



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

BIANCA DE CASTRO SANTOS

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA DESLAMAGEM
DE MINÉRIO DE FERRO VIA DECANTAÇÃO E
HIDROCICLONAGEM**

ARAXÁ/MG

2018

BIANCA DE CASTRO SANTOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA DESLAMAGEM DE
MINÉRIO DE FERRO VIA DECANTAÇÃO E
HIDROCICLONAGEM

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 título de Engenharia de Minas.

Orientador: Prof^a. Me. Tamiris Fonseca de Souza

ARAXÁ

2018


BIANCA DE CASTRO SANTOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA DESLAMAGEM DE
MINÉRIO DE FERRO VIA DECANTAÇÃO E
HIDROCICLONAGEM

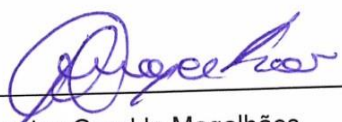
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Minas, do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
- CEFET/MG, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenharia
de Minas.

Araxá, 28 de Junho de 2018.

Banca examinadora:



Me. Tamiris Fonseca de Souza



Me. Douglas Geraldo Magalhães



Me. Guilherme Alzamora Mendonça

AGRADECIMENTO

Agradeço à Deus pela vida abençoada que tenho, pela oportunidade que Ele me deu de cursar uma faculdade, agradeço pelas pessoas certas que só estão no meu caminho graças à Ele e agradeço pela companhia Divina que sempre tive na minha caminhada.

À minha família por todo o apoio, toda a compreensão, toda dedicação e por todo amor que sempre foi direcionado à mim.

Aos meus orientadores Leandro e Tamiris pela orientação, por transmitirem seu conhecimento à mim, por sempre serem tão disponíveis e por toda a ajuda que me deram neste ano. Sem vocês a conclusão deste trabalho não seria possível.

Ao Patric pela paciência, pelo incentivo, por todo auxílio e principalmente por todo suporte. Aos meus amigos por sempre me escutarem e por me darem força em todo momento.

Ao João Victor e ao João Antônio por toda a assistência que me deram no laboratório, por toda calma, pela dedicação e por sempre me ajudarem da forma mais competente possível.

*São as nossas escolhas que revelam o que realmente somos,
muito mais do que nossas qualidades.*

Alvo Dumbledore

RESUMO

A escassez de depósitos com grandes concentrações de minério de ferro faz com que os empreendimentos mineiros recorram a depósitos com teores mais baixos. Os minérios advindos de tais depósitos necessitam de etapas mais elaboradas de concentração, como a flotação, para que sejam adequados às especificações do mercado. A etapa de flotação tem como base a adsorção de reagentes sobre as partículas minerais, bem como a diferença de molhabilidade destas. A presença de minerais com granulometria abaixo de 38 μm é capaz de impactar negativamente nesta etapa através do fenômeno de *slime coating*, reduzindo a eficiência da operação. Sendo assim, é necessário adicionar uma etapa de deslamagem antes da flotação. A deslamagem faz referência à retirada das lamas através de equipamentos deslamadores para que a operação de flotação ocorra sem a interferência de partículas muito finas. Portanto, o presente trabalho estuda dois métodos de deslamagem: hidrociclonagem e decantação. Para ambos os métodos foram realizados ensaios variando parâmetros importantes a fim de descobrir a melhor forma de deslamagem de itabirito em laboratório. Ao fim dos ensaios foi possível determinar o melhor cenário para deslamagem através de hidrociclonagem e decantação. Além disso, o estudo efetuou um comparativo entre estes e determinou os mais eficientes como sendo a deslamagem via hidrociclonagem com a porcentagem de sólidos igual a 10% e a pressão do equipamento igual a 30 psi, e para a deslamagem via cuba foi o ensaio com 20% de sólidos. Entre os dois melhores ensaios citados acima, o método mais eficiente foi via hidrociclonagem, por conter menor porcentagem de partículas com granulometria abaixo de 38 μm no *underflow*.

Palavras-chave: Minério de ferro, Itabirito, deslamagem, hidrociclonagem, decantação.

ABSTRACT

Shortage of deposits with large concentrations of iron ore is causing mining to be forced to resort to deposits with lower contents of ore. Iron ores from these deposits require more elaborate stages of concentration, such as flotation, to meet market specifications. The flotation process is based on the adsorption between mineral particles and reagents, as well as the affinity differences between these particles and water. The presence of minerals with very low granulometry will subsequently form the slimes, which can cause the slime coating effect, which negatively impacts the flotation, reducing the efficiency of the process. Therefore, it is necessary to add a desliming stage before this step. The desliming refers to the removal of sludge through equipment so that the flotation process occurs without the interference of very fine particles. The present work studies two methods of desliming: hydrocyclonation and decantation, for both methods tests were performed varying important parameters in order to discover the best form remove slime from the itabirite. At the end of the tests it was possible to determine the best scenario for desliming using and hydrocyclonation and decantation. In addition, the study made a compative between these and determined the most efficient. The most efficient scenario for desliming using hydrocyclone was the percentage of solids equal to 10% and the equipment pressure equal to 30 psi and for sedimentation delamination was the 20% solids test. Between the two best tests cited above, the most efficient method was hydrocyclone, because it contained a lower percentage of fines on underflow.

Keywords: Iron ore; Itabite; Desliming; Hydrocyclonation; Decantation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática de um hidrociclone.	22
Figura 2: Representação dos três tipos de descarga do ápex.....	25
Figura 3: (a) Peneira utilizada no peneiramento manual, e (b) peneiras utilizadas no peneirador de bancada.	29
Figura 4: (a) Moinho de bolas, e (b) corpos moedores cerâmicos.	30
Figura 5: (a) Material moído abaixo de 28#, e (b) material moído acima de 28#.....	31
Figura 6: Homogeneização do material passante em 100#.....	31
Figura 7: Etapas da picnometria.	32
Figura 8: Etapas do quarteamento do material passante em 100#.	34
Figura 9: (a) Hidrociclone e (b) reservatório.	36
Figura 10: Cuba de deslamagem.....	39
Figura 11: Curva granulométrica da amostra final.	42
Figura 12: Curva granulométrica - 30 psi e 5% de sólidos.....	44
Figura 13: Curva granulométrica - 5% e 15 psi.....	45
Figura 14: Curvas granulométricas de 30 psi e 10% de sólidos.	46
Figura 15: Curvas granulométricas - 15 psi e 10% de sólidos.....	47
Figura 16: Grafico redução de finos versus porcentagem de sólidos. ...	48
Figura 17: Curvas granulométricas - 20% de sólidos - Cuba.....	49
Figura 18: Curva granulométrica - 10%.	50
Figura 19: Comparativo underflow - cuba.....	51
Figura 20: Porcentagem de sólidos versus porcentagem de redução de finos no underflow - cuba.....	51
Figura 21: Comparativo entre métodos - underflow.....	52
Figura 22: % de sólidos versus % redução - Comparativo.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reservas e produção mundial de minério de ferro – 2014. ...	15
Tabela 2: Planejamento fatorial dos testes de hidrociclonagem.	36
Tabela 3: Malhas usadas na análise granulométrica do overflow e do underflow.	38
Tabela 4: Planejamento fatorial dos testes de hidrociclonagem.	40
Tabela 5: Dados da análise química.....	43
Tabela 6: Valores de densidade de polpa.....	43
Tabela 7: Parâmetros dos ensaios da cuba.....	49

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Aspectos gerais	14
2.2 Panorama mundial.....	15
2.3 Panorama nacional.....	16
2.4 Origem do material	16
2.5 Flotação.....	17
2.6 Deslamagem.....	18
2.7 Deslamagem de minério de ferro.....	20
2.7.1 Hidrociclonagem.....	21
2.7.2 Decantação	26
3. METODOLOGIA.....	29
3.1 Preparação da amostra	29
3.2 Ensaios de deslamagem via hidrociclonagem e decantação	35
3.2.1 Hidrociclone.....	35
3.2.2 Cuba.....	39
4. RESULTADOS	42
4.1 Preparação e caracterização da amostra utilizada nos testes de deslamagem	42
4.2 Hidrociclonagem.....	43
4.2.1 Comparativo entre os testes.....	47
4.3 Decantação	48
4.3.1 Comparativo entre os dois testes	50
4.4 Comparativo entre os métodos.....	52
5. CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS	56

APÊNDICE 1 – DADOS DA PICNOMETRIA	59
APÊNDICE 2 – DADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	61

1. INTRODUÇÃO

O ferro é um dos elementos de maior ocorrência na crosta terrestre, apresentando concentração média de 4,2%. Porém, devido à grande demanda deste elemento, suas reservas minerais de alto teor estão cada vez mais escassas, tornando necessário o aproveitamento das reservas de menor teor (REIS, 2004). Para os minérios de ferro de altos teores, as operações de beneficiamento se baseiam apenas em cominuição e classificação. Entretanto, para minérios de baixos teores, é necessário inserir etapas de concentração, por métodos gravíticos, magnéticos ou flotação (NASCIMENTO, 2010).

O método mais utilizado na concentração de minério de ferro é a flotação catiônica reversa de ferro. Nessa operação, a diferenciação entre as espécies minerais é dada pela capacidade de suas partículas se aderirem às bolhas de gás (geralmente ar). Se uma partícula consegue capturar um número suficiente de bolhas, a densidade do conjunto partícula-bolha torna-se menor que a do fluido e o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado numa espuma, enquanto que as partículas das demais espécies minerais permanecem na polpa mineral (CHAVES, 2010).

As operações de cominuição geram partículas de granulometria abaixo de 38 μm (lamas), que quando presentes na flotação, afetam o desempenho da operação. As propriedades superficiais das lamas proporcionam a ocorrência de recobrimentos das partículas maiores por estas (*slimes coating*), alteram a rigidez da espuma, interferem no contato bolha-mineral e tornam pouco efetiva a atuação dos reagentes, devido às interações destes com as lamas que possuem grandes áreas superficiais específicas quando comparadas com as das partículas de maior granulometria (YANG, 1979).

Nesse cenário, a deslamagem se faz necessária visto a necessidade de retirada das lamas antes da operação de flotação. A operação de deslamagem pode ser realizada com o auxílio de hidrociclones deslamadores ou usando-se decantadores, sendo que a primeira opção é a mais utilizada para tal função.

Neste trabalho, serão estabelecidas as melhores condições para a deslamagem do minério itabirítico advindo da Mina de Posse para se estabelecer os melhores parâmetros a serem utilizados na deslamagem em

laboratório, sendo utilizados dois equipamentos distintos a fim de estabelecer o melhor método para tal operação.

O objetivo geral deste trabalho foi estudar o desempenho da operação de deslamagem de polpa de minério de ferro, empregando-se as técnicas de hidrociclonagem e decantação em cuba. Pretendeu-se, assim, reduzir a proporção de partículas com granulometria abaixo de 38 μm presentes na polpa mineral, preparando-a para a operação de flotação.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Caracterizar a amostra que foi utilizada;
- Realizar testes no hidrociclone variando dois parâmetros importantes: Porcentagem de sólidos e pressão;
- Realizar testes de decantação em cuba mantendo o pH fixo e variando um parâmetro: porcentagem de sólidos;
- Comparar os dois métodos utilizados quanto ao desempenho na retirada de partículas com granulometria abaixo de 38 μm no *underflow* gerado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda aspectos sobre o minério de ferro, seu panorama mundial e nacional, além das técnicas de deslamagem via hidrociclone e via sedimentação, relevantes para a execução do trabalho.

2.1 Aspectos gerais

O elemento químico ferro é um metal de transição representado pelo símbolo Fe. Possui massa atômica 56u e representa, aproximadamente, 4,5% da massa na crosta terrestre, sendo o segundo metal mais abundante, apenas superado pelo alumínio.

Segundo Carvalho *et al.* (2014), a única forma de se obter o metal ferro é através de substâncias minerais. Embora esteja presente na composição de várias dessas substâncias, apenas algumas são exploradas de forma economicamente viável, seja pela quantidade, pela concentração ou pela distribuição de ferro na rocha constituinte do corpo de minério.

O Departamento de Pesquisa e Estudos Econômicos - DPEE (2016) postula que a extração do minério de ferro é feita em minas a céu aberto no Brasil, sendo o minério bruto submetido ao beneficiamento em usinas de tratamento onde são gerados os produtos granulados e finos. O maior custo das explorações de minério de ferro fica nos serviços relacionados a manutenção e ao transporte, sendo seguido por material (peças para manutenção, insumos com explosivo e calcário e correias transportadoras), depreciação e exaustão, além de pessoas que trabalham nas minas.

