 0,96.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, pode-se fazer uma repetição dos testes utilizando as amostras com a mesma granulometria. Outra sugestão é alterar a porcentagem de sólidos para verificar a interferência da densidade da polpa na operação do hidrociclone.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, C. A. K. de. **Comportamento do hidrociclone filtrante frente às modificações no diâmetro de *underflow* e no tubo de *vortexfinder***. 2008. 89p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2008.

ALVES, J. V. B. **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**. 2012. 90p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2012.

ALVES, L. P. **Ajuste do modelo Narasimha-Mainza à deslamagem de minério de ferro itabirítico em hidrociclones**. 2019. 107p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 2019.

ANDRADE, V. T. de. **Construção e avaliação de modelos de hidrociclone para tratamento de água residuária**. 2007. 74p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, 2007.

Agência Nacional da Mineração. **Sumário Mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019, 211 p. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017>. Acesso em novembro de 2019.

BAI, Z., WANG, H. **Numerical Simulation of the Separating Performance of Hydrocyclones**. *Chemica IEngineering & Techonology*. V.29. no.10. p.1161-1166. 2006.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. São Paulo: Edgard Blücher LDTA., 1987, 143 p.

BICALHO, I. C. **Concentração de leveduras da fermentação alcoólica em hidrociclones**. 2011. 154p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2011.

CARVALHO, P.S.L., SILVA, M.M., ROCIO, M.A.R., MOSZKOWICZ, J. **Minério de Ferro**. 2014. BNDES Setorial, 39, 197-234.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de polpa e classificação**. 4ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, 303 p.

COUTO, H. J. B.; FRANÇA, S. C. A. **Avaliação da deslamagem de um minério de ferro sulfetado utilizando diferentes geometrias de hidrociclones**. In: XXVI ENTEMME, 2013, Goiânia. Livro de Anais XXV ENTMME, 2013, v.1, p.469-476.

Departamento Nacional de Pesquisa Mineral. **Economia mineral do Brasil**. Brasília: DNPM, 2009. Cap 7. p. 546-568. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/outras-publicacoes>>. Acesso em maio de 2019.

DOS ANJOS, R. P.; MEDRONHO, R. A.; FIGUEREDO-CARDERO, A. **Análise da tensão de cisalhamento em hidrociclones para a separação de células animais.** In: XX COBEQ, 2014, Florianópolis. Livro de Anais do XX CBEQ, 2014.

FINKIE, R. L. **Influência da densidade de partículas no desempenho do ciclone.** 2003. 92p. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2003.

GAMA, A. J. A., FIGUEIRÊDO, J. M. R., CARTAXO J. M., GAMA M. A., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C. **Influência das variáveis de processo do hidrociclone para tratamento de argilas esmectíticas.** In: Cerâmica, 2017, São Paulo. Livro de anais Cerâmica, 2017. V.63, p. 336 – 342.

GONÇALVES, S. M.; KYRIAKIDIS, Y. N. BARROZO, M. A. S., VIEIRA L.G.M. **Estudo do efeito do percentual volumétrico de sólidos alimentado em hidrociclone.** In: XXXVI ENTMME, 2015, Poços de Caldas. Livro de anais do XXVI ENTMME, 2015. v. 1.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2010, 963 p.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais:** usos e especificações. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2005. Cap. 5, p. 141-170.

MEDRONHO, R. A. **Scale-up of hydrocyclones at low feed concentrations,** Inglaterra, 1984. Tese de Ph.D Universidade de Bradford.

MELO, C. H. de. **Modelagem da classificação de minério de ferro em hidrociclones.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003441.pdf>>. Acesso em maio de 2019.

MENDES, W. J. P. **Avaliação de placas de poliuretano como revestimento de hidrociclone.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica – Unidade Araxá. 2015. Disponível em: <http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Whalex_Jose_Pereira_Mendes.pdf>. Acesso em maio de 2018.

Ministério de Minas e Energia. **Relatório Técnico 53 Perfil do Fosfato:** MME 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P29_RT53_Perfil_do_Fosfato.pdf/48caf3fe-b399-4032-9337-d63ce39b218d>. Acesso em maio de 2019.

MOURA, A. D.; MOURA, T. R.; ALMEIDA, A. R. F. **Análise e projeto de hidrociclones para o processamento de lodo provido na indústria têxtil.** In: XX COBEQ, 2014, Florianópolis. Livro de Anais do XX CBEQ, 2014.

OLIVEIRA, M. dos S. **Minério Fosfático Sílico-Carbonatado: Estudo Fundamental**. 2007. 223p. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

OLIVEIRA, M. dos S.; SOUZA, M. D. de. **Tratamento de Minérios**. Curso Técnico em Mineração. 2012. Notas de Aula. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

PEIXOTO, E. M. A. **Elemento Químico: Fósforo**. *Química nova na escola* (nº 15), 51. 2002.

QUARESMA, L. F. **Balço Mineral Brasileiro**. Departamento Nacional Pesquisa Mineral, 2001. 27p.

RIBEIRO, M. C.; OLIVEIRA, M. S.; CUNHA, M. V. **Efeito de variáveis operacionais no corte de um hidrociclone**. In: XXVI ENTMME, 2015, Poços de Caldas. Livro de Anais XXVI ENTMME, 2015. v. 1. p. 599-605.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais/Ed.** – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. Cap7. P. 137-154.

SANTOS, B. de C. **Avaliação da eficiência da deslamagem de minério de ferro via decantação e hidrociclone**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica – Unidade Araxá. 2018. Disponível em: <<http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Bianca-de-Castro-Santos.pdf>>. Acesso em maio de 2019.

SANTOS, L. H. **Classificação em meio fluido: Cominuição e Classificação**, 01 ago. – 01 dez. de 2017. 100 f. Notas de aula.