Segundo Carvalho *et al.* (2014) os minerais de ferro podem ser classificados em quatro grupos devido à sua composição química, sendo elas: óxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos. Os principais minerais portadores de ferro, apresentando maior viabilidade econômica são óxidos, como a hematita (Fe_2O_3), que possui aproximadamente 70% de ferro e a magnetita (Fe_3O_4), composta por 73% do metal.

2.2 Panorama mundial

No ano de 2014, as reservas mundiais de ferro foram estimadas em 190 bilhões de toneladas e a produção mundial no mesmo ano foi de 3,2 bilhões de toneladas (JESUS, 2016). A Tabela 1 apresenta os países detentores das principais reservas de minério de ferro e suas respectivas produções do metal no ano de 2014. Neste mesmo ano, o Brasil ocupava um lugar de destaque no cenário mundial do minério de Ferro, ocupando o terceiro lugar no que diz respeito à produção mundial de produto.

Tabela 1: Reservas e produção mundial de minério de ferro – 2014.

Países	Reservas (10⁶ t)	Produção (10³t)	%
Brasil	22.565	386.270	12,8
China	23.000	1.450.000	46,6
Austrália	53.000	609.000	20,5
Índia	8.100	150.000	4,7
Rússia	25.000	105.000	3,3
Ucrânia	6.500	82.000	2,5
Outros países	51.835	327.730	9,7
Total	190.000	3.110.000	100,0

FONTE: DNPM/DIPLAM; USGS - Mineral Commodity Summaries (2015).

Em 2016, os países que alcançaram as maiores produções mundiais de ferro foram Brasil, Reino Unido, Austrália e China. Entre as empresas do ramo, o Grupo Vale, de origem brasileira, alcançou destaque, com 14,7% da produção mundial, ocupando o primeiro lugar (STEELONTHENET, 2016).

Segundo o DEPEC (2016), no ano de 2014, a China foi o país que mais produziu ferro bruto e aço bruto e também o que mais importou, chegando a 65% das importações mundiais de minério de ferro seguida pela União Europeia (11%), pelo Japão (9,5%) e pela Coreia do Sul (5,1%), os outros países importadores atingiram apenas 9,4%. No que se refere às exportações do mesmo ano, a Austrália ocupou a primeira posição, com 51,1% das exportações mundiais, seguida pelo Brasil com 23,3%, sendo ambos os países que possuíram números mais significativos de exportação.

2.3 Panorama nacional

Dos diferentes tipos de minério de ferro explorados comercialmente no Brasil, o minério itabirítico e o hematítico apresentam teores elevados de ferro e quantidades reduzidas de elementos indesejados nos processos siderúrgicos, como o enxofre, o alumínio e os carbonatos (CARVALHO *et al.*, 2014).

Segundo o DEPEC (2016), as maiores reservas brasileiras estão localizadas no quadrilátero ferrífero, no estado de Minas Gerais. Esta região possui 72,5% das reservas do país, seguida pelo estado do Mato Grosso do Sul (13,1%), Pará, na região de Carajás (10,7%) e os outros estados (3,7%). A maior porcentagem de ferro contida no minério de ferro é do estado do Pará, que possui 64,8% de ferro, superando a média nacional, que é de 52,2% de ferro contido.

De acordo com Jesus (2016), no ano de 2014 a produção brasileira de minério de ferro chegou a 411,8 milhões de toneladas. As principais empresas produtoras foram Vale S/A, Samarco Mineração S/A e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), todas presentes no estado de Minas Gerais, sendo que a produção deste estado corresponde a 68,4% da produção total do país. Da produção nacional de minério de ferro do ano de 2014, 14% foi direcionado ao mercado interno e 86% para exportação. A parte da produção direcionada para o mercado nacional se divide em siderurgia (91%) e pelotização (9%).

Ainda segundo Jesus (2016), as exportações brasileiras de minério de ferro e pelotas, em 2014, somaram 344,3 milhões de toneladas, o que responde por 7,6% das exportações totais do país, com um valor de US\$-FOB¹ 25,8 bilhões. Os principais países exportadores foram: China (52%), Japão (9%), Coreia do Sul, Países Baixos (5% cada) e Omã (3%). O preço médio de exportação de minério foi de US\$-FOB 67,86/t.

2.4 Origem do material

O material utilizado é originado da Mina de Posse, que está localizada na zona rural do município de Caeté, Minas Gerais e licenciada para a CRUSADER DO BRASIL MINERAÇÃO LTDA, sendo o minério contido na região o Itabirito, que é dividido em Itabirito rico, compacto e friável.

¹ *Free on board*. Nesse tipo de frete o comprador assume todos os riscos e custos com o transporte da mercadoria assim que ela é colocada no navio.

A lavra do minério é realizada a céu aberto, em bancadas sucessivas, subverticais e com altura de 10 metros. O desmonte é mecânico, feito com escavadeira hidráulica, sendo o mineral friável não necessita o uso de explosivos, e o carregamento é efetuado por carregadeiras de porte médio.

O beneficiamento do minério é feito a seco, sendo constituído basicamente de britagem primária, peneiramento, britagem secundária e novo peneiramento. O peneiramento é feito em dois decks, com telas de 32 mm e 6,35mm, o retido de 32mm é enviado a um britador cônico e o retido em 6,5mm é direcionado a uma peneira secundária com dois decks, com 19mm e 6,35mm. O retido em 6,35mm é o produto hematitinha e o passante em 6,35mm é estocado.

2.5 Flotação

Os depósitos com maiores teores de ferro passam por um beneficiamento simplificado, que é constituído basicamente de cominuição e classificação, porém a maioria dos depósitos de ferro precisa passar por uma ou mais etapas de concentração. O método de concentração mais utilizado para minérios de ferro é a flotação. A flotação é um método que necessita do contato entre as bolhas e as partículas e entre essas e os reagentes, dessa maneira, as partículas com granulometria abaixo de 38 μm (granulometria fina) podem atrapalhar o processo, fazendo-se necessário etapas de deslamagem para a retirada dos finos

Chaves (2010) afirma que uma operação de concentração de minérios, de forma generalizada, pode ser descrita como a capacidade de se dar a certos componentes de uma mistura heterogênea de minerais uma velocidade diferente da velocidade mantida pelas demais espécies presentes na mistura, explorando a diferença de propriedades físicas das partículas. O exemplo mais simples de separação corresponde à catação manual, que se baseia na aparência, cor e forma das partículas. Durante a técnica, o operador proporciona certa velocidade a algumas partículas, enquanto as demais permanecem imóveis sobre a superfície. Da mesma forma, as operações densitárias exploram a diferença de densidade entre as distintas espécies minerais; os métodos magnéticos separam a partir das diferenças de susceptibilidade magnética; os eletrostáticos, pelas propriedades elétricas; e a

flotação, objeto de estudo do tópico em questão, baseia-se em propriedades muito menos evidentes que as anteriores.

Segundo Monte (2010), a flotação corresponde a uma separação realizada em uma suspensão de partículas minerais em água que diferencia as espécies presentes na mistura pela sua afinidade pela água, ou seja, seus distintos graus de hidrofobicidade. De forma simplificada, as partículas são obrigadas a percorrer um trajeto, como nas demais operações e, em um dado instante, as partículas que se deseja flotar são levadas a abandoná-lo, tomando um rumo ascendente. Se certa espécie não possui afinidade pela água, sendo hidrofóbica, as partículas podem conseguir aderir a um número suficiente de bolhas. Com isso, a densidade do conjunto partícula-bolha irá se tornar menor que a do fluido e o conjunto se deslocará verticalmente para a superfície, enquanto as partículas das demais espécies minerais, consideradas hidrofílicas, se mantêm na suspensão mineral.

Segundo Totou (2010), poucos minerais encontrados na natureza são naturalmente hidrofóbicos. Talco, grafita, pirofilita, molibdenita, ouro livre de prata e alguns carvões são alguns exemplos de materiais naturalmente hidrofóbicos. A flotação apresentaria uso muito restrito se apenas utilizada para tais minerais. Sua vasta aplicação se deve ao uso dos coletores, reagentes que são capazes de transformar a superfície de minerais hidrofílicos em hidrofóbica.

Na flotação de minério de ferro os coletores comumente utilizados são as aminas, Lelis (2014) e Baltar (2010) destacam a existência da amina nas suas formas iônica e molecular na faixa de pH de 8,5 a 12, onde as mesmas agem como coletor e espumante ao mesmo tempo, devido a esse duplo caráter das aminas a flotação de minério de ferro é realizada nessa faixa de pH. A deslamagem realizada por decantação nesse trabalho utilizou o pH igual a 9,5 devido a este valor estar dentro da faixa de pH que é comumente utilizada na usina.

2.6 Deslamagem

Segundo Nascimento (2014), o termo deslamagem faz referência à eliminação de lamas indesejáveis no processo de flotação, que significa a

eliminação de parte de partículas finas, sem uma conotação de separação granulométrica precisa ou eficiente.

Segundo Silva (1999), a influência de partículas muito finas nos processos de flotação é cada vez mais investigada, tendo em vista a necessidade de se recuperar as frações mais finas de minério geradas nos processos de tratamento anteriores à flotação que irão afetar a eficiência desse processo.

Somasundaran (1980) classifica as lamas como uma mistura de coloides e ultrafinos naturais, além daqueles gerados nas operações de cominuição, que possuem como característica principal uma sedimentação bastante lenta. Segundo Somasundaran (1980) as partículas podem ser classificadas de acordo com seus tamanhos:

- Coloides: Partículas com até 1 μm de tamanho;
- Ultrafinos: Partículas que não são separadas por processos gravíticos convencionais e seu tamanho está entre 1 e 10 μm de tamanho;
- Finos: Partículas que não são facilmente separados por processos gravíticos e possuem tamanho entre 10 e 100 μm ;
- Lamas: Lamas são definidas como uma mistura de coloides e ultrafinos.

Souza e Araujo (1999) demonstraram a influência de partículas de lama na flotação de minérios de ferro, onde a distribuição granulométrica das partículas presentes na etapa de flotação possui um efeito significativo no resultado final, como perda da seletividade e de recuperação mássica. As lamas possuem um efeito negativo na interação partícula-bolha, como consumo exagerado de reagentes e, em certos casos, as lamas podem recobrir a superfície de outro mineral, impedindo sua exposição aos reagentes (*slime coating*).

De acordo com Totou (2010), o estado de agregação e dispersão de sólidos em uma polpa se deve à interação das partículas colidindo umas com as outras. A teoria DLVO, que trata das interações entre as partículas de acordo com as forças que agem sobre as mesmas, conclui que o grau de estabilidade de um sistema será em função do somatório das forças atrativas e

das forças repulsivas que agem sobre a partícula. Quando o somatório das forças atrativas for maior que as forças repulsivas, ocorrerá a agregação das partículas e o sistema se tornará instável, Já quando ocorre o cenário contrário, ou seja, forças repulsivas maiores que forças atrativas, a dispersão acontece e o sistema se torna estável. Se a polpa apresenta um alto grau de dispersão, operações unitárias como a deslamagem apresentam um desempenho melhor em relação a quando a polpa se encontra com um maior grau de agregação.

Conforme Lins (2010), uma operação de deslamagem, ou remoção de ultrafinos, é geralmente feita com o objetivo de manter baixa a viscosidade da polpa que será concentrada, visto que seu aumento é nocivo à operação. Em pequenas usinas a operação é feita com auxílio de tanques deslamadores, onde ocorre a sedimentação dos sólidos enquanto a lama sai pelo *overflow*. Em usinas com bom controle operacional, o ciclone é usado para deslamagem e desaguamento. Durante as etapas de concentração pode ocorrer deslamagem inicial da polpa, de modo que o concentrado secundário ou terciário permanece com menos lama e finos do que a alimentação da primeira etapa de concentração.

2.7 Deslamagem de minério de ferro

Segundo Mapa (2006), grande parte dos depósitos brasileiros de minérios de ferro possuem partes altamente intemperizadas, o que conseqüentemente geram significativas quantidades de partículas finas. Além dos finos naturais, há a geração de partículas finas durante as operações de lavra e nos processos de cominuição.

A deslamagem geralmente antecede a flotação reversa de minério de ferro e neste trabalho duas formas de fazer essa operação serão objeto de estudo: a hidrociclonagem e a decantação.

Na flotação catiônica reversa de minério de ferro, os efeitos provocados pela presença de partículas finas e ultrafinas podem ser (Castro, 2002 e Santos, 2010):

- Mudança no comportamento cinético das partículas, ocasionando recobrimentos preferenciais sobre a superfície de partículas maiores (*slime coating*);

- Mudança no comportamento hidrodinâmico das partículas, podendo quase atingir o tempo de residência da fase líquida dentro das células de flotação, podendo ser direcionada tanto para o flotado quanto para o afundado;
- Elevada reatividade das partículas pode levá-las a reagir quimicamente com as espécies coletoras e depressoras do sistema, proporcionando redução da coleta dos minerais de interesse, além de proporcionar o aumento do consumo desses reagentes envolvidos no processo;
- Aumento da solubilização, principalmente de determinados minerais, em especial da classe dos argilo-minerais contidos nos minérios de ferro.

Queiroz (2003) em seu trabalho intitulado “Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos” e e Totou (2010) em seu trabalho “Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos itabiríticos” destacam a influência negativa das lamas de minério de ferro na flotação, como o aumento da rigidez da espuma, interferência no contato bolha-mineral e diminuem a efetividade da atuação dos regentes, e destacam que as propriedades superficiais das lamas influenciam a criação de recobrimentos de lamas sob as partículas e demonstram que vários estudos anteriores comprovam a interferência dessas partículas na flotação em diversas faixas de pH, causando interferência no desempenho da etapa de concentração.

2.7.1 Hidrociclonagem

De acordo com Sampaio (2007), o hidrociclone foi desenvolvido em 1890. Porém, apenas anos mais tarde, tornou-se um importante separador de partículas na indústria mineral. A partir dos anos 1940, os hidrociclones começaram a ser fabricados com tecnologias avançadas e então passaram a ser instalados e considerados essenciais em muitas empresas.

De acordo com Salvador *et al.* (2015), esses separadores possuem uma vasta aplicação que inclui variadas áreas de mineração, podendo ser aplicados em circuitos fechados de moagem, deslamagem e desaguamento, além de ter aplicação na indústrias siderúrgica, de papel e celulose, alimentícia, dentre outras.

O hidrociclone é um equipamento versátil, de alta capacidade e não possui partes móveis. Segundo Sampaio (2007), os equipamentos são alimentados com polpa de minério, resultando em dois produtos o *underflow* e o *overflow*, o primeiro contém a maior proporção das partículas grossas da alimentação e o segundo engloba a maioria das partículas finas que foram classificadas.

De forma resumida, um hidrociclone consiste de uma parte cilíndrica, cujo diâmetro interno define o diâmetro do equipamento, e de uma parte cônica que possui, em seu vértice, uma abertura denominada *apex*. Através dessa abertura que ocorre a descarrega do *underflow*. A alimentação entra no hidrociclone através do orifício de entrada ou injetor e de forma tangencial à seção cilíndrica, em que há um tubo coaxial denominado *vortex finder*, por onde é descarregado o *overflow*, totalizando três aberturas no equipamento. A Figura 1 ilustra a estrutura esquemática de um hidrociclone.

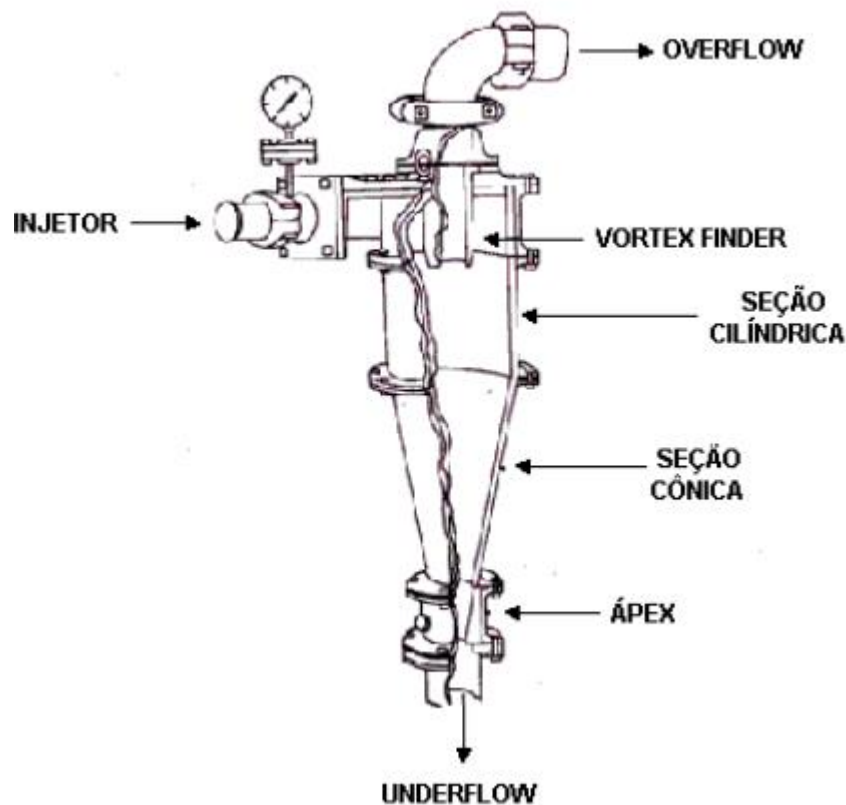


Figura 1: Representação esquemática de um hidrociclone.

Fonte: CORREA (2010)

De acordo com Sampaio (2007), a energia potencial armazenada na polpa alimentada é transformada em energia cinética, e devido à geometria do hidrociclone, essa energia produz um movimento rotacional da polpa causado pela força centrífuga. As partículas de diâmetros maiores são deslocadas para as paredes do equipamento, enquanto as partículas menores são arrastadas para a região central do hidrociclone. Devido a esse mecanismo, a região mais periférica do hidrociclone é ocupada, preferencialmente, por polpa com predominância de partículas grosseiras e a região central, por polpa com predominância de partículas finas.

Na região cônica do equipamento ocorre o estrangulamento do *apex*, isso induz a descarga da polpa com menor quantidade de partículas. A maior parte do fluxo é induzida ao orifício oposto, o *vortex*, de diâmetro relativamente maior que o do *apex*. As partículas mais grossas entram num fluxo descendente e são descarregadas através do *apex*.

Sampaio (2007) afirma que, observando o comportamento de uma partícula isolada em suspensão, o seu movimento está associado a pelo menos três componentes de velocidade:

- I. Velocidade linear, tangencial à trajetória circular da partícula;
- II. Velocidade angular, referente ao seu deslocamento radial em relação ao eixo da coluna de ar no dreno central;
- III. Velocidade vertical, referente a um dado plano de referência (a base do tanque, por exemplo).

Correia (2010) listou as principais vantagens apresentadas pelos hidrociclones:

- I. Capacidade elevada em relação ao seu volume e à área ocupada;
- II. Controle operacional relativamente simples;
- III. Custo de investimento pequeno;
- IV. Devido ao seu baixo preço e pequeno espaço ocupado, é possível manter unidades de reserva.

E também as seguintes desvantagens:

- I. Não é possível realizar ajustes para minimizar os efeitos causados pelas oscilações na alimentação;
- II. Para se ter um controle efetivo no processo, geralmente são necessárias instalações sofisticadas;

- III. Se o minério for abrasivo, o custo de manutenção das bombas e dos hidrociclones poderá ser relativamente elevado.

Alguns parâmetros afetam o desempenho de separação de um hidrociclone, Sampaio (2007) descreve-os como:

- O diâmetro do hidrociclone: Define a capacidade e o diâmetro de corte dos hidrociclones, aumentando o diâmetro, aumenta-se a capacidade do hidrociclone e o diâmetro de corte.
- Variação do diâmetro do vortex finder: Possibilita regular a capacidade e o diâmetro de corte. O diâmetro máximo é limitado pela possibilidade do material ir diretamente para o overflow e a altura deve ser suficiente para ultrapassar o ponto inferior da abertura de entrada.
- Área da abertura de entrada: aumentando-a, aumenta a capacidade do hidrociclone e o diâmetro de corte.
- Altura do equipamento: aumentando a altura do hidrociclone diminui o diâmetro de corte.
- Descarga do *ápex*: através desse parâmetro pode-se avaliar as condições de operação do hidrociclone. Existem três tipos de descarga:
 - I. Descarga em cordão: o diâmetro do *ápex* é insuficiente. Com isso, partículas grossas dirigem-se para o *overflow*. Pode ser usado intencionalmente quando se deseja adensar e não classificar;
 - II. Descarga em cone: operação normal;
 - III. Descarga em pulverizador (*spray*): o diâmetro do *ápex* é maior que o recomendável. As partículas finas dirigem-se para o *underflow*.

A Figura 2 ilustra esses três tipos de descarga:

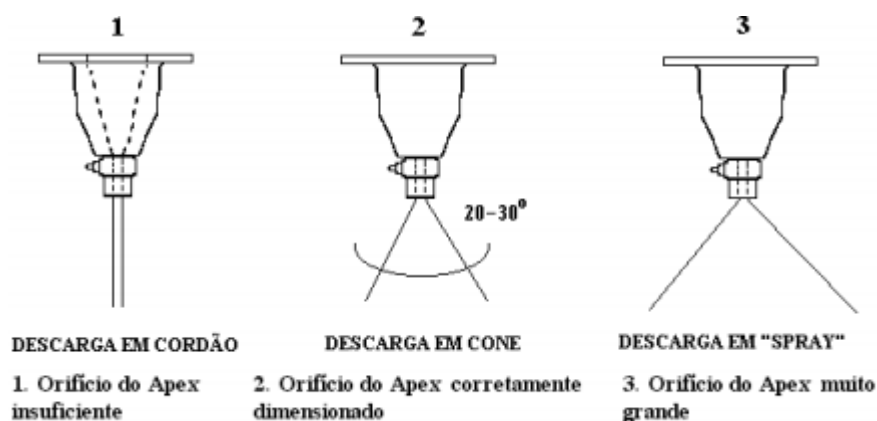


Figura 2: Representação dos três tipos de descarga do ápex.

Fonte: Correa (2010).

Os hidrociclones são os equipamentos mais utilizados no processo de deslamagem. Nesse cenário de aplicação, o equipamento apresenta pequenos diâmetros, usando a característica da diminuição do diâmetro que proporciona um corte mais fino, visto que o objetivo da operação é retirar as partículas de diâmetros muito pequenos.

Segundo Ferreira (2007), a operação de deslamagem pode ser feita em três etapas consecutivas de classificação por ciclones, nem sempre a deslamagem precisar passar por essas três etapas, denominados raspadores, limpadores e deslamadores. Os ciclones raspadores constituem a primeira etapa e onde ocorre a primeira classificação do material, as partículas grosseiras (*underflow*) são enviadas para os ciclones limpadores, onde ocorre nova classificação e o material mais fino é enviado para os ciclones deslamadores. Nos ciclones limpadores, o *underflow*, que é composto pelas partículas de interesse, é direcionado para a flotação convencional e o *overflow* segue para a planta de tratamento de finos. A última etapa é composta pelos ciclones deslamadores, onde ocorre nova classificação e, usualmente, o *underflow* é enviado para a flotação e o *overflow* para a planta de finos.

Segundo Melo (2010) a análise da eficiência do hidrociclone é feita através das curvas de partição, partição corrigida e pelo cálculo do *by-pass*. As curvas de partição permitem determinar a porcentagem de massa da alimentação contida em cada produto. No caso de uma separação ideal via hidrociclonagem os dois produtos deveriam ser um fino e um grosso, porém na prática isso não ocorre e partículas finas são encontradas no *underflow* e

partículas grossas no *overflow*, o que ocasiona uma classificação não-perfeita. O processo de classificação é representado pela curva de partição e a curva de partição corrigida é obtida desprezando o efeito do *by-pass*, efeito que ocorre com partículas que não são classificadas e se dirigem direto para o *underflow*.

Além da geometria do hidrociclone, as condições operacionais, como queda de pressão e concentração da alimentação, influenciam no desempenho de hidrociclones. O aumento de quedas dos níveis de pressão aumenta a eficiência de separação, entretanto, é usual operar com pressões de até 2 bar. Em contrapartida, o aumento da concentração da suspensão alimentada leva ao rápido decréscimo na eficiência, por isso a alimentação diluída é preferida quando busca-se por alta recuperação mássica sólidos (SVAROVSKY, 2000).

Quando o material a ser hidrociclonado está em uma concentração não diluída, por razões práticas, seria mais simples diluir a suspensão a ser alimentada para obter alta recuperação. Entretanto, a quantidade de água adicionada ao processo seria maior, e como consequência, maior quantidade de rejeitos numa unidade industrial. Nesse sentido, alguns estudos têm sido desenvolvidos, entretanto ainda é necessário compreender melhor o efeito de concentração na performance de hidrociclones (GONÇALVES, 2016).