SIMÕES, A. M. B. M. **Simulação numérica da fluidodinâmica de um hidrociclone aplicado na separação óleo/água**. 2005. 111p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2005.

SOCCOL, O. J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. 109p. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo – MG, 2003.

SVAROVSKY, L. **Hydrocyclones**. Londres: Holt, Rinehart and Winston, 1984.

Tecnologia viabiliza tratamento mineral. **Revista M&T**, 2018. Disponível em: <<http://www.revistamt.com.br/Materias/Exibir/tecnologia-viabiliza-tratamento-mineral>>. Acesso em dezembro de 2019.

VALADÃO, George E. S., ARAUJO, Armando C. de. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007, 234 p.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral Processing Technology**. 7ª ed. Austrália: Elsevier, 2006, 444p.

APÊNDICE A.1 - DENSIDADES

Tabela 7: Densidade média do minério de ferro.

A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ρ_s (g/cm³)	ρ_s média (g/cm³)	Desvio padrão
31,37	33,78	83,70	81,93	3,77		
30,64	33,54	83,55	81,44	3,67	3,74	0,05
30,61	33,30	82,07	80,09	3,79		

Tabela 8: Densidade média do minério fosfático.

A1 (g)	A2 (g)	A3 (g)	A4 (g)	ρ_s (g/cm³)	ρ_s média (g/cm³)	Desvio padrão
15,73	16,72	41,93	41,29	2,83		
15,42	16,49	41,71	41,03	2,74	2,78	0,04
16,17	17,19	42,62	41,97	2,76		

APÊNDICE A.2 – CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS

Tabela 9: Teste 1 - Minério de ferro.

Fluxo	Pressão (psi)	m_p (g)	W_p (g/min)	m_s (g)	W_s (g/min)	V_a (cm³)	V_p (cm³)	V_s (cm³)
<i>Over</i>	10	3.156,00	12.624,00	15,15	60,60	3.140,85	3.300,00	4,05
<i>Over</i>	20	4.266,00	17.064,00	19,47	77,88	4.246,53	4.400,00	5,21
<i>Over</i>	30	5.316,00	21.264,00	24,08	96,32	5.291,92	5.400,00	6,44
<i>Under</i>	10	1.810,00	7.240,00	275,89	1.103,56	1.534,11	1.800,00	73,77
<i>Under</i>	20	2.282,00	9.128,00	411,49	1.645,96	1.870,51	2.000,00	110,02
<i>Under</i>	30	2.648,00	10.592,00	648,60	2.594,4	1.999,40	2.300,00	173,49

Tabela 10: Teste 2 - Minério de ferro.

Fluxo	Pressão (psi)	m_p (g)	W_p (g/min)	m_s (g)	W_s (g/min)	V_a (cm³)	V_p (cm³)	V_s (cm³)
<i>Over</i>	10	3.060,00	12.240,00	14,20	56,8	3.045,80	3.300,00	3,80
<i>Over</i>	20	4.102,00	16.408,00	16,34	65,36	4.085,66	4.300,00	4,37
<i>Over</i>	30	5.190,00	20.760,00	19,94	79,76	5.170,00	5.400,00	5,33
<i>Under</i>	10	1.754,00	7.016,00	285,07	1.140,28	1.468,00	1.600,00	76,22
<i>Under</i>	20	2.426,00	9.704,00	428,67	1.715,68	1.997,33	2.300,00	114,62
<i>Under</i>	30	2.840,00	11.360,00	710,32	2.841,28	2.129,68	2.500,00	189,93

Tabela 11: Teste 3 - Minério fosfático.

Fluxo	Pressão (psi)	m_p (g)	W_p (g/min)	m_s (g)	W_s (g/min)	V_a (cm³)	V_p (cm³)	V_s (cm³)
<i>Over</i>	10	1.916,00	7.664,00	21,55	86,20	1.894,45	2.000,00	7,75
<i>Over</i>	20	3.310,00	13.240,00	29,09	116,36	3.100,91	3.300,00	10,46
<i>Over</i>	30	3.832,00	15.328,00	32,95	131,80	3.799,15	4.000,00	11,85
<i>Under</i>	10	1.284,00	5.136,00	136,74	546,96	1.147,26	1.300,00	49,19
<i>Under</i>	20	1.718,00	6.872,00	220,52	882,20	1.497,48	1.500,00	79,32
<i>Under</i>	30	1.858,00	7.432,00	301,01	1.204,04	1.556,99	1.600,00	108,28

Tabela 12: Teste 4 - Minério fosfático.

Fluxo	Pressão (psi)	m_p (g)	W_p (g/min)	m_s (g)	W_s (g/min)	V_a (cm³)	V_p (cm³)	V_s (cm³)
<i>Over</i>	10	2.252,00	9,008,00	30,08	120,32	2.221,92	2.100,00	10,82
<i>Over</i>	20	3.142,00	12.568,00	32,86	131,44	3.109,14	3.300,00	11,82
<i>Over</i>	30	3.736,00	14.944,00	34,94	139,76	3.701,06	3.900,00	12,57
<i>Under</i>	10	1.432,00	5.728,00	185,24	546,96	1.246,76	1.400,00	66,63
<i>Under</i>	20	1.796,00	7.184,00	246,02	984,08	1.549,98	1.700,00	88,50
<i>Under</i>	30	1.934,00	7.736,00	328,26	1.313,04	1.605,74	1.700,00	118,08

onde,

m_p = massa de polpa (g);

W_p = vazão de polpa (g/min);

m_s = massa de sólidos (g);

W_s = vazão de sólidos (g/min);

V_a = volume de água (cm³);

V_p = volume de polpa (cm³);

V_s = volume de sólidos (cm³).