Gonçalves (2016) em seu trabalho intitulado “Efeito da concentração de sólidos e de variáveis operacionais no desempenho de um hidrociclone concentrador” conclui que o aumento da concentração de alimentação está ligada também ao consumo energético do equipamento, sendo que a quando a mesma aumenta nota-se que diminuiu o consumo energético do equipamento.

Gama *et al.* (2017) em seu trabalho “Influência das variáveis de processo do hidrociclone para tratamento de argilas esmectíticas” afirma que entre as variáveis vazão, pressão, concentração de alimentação e eficiência do sistema, a eficiência final é independente da concentração de sólidos e que as operações de deslamagem realizadas em baixa pressões não se mostram eficientes.

2.7.2 Decantação

A decantação ou sedimentação, por se tratar de uma técnica natural e que é bastante simples vem sendo utilizada há muitos anos. Segundo Carvalho (2008), essa operação consiste em empregar as forças gravitacionais para

promover a separação das partículas de densidade superior à da água, depositando-as em uma superfície.

Carisso (2010) afirma que se uma partícula cai livremente no vácuo, esta partícula irá possuir uma aceleração constante e uma velocidade que irá aumentar indefinidamente, independentemente de seu tamanho e densidade. Porém, se a partícula cai em outro meio que não o vácuo, este meio irá oferecer certa resistência ao seu movimento a qual aumentará em razão direta com a velocidade, até que se atinja um valor constante. Quando as duas forças que atuam na partícula (gravitacional e de resistência do fluido) se tornam iguais, a partícula atinge a velocidade terminal e passa a ter uma queda com velocidade constante.

Pela Segunda Lei de Newton e pela Lei de Stokes, para fluxos laminares, é possível provar que:

- I. Se duas partículas têm a mesma densidade, a partícula com maior tamanho terá maior velocidade terminal; e
- II. Se duas partículas têm o mesmo tamanho, a partícula mais densa terá maior velocidade terminal (CARISSO, 2010).

A deslamagem por decantação ou sedimentação segue o princípio governado pelas Leis de Newton e Stokes, que afirmam que duas partículas de tamanho diferentes terão velocidades diferentes e assim será possível separá-las, visto que partículas muito finas, como as que compõem as lamas, tendem a ter uma velocidade de sedimentação muito baixa.

Ainda segundo Carisso (2010), os classificadores são constituídos de uma coluna de separação na qual um fluido está ascendendo a uma velocidade uniforme. As partículas introduzidas no separador sobem ou descem dependendo das suas velocidades terminais e geram dois produtos, um *overflow* com velocidade terminal menor que a velocidade do fluido e um *underflow* de partículas que possuem velocidade maior que a velocidade terminal do fluido.

Aplicando para a deslamagem, as partículas que formam as lamas por possuir uma velocidade de sedimentação muito baixa e menor que a do fluido irão formar o *overflow* do decantador e as partículas de granulometria de interesse irão formar o *underflow*.

A eficiência do processo de deslamagem via decantação pode ser avaliada através da quantidade de partículas finas presentes no *underflow*. Tal quantidade de partículas pode ser determinada através de análise granulométrica e da construção da curva granulométrica. Em uma decantação ideal o *overflow* deve ser composto apenas de partículas finas e o *underflow* apenas por partículas grossas, a presença de grande porcentagem de partículas finas no *underflow* caracteriza uma ineficiência da operação.

Da mesma forma que o hidrociclone, com o aumento da porcentagem de sólidos espera-se que as partículas menores que 38 μm no *underflow* diminuam. O pH selecionado foi igual a 9,5, tal pH é o pH em que as operações de flotação são realizadas, visto que neste pH as aminas funcionam tanto como coletor quanto como espumante.

A deslamagem é uma importante operação, pois retira as partículas menores que 38 μm do *underflow*, que é o produto direcionado para a flotação. Tais partículas na flotação diminuem sua eficiência e aumentam os custos, visto que aumenta o consumo de reagentes. É importante saber o melhor cenário para realizar a deslamagem de minério de ferro em laboratório, visto que é um material altamente usado para diversos trabalhos e as partículas de granulometria abaixo de 38 μm podem atrapalhar os resultados da flotação realizada em tais trabalhos.

3. METODOLOGIA

Este capítulo aborda os procedimentos empregados na execução do trabalho.

3.1 Preparação da amostra

A amostra de minério utilizada neste trabalho corresponde ao minério de ferro proveniente da Mina de Posse, administrada pela empresa Crusader do Brasil Mineração Ltda, passou por operações de homogeneização, cominuição, peneiramento e caracterização, e posteriormente foi submetido às operações de hidrociclonação e decantação.

A massa de material utilizada neste trabalho, aproximadamente 30 kg, foi peneirada para fracionar o material com granulometria abaixo de 150 μm , tal corte foi selecionado pois é a fração na qual se trabalha na flotação. O peneiramento consistiu em duas partes: um peneiramento manual com a peneira de 28#, o passante na peneira de 28# foi submetido a um peneiramento no peneirador de bancada usando duas peneiras, uma de 65# e uma de 100#, por 3 minutos, a Figura 3 ilustra as peneiras utilizadas.



Figura 3: (a) Peneira utilizada no peneiramento manual, e (b) peneiras utilizadas no peneirador de bancada.

O material passante em 150 μm (100#) foi retirado e armazenado, já o material retido na peneira de 150 μm passou por uma etapa de moagem no moinho de bolas do LTM do CEFET Campus Araxá para atingir a granulometria

desejada. O moinho possui as seguintes características, segundo Oliveira (2015):

- Comprimento interno: 590 mm;
- Diâmetro interno: 570 mm;
- Velocidade crítica: 56 rpm; e
- Capacidade volumétrica: 151 litros.

O corpo moedor utilizado foi bolas de cerâmica de três diâmetros distintos. A Figura 4 mostra o moinho de bolas e os corpos moedores utilizados.



Figura 4: (a) Moinho de bolas, e (b) corpos moedores cerâmicos.

Posteriormente todo o material moído foi submetido a um peneiramento no peneirador de bancada, tempo de peneiramento igual a três minutos, com a série de peneiras de 28#, 65# e 100#.

A Figura 5 mostra os produtos da moagem.



Figura 5: (a) Material moído abaixo de 28#, e (b) material moído acima de 28#.

Assim que o peneiramento foi finalizado, todo o material passante em $150\ \mu\text{m}$ foi pesado e homogeneizado, obtendo uma quantidade igual a 17,5 kg. A homogeneização foi realizada em lona, como ilustra a Figura 6, sendo feita em oito ciclos de quatro tombamentos cada, totalizando 32 tombamentos. Ao fim da homogeneização em lona foi então realizada a picnometria, conforme mostra a Figura 7.



Figura 6: Homogeneização do material passante em 100#.



Figura 7: Etapas da picnometria.

A picnometria foi realizada para se obter a densidade do material, tal densidade é determinada pela fórmula abaixo:

$$d_s = \frac{(A_2 - A_1)}{(A_4 + A_2) - (A_1 + A_3)} \quad (1)$$

Onde:

d_s : Densidade do sólido;

A_1 : Massa do picnômetro vazio e seco;

A_2 : Massa do picnômetro + amostra do sólido;

A_3 : Massa do picnômetro + amostra do sólido + água;

A_4 : Massa do picnômetro + água.

Tal procedimento foi realizado em triplicata e a densidade final foi a média das densidades obtidas em cada etapa, considerando o desvio padrão entre elas menor que 5%. Todos os valores de A_1 , A_2 , A_3 e A_4 obtidos nas picnometrias realizadas neste trabalho estarão indicados no Apêndice 1.

Uma alíquota foi retirada para a fluorescência de raio-x e encaminhada ao Laboratório Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT) do CEFET MG (*Campus I*), situado em Belo Horizonte (MG). O equipamento de FRX utilizado nos ensaios foi o da marca *Shimadzu*, modelo EDX-720.

Toda a massa de itabirito abaixo de 150 μm foi disposta em pilha alongada de 150 centímetros de comprimento e foi quarteada da seguinte forma: A pilha foi partida em duas longitudinalmente, após essa primeira etapa a pilha foi dividida em oito partes iguais, cada uma com aproximadamente 2kg, e duas partes dispostas na diagonal entre si (enumeradas de forma igual na Figura 8) foram unidas. A Figura 8 representa as fases realizadas durante este processo. Essa amostra passou também por uma análise granulométrica a úmido para ser caracterizada.



Figura 8: Etapas do quarteamento do material passante em 100#.

A amostra da alimentação e os melhores resultados de cada equipamento (cinco amostras no total), cuba e hidrociclone, após o fim de todos os testes e da criação das curvas granulométricas tiveram seus teores de hematita calculados pela fórmula abaixo, onde as densidades, calculadas pela fórmula (1), são necessárias para a determinação do teor final. Neste tipo de cálculo o minério é considerado binário, ou seja, o minério é composto apenas por hematita e quartzo. A fórmula para o cálculo do teor está representada abaixo:

$$\%H = \frac{dH.(dM-dQ)}{dM.(dH-dQ)} \quad (2)$$

Onde:

%H: Teor de hematita;

dH: Densidade da hematita, considerada 5,30 g/cm³;

dM: Densidade do minério, obtida por picnometria; e

dQ: Densidade do quartzo, considerada 2,65 g/cm³.

Essas etapas finalizam as operações de preparação da amostra.

3.2 Ensaios de deslamagem via hidrociclonagem e decantação

Foram utilizados os equipamentos necessários para a preparação da amostra e para os testes foram utilizados o hidrociclone e uma cuba decantadora do LTM no CEFET – MG Campus Araxá.

3.2.1 Hidrociclone

O hidrociclone que foi utilizado corresponde ao conjunto de hidrociclonagem portátil CP-2 (Figura 9), que é constituído por:

- Hidrociclone de duas polegadas;
- Bomba de polpa;
- Registro mangote;
- Manômetro;
- Reservatório de polpa com agitador.



Figura 9: (a) Hidroclicone e (b) reservatório.

O reservatório de polpa do equipamento comporta 100 litros, porém o hidrociclone funciona com 80 litros de polpa, que será o volume de polpa utilizado para os testes.

Foram realizados quatro testes no hidrociclone e suas duplicatas, totalizando oito testes, através de bibliografias e trabalhos anteriores foi possível determinar o planejamento, os parâmetros variados e seus valores, que estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Planejamento fatorial dos testes de hidrociclonagem.

Ensaio	% de sólidos - X1	Pressão - X2	X1	X2
1	5	15	-1	-1
2	5	30	-1	+1
3	10	15	+1	-1
4	10	30	+1	+1

Antes de iniciar os testes o reservatório e o hidrociclone foram lavados para evitar a presença de contaminantes.

A massa a ser utilizada nos testes foi calculada segundo a fórmula:

$$\%S = 100 * \frac{d_s * (d_p - d_a)}{d_p * (d_s - d_a)} \quad (3)$$

Onde:

%S: Porcentagem de sólidos da polpa;

d_s : Densidade do sólido;

d_a : Densidade do líquido; e

d_p : Densidade da polpa.

Visto que a porcentagem de sólidos, a densidade do sólido e a densidade da água eram conhecidas, os valores foram substituídos para se obter a densidade da polpa, lembrando-se de fazer a transformação da unidade de volume da densidade do sólido, de cm^3 para L. Com o valor da densidade da polpa, foi possível calcular a massa da polpa através da fórmula:

$$d_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (4)$$

Onde:

d_p : Densidade da polpa;

m_p : Massa total de polpa; e

v_p : Volume de polpa.

Com o valor da massa total de polpa, para descobrir a massa de sólidos fez-se uma multiplicação simples:

$$m_s = m_p * \%S \quad (5)$$

Onde:

m_s : Massa de sólidos;

m_p : Massa total de polpa; e

%S: Porcentagem de sólidos de cada teste.

Após determinar a massa de sólidos de cada teste (4,6kg para o teste de 5% de sólidos e 8,65kg para o teste de 10% de sólidos) foi possível iniciar os testes do hidrociclone. Para essa operação foi seguida a seguinte metodologia:

- i. Lavar o hidrociclone e o reservatório a fim de se evitar contaminação de qualquer outro material;
- ii. Encher o reservatório com água até próximo da marca de 80L;
- iii. Adicionar o material ao reservatório;
- iv. Adicionar água até a polpa chegar à marca de 80L do reservatório,

- v. Acionar o agitador foi para assegurar total homogeneização da polpa e para manter os sólidos em suspensão;
- vi. Ligar a bomba do equipamento;
- vii. Ajustar a pressão determinada para o teste;
- viii. Coletar o *underflow* e o *overflow* do hidrociclone em baldes identificados durante 30 segundos;
- ix. Coletar o material da duplicata logo em seguida durante o mesmo tempo;
- x. Ajustar a segunda pressão determinada;
- xi. Coletar o material do segundo teste e da sua duplicata;
- xii. Realizar o peneiramento a úmido segundo a série de peneiras listada na Tabela 3;
- xiii. Dispor as amostras em pratos identificados e deixar na estufa pelo tempo necessário a sua total secagem;
- xiv. Recalcular a alimentação, somando os produtos de cada teste e de sua duplicata;
- xv. Realizar a análise granulométrica da alimentação recalculada, confirmando o desvio menor que 5% entre o teste e sua duplicata; e
- xvi. Gerar as curvas granulométricas e de partição.

A análise granulométrica foi realizada seguindo a série de malha listada na Tabela 3:

Tabela 3: Malhas usadas na análise granulométrica do overflow e do underflow.

Série de malhas	
Malha (#)	Abertura (µm)
100#	150
140#	106
170#	90
200#	75
230#	63
270#	53
325#	45
400#	38

Após a análise granulométrica os produtos de cada malha foram dispostos em pratos identificados e levados à estufa pelo tempo necessário a sua total secagem. Assim que o material foi seco, o mesmo foi pesado para a criação das curvas granulométricas.

3.2.2 Cuba

Para o processo de decantação, uma cuba decantadora de volume igual a quatro litros foi utilizada (Figura 10).



Figura 10: Cuba de deslamagem.

Para a decantação, foram realizados dois testes em duplicata com pH fixo e duas porcentagem de sólidos distintas, totalizando quatro testes de decantação. O pH foi fixo em 9,5, por ser o pH utilizado nas operações de flotação de ferro e os valores de porcentagem de sólidos foram determinados através de estudos de trabalhos anteriores. A Tabela 4 mostra o planejamento dos testes realizados.

Tabela 4: Planejamento fatorial dos testes de hidrociclonação.

Ensaio	% de sólidos - X1	X1
1	20	+1
2	10	-1

A massa de amostra utilizada foi determinada seguindo as equações (3), (4) e (5), sendo realizado apenas um cálculo a mais para determinar a massa de água necessária, usando a equação abaixo:

$$m_a = m_p - m_s \quad (9)$$

Onde:

m_s : Massa de sólidos;

m_p : Massa total de polpa; e

m_a : Massa de água.

A metodologia dos ensaios consistiu em:

- i. Preencher a cuba com a massa de água necessária para o teste;
- ii. Levar a cuba ao agitador mecânico, que foi ligado e teve sua rotação ajustada;
- iii. Adicionar o itabirito passante em 100# à cuba com o agitador mecânico em funcionamento;
- iv. Medir o pH da polpa com o pHmetro. Assim que foi verificado o valor de pH da polpa, o mesmo foi ajustado para o valor fixo de 9,5 através da adição de NaOH solução à 5% em volume;
- v. Desligar o agitador e retirar o mesmo da cuba;
- vi. Após a retirada do agitador, esperar 20 minutos para ocorrer a decantação;
- vii. Sifonar a lama com o auxílio de uma mangueira, mantendo a mangueira próxima à interface do material não sedimentado;
- viii. Adicionar água à cuba até completar os quatro litros de polpa;
- ix. Realizar o procedimento de ajustar o pH para 9,5;
- x. Esperar 20 minutos e após o fim do tempo sifonar a lama;
- xi. Reproduzir as etapas viii, ix e x mais uma vez;
- xii. Retirar da cuba o material sedimentado e colocar em balde identificado;

- xiii. Fazer o peneiramento a úmido dos produtos;
- xiv. Dispor em pratos identificados e levar à estufa. Deixar na estufa o tempo necessário para a total secagem dos produtos; e
- xv. Construir as curvas granulométricas.

A metodologia citada acima foi realizada 4 vezes e os materiais do *overflow* e do *underflow* foram submetidos à análise granulométrica a úmido. As malhas selecionadas para a análise granulométrica foram semelhantes às utilizadas para a análise dos produtos gerados pelo hidrociclone.

4. RESULTADOS

Este tópico irá abordar os resultados obtidos através dos testes realizados.

4.1 Preparação e caracterização da amostra utilizada nos testes de deslamagem

A curva de distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios está indicada na Figura 12.

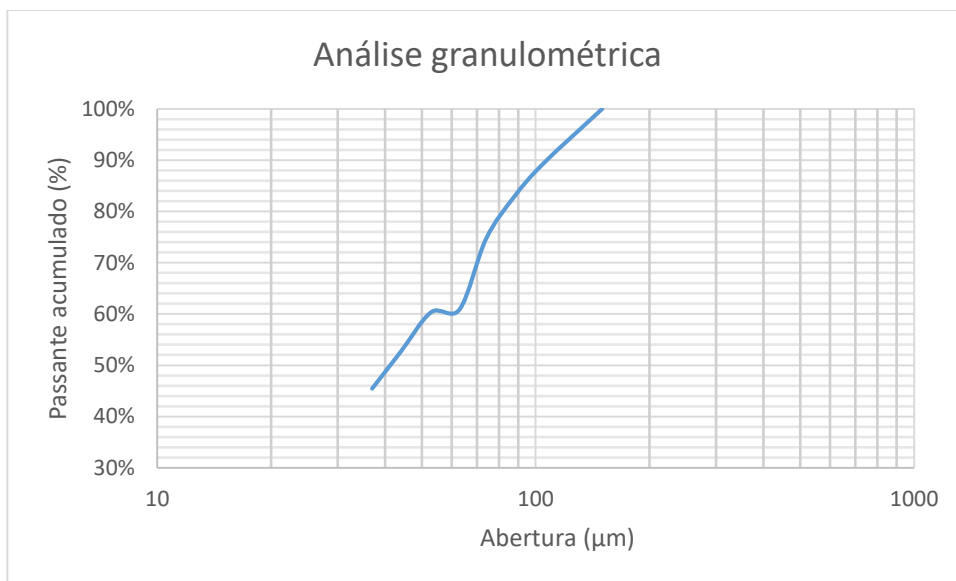


Figura 11: Curva granulométrica da amostra final.

Pela Figura 12 é possível perceber que 45,46% da amostra é passante em 38 μm e que toda a amostra estava abaixo de 150 μm, d₈₀ de aproximadamente 80 μm e um d₅₀ de aproximadamente 40 μm. Percebe-se que após a moagem foi possível conseguir um d₈₀ ideal, igual a 80 μm, para os testes de deslamagem.

A densidade do minério de ferro obtida através da técnica de picnometria foi de 4,03g/cm³.

Pela Tabela 5, pode-se notar que o material é majoritariamente formado por ferro, silício e alumínio, o que era esperado, pois foi utilizado uma amostra de minério de ferro.

Tabela 5: Dados da análise química.

Elementos	
Fe	76,56%
Si	13,72%
Al	7,49%
Mn	1,79%
K	0,44%

4.2 Hidrociclonagem

Este tópico aborda os resultados obtidos para os ensaios realizados no hidrociclone.

Na Tabela 6 estão listados os valores de densidade da polpa da alimentação bem como a vazão do overflow e do underflow obtidos para cada teste. Vale ressaltar que os valores apresentados na tabela são para a média dos valores encontrados nas duplicatas, levando em consideração o desvio padrão de no máximo 5%.

Tabela 6: Valores de densidade de polpa.

Teste	% de sólidos	Pressão	Densidade de polpa na alimentação	Vazão de polpa no OF (kg/h)	Vazão de polpa no UF (kg/h)
1	5%	30 psi	1,04x10 ³ g/l	1680,00	741,60
2	5%	15 psi	1,04x10 ³ g/l	1200,00	585,60
3	10%	30 psi	1,08x10 ³ g/l	1808,40	896,40
4	10%	15 psi	1,08x10 ³ g/l	1215,60	614,40

Através da Tabela 6 podemos notar que a vazão de polpa obtida no *underflow* é menor que a quantidade de polpa obtida no *overflow*, isso se deve à maior quantidade de água que vai para o *overflow*, devido ao funcionamento do equipamento. Como a água é a partícula mais fina, toda a fração de água deveria ser direcionada para o *overflow*.

Os produtos do teste de 5% de sólidos e 30 psi foram submetidos à análise granulométrica à úmido com a série de peneiras descrita na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.3. As tabelas com os resultados da análise granulométrica de todos os testes estão no Apêndice 2.

A eficiência do teste pode ser analisada através das curvas granulométricas. A Figura 13 representa a curva granulométrica do ensaio.

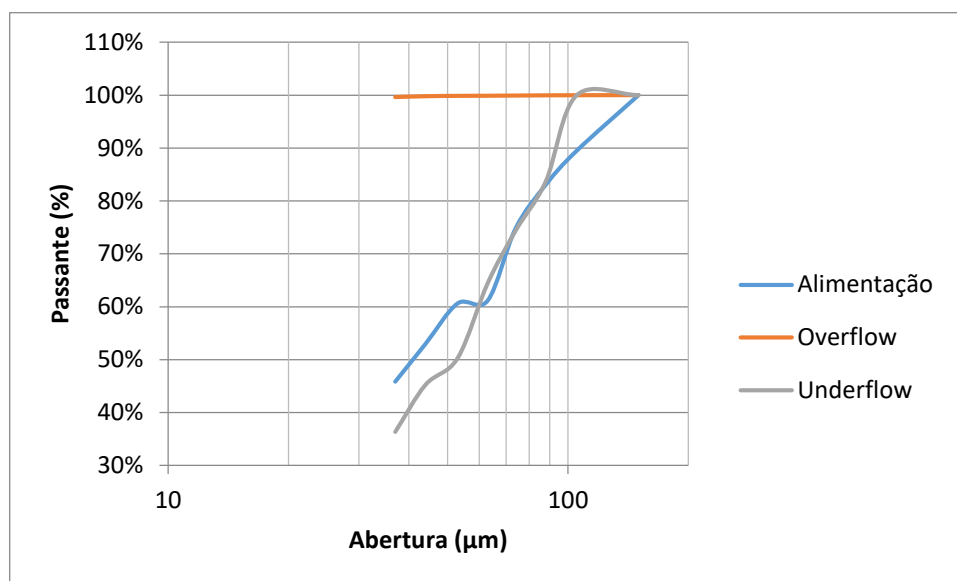


Figura 12: Curva granulométrica - 30 psi e 5% de sólidos.

Analisando a curva acima é possível notar uma redução da porcentagem das partículas menores que 38 µm no *underflow* quando comparado à alimentação, que são as partículas finas que formam as lamelas e prejudicam a eficiência da flotação, de 45,46% da alimentação para 36,35%, e no *overflow* a porcentagem das partículas na mesma faixa de tamanho é igual a 99,63%. E como é esperado, a curva granulométrica do *overflow* se mantém acima da curva granulométrica da alimentação, o que significa que tal parcela possui uma maior quantidade de finos que a alimentação, sendo importante observar que praticamente todas as partículas que foram direcionadas para o overflow são passantes em 38 µm.

Quando se trata de hidrociclone, a curva de partição é uma ferramenta importante na análise dos resultados deste equipamento, dela pode-se retirar a eficiência da operação e o diâmetro mediano de separação (d_{50}). Como não foi possível fazer uma análise granulométrica das partículas abaixo de 38 µm não foi possível realizar discussão de eficiência baseada nas curvas de partição. Todas as discussões dos resultados serão fundamentadas nas curvas granulométricas.

O segundo teste realizado foi o de 5% de sólidos com a pressão de 15 psi. Como o nível de polpa estava um pouco baixo devido à retirada de material para a realização do primeiro teste foi um pouco mais difícil manter a pressão exata de 15 psi, por isso a pressão ficou variando em 15 ± 5 psi.

As análises granulométricas do *overflow*, do *underflow* e da alimentação estão mostradas na Figura 15.

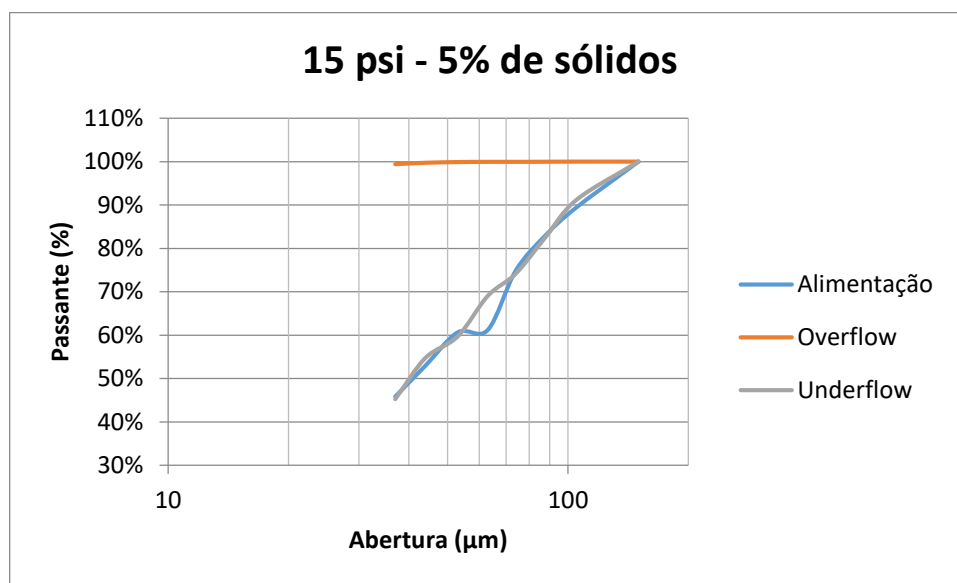


Figura 13: Curva granulométrica - 5% e 15 psi.

Analisando a curva granulométrica, pode-se perceber que a porcentagem de partículas menores que $38 \mu\text{m}$ da alimentação foi igual a 45,46%, no *overflow* esta porcentagem subiu para 99,43% e no *underflow* este valor é igual a 45,28%. Nota-se que a curva do *underflow* estava próxima ou acima da curva da alimentação e que a porcentagem de partículas menores que $38 \mu\text{m}$ caiu de 45,46% para 45,28%, o que é uma redução insignificante. A curva do *overflow* está se comportando como o esperado, acima da curva da alimentação. O comportamento da curva do *underflow* e a pequena redução das partículas menores que $38 \mu\text{m}$ indica uma baixa eficiência deste ensaio de deslamagem, principalmente quando comparadas às curvas do teste realizado com a pressão de 30 psi, percebe-se que a o teste com a pressão mais elevada foi mais eficiente no que se refere às partículas finas (abaixo de $38 \mu\text{m}$) no *underflow* que o teste de 5% de sólidos e 30 psi.

A segunda porcentagem de sólidos variada para o hidrociclone foi a de 10%, foram realizados dois testes com essa porcentagem variando a pressão, que foram de 30 e 15 psi. O primeiro teste feito foi o de 30 psi.

Para melhor visualização as curvas granulométricas dos produtos e da alimentação foram criadas e estão apresentadas na Figura 16.

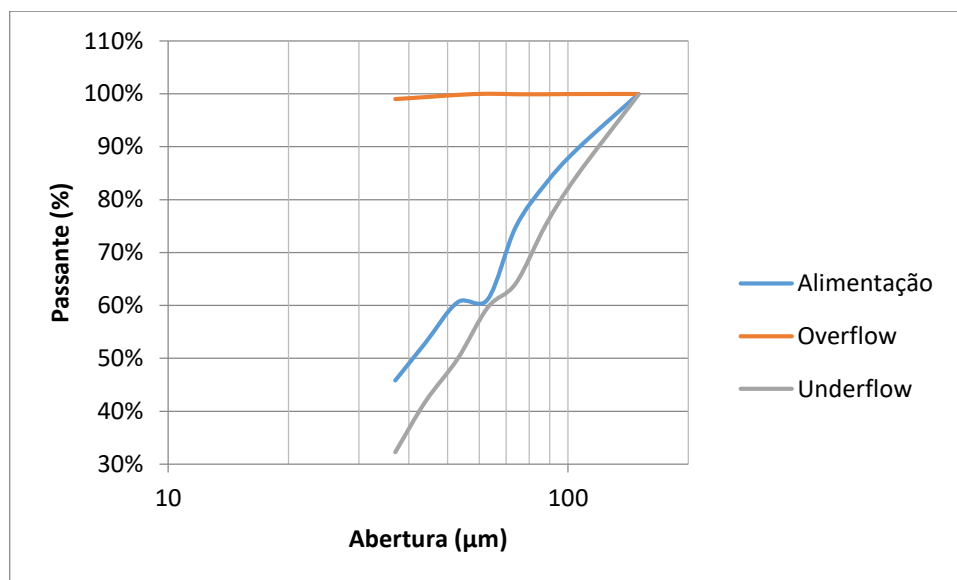


Figura 14: Curvas granulométricas de 30 psi e 10% de sólidos.

Observando curvas granulométricas é possível notar que a curva do *underflow* se mantém abaixo da curva da alimentação em toda a sua extensão e foi notável a redução da porcentagem das partículas menores que 38 μm no *underflow* quando comparado à alimentação, na alimentação a porcentagem de partículas nessa faixa foi de 45,46% e no *underflow* a porcentagem das partículas na mesma faixa foi de 32,25%. Os dois resultados apresentados por este ensaio demonstram que a deslamagem foi eficiente em toda a faixa granulométrica estudada. A porcentagem de partículas menores que 38 μm no *overflow* foi igual à 99,50% e a sua curva se comportou do mesmo modo que os testes anteriores e como era esperado, acima da curva da alimentação em toda sua extensão.

O último teste feito no hidrociclone foi com a pressão de 15 psi, e como no teste com a mesma pressão porém com a porcentagem de sólidos de 5%, foi mais difícil manter a pressão em 15 psi todo o tempo de coleta dos produtos, devido ao nível baixo de polpa.

As curvas granulométricas do teste de 10% de sólidos e pressão igual a 15 psi estão mostradas na Figura 16.

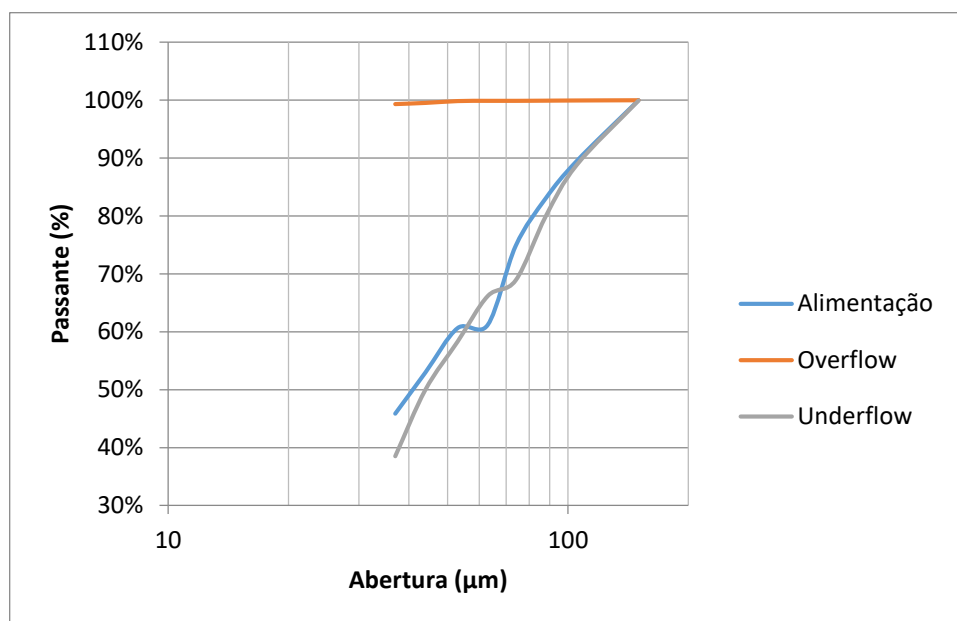


Figura 15: Curvas granulométricas - 15 psi e 10% de sólidos.

Analisando as curvas é possível notar que houve uma redução das partículas abaixo de 38 μm no *underflow* em relação à alimentação, na alimentação a porcentagem das partículas nesta faixa foi de 45,46% enquanto que no *underflow* a porcentagem foi de 38,50% e no *overflow* foi de 99,52%. Através desses dados percebe-se que este ensaio foi eficiente, houve redução nas partículas abaixo de 38 μm e a curva do *underflow* se manteve em quase toda sua extensão abaixo da curva da alimentação.

4.2.1 Comparativo entre os testes

Para ser possível determinar o teste que apresenta os melhores parâmetros este tópico irá fazer um comparativo de um dos produtos através de um gráfico de porcentagem de sólidos *versus* porcentagem redução de finos (-38 μm) no *underflow*, Figura 17.

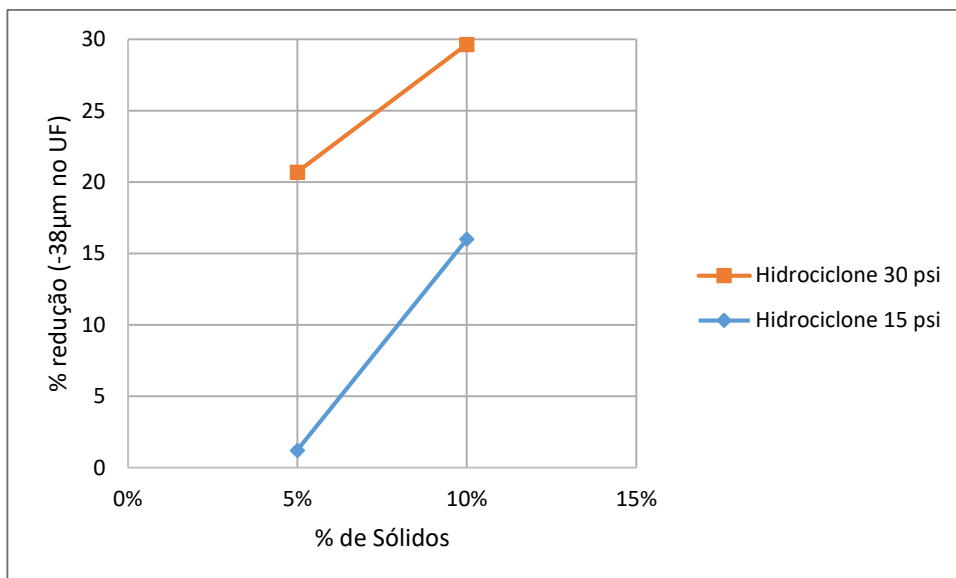


Figura 16: Gráfico redução de finos versus porcentagem de sólidos.

Analisando o gráfico, é possível perceber que os testes com a porcentagem de sólidos de 10% obtiveram uma maior redução na porcentagem de partículas menores que 38 μm no *underflow*. É possível notar que o teste de 30 psi e 10% de sólidos possui a maior redução de partículas finas (-38 μm), no *underflow*, que foi de 29,65% de redução de finos em relação à alimentação. Por estes dados, o teste de 30 psi e 10% de sólidos é considerado o mais eficiente, por apresentar menor porcentagem de partículas menores que 38 μm no *underflow*, entre os quatro. Porém essa porcentagem de redução não é o suficiente para uma operação eficiente de flotação.

Por ser o melhor teste realizado no hidrociclone, o teor de ferro de cada produto foi calculado e os valores obtidos foram 47% para o *overflow* e 69,5% para o *underflow*. Esses valores indicam que o teor de ferro no *overflow* é menor que na alimentação e no *underflow*, o que é um resultado bom, que indica que na lama (*overflow*) a quantidade de ferro é menor que no deslamado (*underflow*), porém ainda há perda de ferro das partículas que se direcionaram para o deslamado.

4.3 Decantação

Este tópico aborda os resultados obtidos com os dois testes realizados na cuba e suas duplicatas.

Os dados de densidade de polpa, pH e quantidade de NaOH utilizada estão listados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros dos ensaios da cuba.

Teste	% de sólidos	pH	Quantidade de NaOH (ml)	Densidade de polpa na alimentação
1	20%	9,52	8,15	$1,18 \times 10^3$ g/l
2	10%	9,51	4,78	$1,08 \times 10^3$ g/l

O primeiro teste realizado foi de 20% de sólidos. Para melhor visualização dos resultados deste ensaio, a curva granulométrica foi plotada e está mostrada na Figura 18.

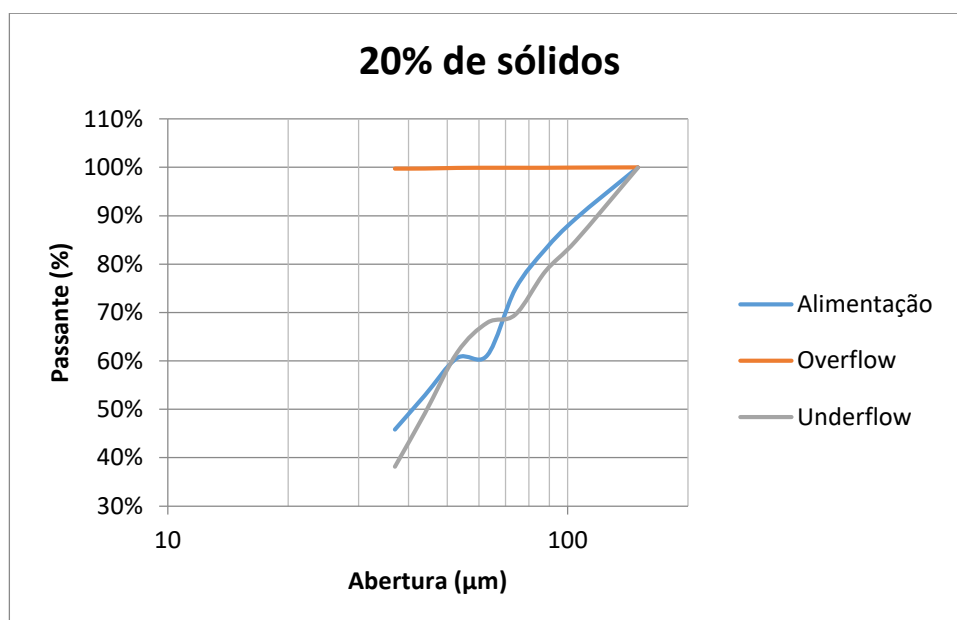


Figura 17: Curvas granulométricas - 20% de sólidos - Cuba.

Analisando as curvas granulométricas, pode-se perceber que a curva do *underflow* se mantém abaixo da curva da alimentação em grande parte da sua extensão. Em relação às partículas abaixo de 38 μm nota-se uma redução de 45,46% na alimentação para 38,12% no *underflow* e no overflow a porcentagem de partículas na mesma faixa granulométrica é igual à 99,73%. Tais dados provam que este ensaio de deslamagem se mostrou eficiente.

O segundo e último teste feito na cuba foi o teste de 10% de sólidos. As curvas granulométricas deste ensaio estão mostradas na Figura 19.

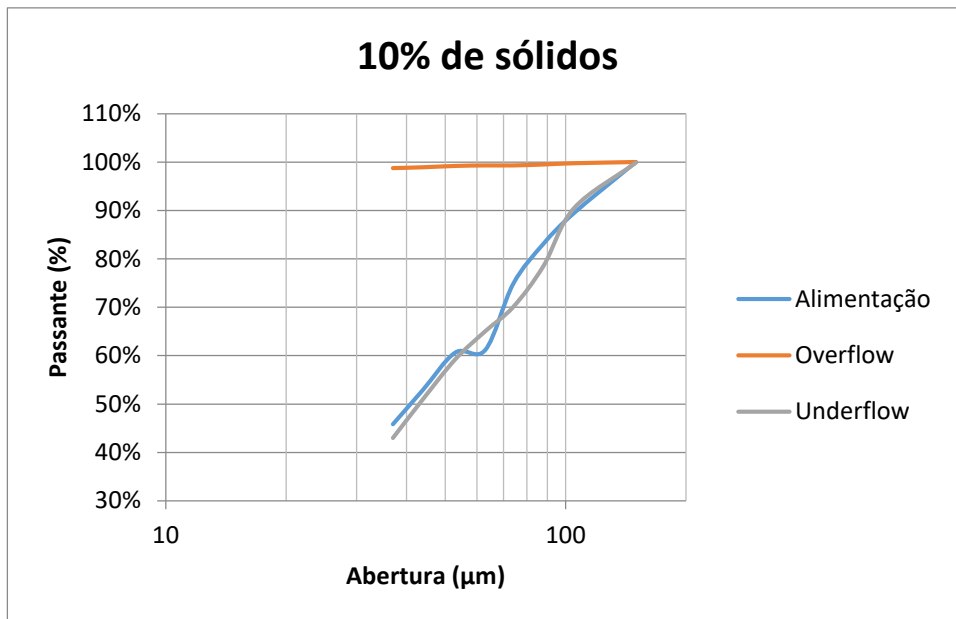


Figura 18: Curva granulométrica - 10%.

Observando curvas granulométricas acima é possível perceber que a redução das partículas menores que $38 \mu\text{m}$ foi pequena, saindo de 45,46% na alimentação para 43,02% no *underflow*. Tais valores provam que a deslamagem realizada neste ensaio não foi muito eficiente, porém pode-se notar uma redução, mesmo que sutil, das partículas menores que $38 \mu\text{m}$ no deslamado.

4.3.1 Comparativo entre os dois testes

Para melhor observação de qual o cenário mais eficiente da deslamagem na cuba, os produtos foram comparados em gráficos. Tais gráficos estão listados nas Figuras 20 e 21.

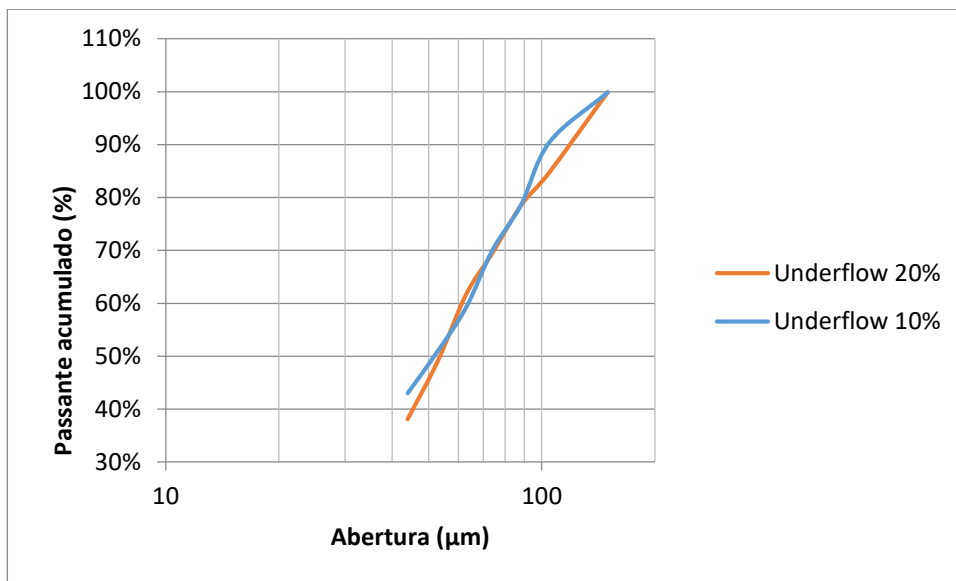


Figura 19: Comparativo underflow - cuba

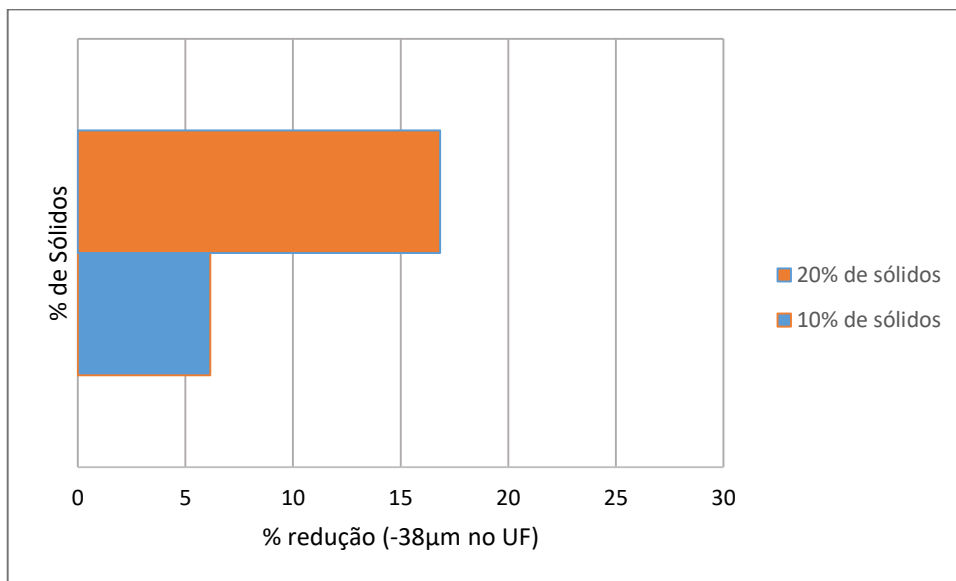


Figura 20: Porcentagem de sólidos versus porcentagem de redução de finos no underflow - cuba

Observando as curvas, pode-se notar pelo comparativo do *underflow* que os dois testes tiveram curvas muito semelhantes, porém a de 20% de sólidos se mantém mais abaixo que a outra, o que indica uma menor porcentagem de partículas abaixo de 38 μm , neste mesmo ensaio também há a maior redução de partículas na mesma faixa de tamanho, tendo uma redução de 16,84% enquanto no outro teste a redução foi de apenas 6,15%. Por esses

fatores o teste com 20% de sólidos foi o teste que obteve melhor resultado na deslamagem.

O teor de ferro dos produtos do teste de 20% de sólidos foi calculado segundo a equação 2 e foi igual à 66% para o *underflow* e 48% no *overflow*. O teor de ferro no *underflow* foi muito semelhante ao teor de ferro da alimentação e o teor de ferro do *overflow* foi 20 pontos percentuais abaixo da alimentação e do *underflow*, este fato significa que a maior parte do ferro da alimentação está indo para o deslamado e não para a lama, o que é um bom resultado.

4.4 Comparativo entre os métodos

Para analisar qual o método mais eficiente para a deslamagem de minério de ferro, a melhor forma é comparar o *underflow* do parâmetro que foi repetido nos dois equipamentos, no hidrociclone e na cuba, este parâmetro é a porcentagem de sólidos igual a 10%. A comparação foi feita através de gráfico e o mesmo está mostrado na Figura 22. Também foi criado o gráfico porcentagem de sólidos *versus* porcentagem de redução de finos ($-38 \mu\text{m}$) de todos os *underflow* obtidos e o mesmo está representado na Figura 23.

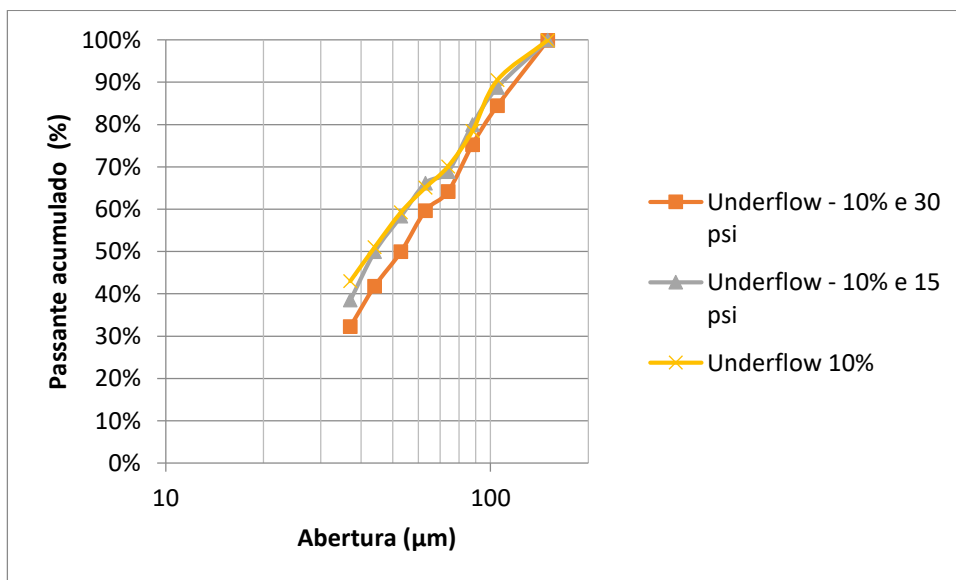


Figura 21: Comparativo entre métodos - underflow.

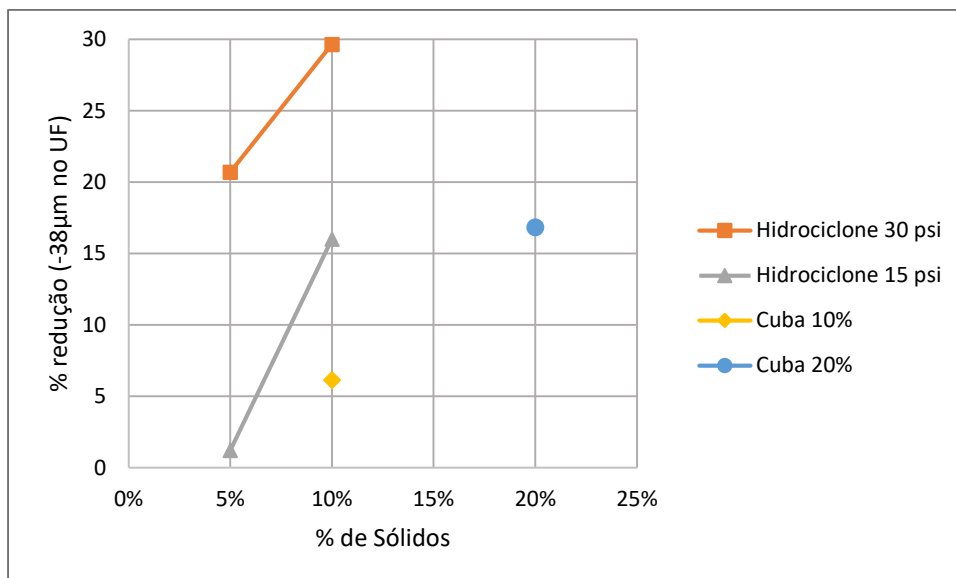


Figura 22: % de sólidos versus % redução - Comparativo.

Analisando a Figura 22 pode-se notar que os três testes possuem curvas semelhantes, porém o de 10% de sólidos e 30 psi do hidrociclone foi o mais eficiente, visto que a sua curva se mantém abaixo das outras, ou seja, é o que apresenta a menor quantidade de partículas abaixo de 38 μm , que foi de 35%. O teste 15 psi e 10 % de sólidos apresenta cerca de 40% das partículas abaixo de 38 μm e o teste da cuba possui maior porcentagem de partículas abaixo de 38 μm , com um valor de aproximadamente 42%. Pela Figura 23 é possível notar que o ensaio realizado no hidrociclone com 10% de sólidos e a pressão igual a 30 psi foi o teste que alcançou a maior redução de partículas menores que 38 μm no underflow, sendo esse valor cerca de 13 pontos percentuais acima do teste mais eficiente realizado na cuba, o ensaio com 20% de sólidos.

Vale ressaltar também que o hidrociclone é um equipamento que realiza a deslamagem de forma mais rápida que a cuba, que demanda uma espera para que seja possível haver a decantação e que o hidrociclone é capaz de trabalhar com um volume maior de polpa, porém em escala laboratorial pode ser vantajoso trabalhar com a cuba por ser um equipamento que necessita de uma massa de amostra menor.

5. CONCLUSÃO

É possível concluir que se tratando dos testes realizados no hidrociclone, a melhor condição foi com a porcentagem de sólidos igual a 10% e pressão igual a 30psi. O teste realizado nesta condição atendeu da melhor forma os objetivos citados acima, com menor teor de ferro no *overflow* e menor porcentagem de finos no *underflow*.

Quanto aos ensaios de decantação, o teste que mais atendeu aos objetivos foi o realizado na condição de 20% de sólidos, apresentando uma menor taxa de partículas finas no *underflow* que o outro teste realizado no mesmo equipamento.

Comparando os dois métodos, conclui-se que o hidrociclone é o melhor método para realizar a deslamagem, visto que atende da melhor forma os objetivos citados anteriormente e também por ser um equipamento capaz de trabalhar com uma vazão de polpa muito maior que a cuba e por executar a deslamagem de forma mais rápida.

Porém a deslamagem realizada não é ideal para a flotação por ainda conter uma porcentagem alta de partículas de granulometria abaixo de 38 μm no *underflow*.

SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

- Realizar o micropeneiramento para que seja possível trabalhar com as curvas de partição.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. C., EDUARDO, A. C., VIANA, P. R., & OLIVEIRA, J. F. (2006). Flotação de minérios de ferro. Em A. P. CHAVES, *Flotação, o estado da arte no Brasil* (pp. 317-330). São Paulo: Signus Editora.
- CARVALHO, M. J. (2008). Uso de coagulantes naturais no processo de obtenção de água potável. *Dissertação de Mestrado*. Maringá.
- CARVALHO, P. S., SILVA, M. M., ROCIO, M. A., & MOSZKOWICZ, J. (2014). *Minério de Ferro*. Fonte: Biblioteca digital do BNDES: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/?locale=pt_BR
- CASTRO, E. B. (2002). Influência de finos na flotação de minério de ferro: efeitos da granulometria e da mineralogia. *Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte.
- CHAVES, A. P., FILHO, L. d., & BRAGA, P. F. (2010). FLOTAÇÃO. Em A. B. Luz, J. A. Sampaio, & S. C. França, *Tratamento de Minérios* (p. 965). Rio de Janeiro: CETEM/MCT.
- CORREA, J. C. (2010). Classificação e peneiramento. Em J. A. ADÃO BENVINDO DA LUZ, *Tratamento de minérios* (pp. 255-297). Rio de Janeiro: CETEM.
- DEPEC. (18 de Outubro de 2016). *Minério de Ferro*. Fonte: Economia em Dia: https://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_minerio_de_ferro.pdf
- FERREIRA, R. C. (2007). Controle da pressão de alimentação dos ciclones da deslamagem por meio de suas válvulas operacionais. *Monografia de graduação*. Ouro Preto.
- JESUS, C. A. (14 de Junho de 2016). *Sumário Mineral - Ferro*. Fonte: Departamento nacional de produção mineral: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2015>
- JOÃO ALVES SAMPAIO, G. P. (2007). Ensaio de classificação em hidrociclones. Em *Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais* (pp. 137-154). CETEM.

- LELIS, D. F. (2014). Influência de cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} E Mn^{2+} na flotação. *Dissertação de Mestrado*. Ouro Preto.
- LINS, F. A. (2010). Concentração gravítica. Em J. A. ADÃO BENVINDO DA LUZ, *Tratamento de Minérios* (pp. 299-326). Rio de Janeiro: CETEM.
- NASCIMENTO, D. R. (2010). Flotação aniônica de minério de ferro. *Dissertação de mestrado*. Ouro Preto.
- NASCIMENTO, H. N. (2014). Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A. *Dissertação de mestrado*. Belo Horizonte.
- OLIVEIRA, M. F. (2016). Poliacrilamidas na flotação catiônica reversa de minério de ferro. *Dissertação de mestrado*. Belo Horizonte.
- PERES, A. E., COELHO, E. M., & ARAÚJO, A. C. (1980). Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva. *Apud TOTOU, A. R. Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos itabiríticos*. Ouro Preto, 2010.
- RAMACHANDRAN, R., & SOMASUNDARAN, P. (1986). Effect of Temperature on the Interfacial Properties of Silicates. Em *Colloids and Surfaces*, 21 (pp. 355-369). New York: Elsevier BV.
- SALVADOR, F. F., KYRIAKIDIS, Y. N., GONÇALVES, S. M., BARROZO, M. A., & VIEIRA, L. G. (2015). ESTUDO DO EFEITO DA PERMEABILIDADE NA PERFORMANCE DO HIDROCICLONE CILÍNDRICO FILTRANTE. *Artigo apresentado no XXXVII congresso brasileiro de sistemas particulados*. São Carlos, São Paulo.
- SANTOS, E. P. (2010). Alternativas para o tratamento de ultrafinos de minério de ferro da Mina do Pico/MG por Flotação em Coluna. *Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre.
- SOMASUNDARAN, P. (1980). Principles of flocculation, dispersion and selective flocculation. Em P. SOMASUNDARAN, *Fine particles processing*. Vol. II (pp. 947-976). New York.
- STEELONTHENET. (s.d.). *Steel Plant Information*. Fonte: Steelonthenet.com: <http://www.steelonthenet.com/>
- TOTOU, A. R. (2010). *Efeito da dispersão na deslamagem e flotação de polpas de minérios hematíticos itabiríticos*. Ouro Preto.

YANG. (1979). Flotation in Systems with Controlled Dispersion – Carrier Flotation, etc. Em N. A. P. SOMASUNDARAN, *Beneficiation of Mineral Fines* (pp. 295-308). New York: AIME.

APÊNDICE 1 – DADOS DA PICNOMETRIA

A.1 1: Dados da picnometria da amostra primária.

	Picnômetro 1	Picnômetro 2	Picnômetro 3
A₁²	30,77g	29,72g	29,86g
A₂	35,70g	34,42g	34,71g
A₃	85,28g	83,67g	84,13g
A₄	81,60g	80,15g	80,56g

A.1 2: Dados da picnometria da amostra final.

	Pic1	Pic2	Pic3	Pic4	Pic5
A₁	30,78g	29,74g	29,90g	30,55g	30,83g
A₂	33,45g	32,27g	32,68g	34,85g	32,95g
A₃	83,56g	82,03g	82,54g	83,15g	82,27g
A₄	81,62g	80,17g	80,47g	80,01g	80,68g

A.1 3: Dados de densidade - Amostra final.

	Densidade (g/cm ³)	Desvio padrão
Densidade 1	4,00	3,78%
Densidade 3	4,08	
Densidade 5	4,00	
Densidade média	4,03	

A.1 4: Dados da picnometria - Underflow teste 30% - 10 psi – hidrociclone.

	Picnômetro 1	Picnômetro 2	Picnômetro 3
A1	30,64	29,92	30,83
A2	36,32	33,94	34,7
A3	84,41	83,55	84,63
A4	80,16	80,57	81,65
ρ_{média} (g/cm³)	4,06		

² A₁ massa do picnômetro vazio e seco;
A₂ massa do picnômetro + amostra;
A₃ massa do picnômetro + amostra + água;
A₄ massa do picnômetro + água.

A.1 5: Dados da picnometria - Overflow teste 30% - 10 psi - hidrociclone.

	Picnômetro 1	Picnômetro 2	Picnômetro 3
A1	30,86	30,31	31,07
A2	33,40	33,54	33,86
A3	82,51	83,31	83,46
A4	80,70	81,01	81,48
$\rho_{\text{média}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	3,47		

A.1 6: Dados da picnometria - Underflow teste 10% - Cuba.

	Picnômetro 1	Picnômetro 2	Picnômetro 3
A1	30,62	29,89	30,78
A2	34,07	32,96	33,67
A3	82,73	82,87	83,81
A4	80,17	80,56	81,65
$\rho_{\text{média}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	3,96		

A.1 7: Dados da picnometria - Overflow teste 10% - Cuba.

	Picnômetro 1	Picnômetro 2	Picnômetro 3
A1	30,80	30,34	31,05
A2	33,67	31,59	32,01
A3	81,36	81,91	82,14
A4	80,50	81,02	81,47
$\rho_{\text{média}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	3,49		

APÊNDICE 2 – DADOS DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A.2 1: Dados da análise granulométrica da amostra final.

Malha (#)	Massa retida	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)	Passante (%)
100	0	0,00	0,00	100,00
140	21,09	10,54	10,54	89,46
170	12,78	6,39	16,93	83,07
200	16,46	8,23	25,16	74,84
230	27,33	13,66	38,82	61,18
270	1,09	0,54	39,37	60,63
325	15,4	7,70	47,06	52,94
400	14,2	7,10	54,16	45,84
-400	90,3	45,84	100,00	0,00
Total	198,65	Massa inicial 200,05		Perda percentual 0,1%

A.2 2: Dados da análise granulométrica da amostra primária.

Malha (#)	Massa retida (g)	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)	Passante (%)
3/8"	0,00	0,00	0,00	100,00
4	38,38	7,11	7,11	92,89
6	38,01	7,04	14,15	85,85
8	24,69	4,57	18,72	81,28
9	14,26	2,64	21,36	78,64
10	10,17	1,88	23,24	76,76
16	17,62	3,26	26,51	73,49
20	27,09	5,02	31,52	68,48
28	16,41	3,04	34,56	65,44
35	25,42	4,71	39,27	60,73
48	17,33	3,21	42,48	57,52
60	12,81	2,37	44,85	55,15
65	19,13	3,54	48,39	51,61
80	31,8	5,89	54,28	45,72
100	73,61	13,63	67,91	32,09
115	5,01	0,93	68,84	31,16
150	70,15	12,99	81,83	18,17
170	46,54	8,62	90,45	9,55
200	4,71	0,87	91,32	8,68
270	13,64	2,53	93,85	6,15
325	11,28	2,09	95,94	4,06
400	19,66	3,64	99,58	0,42
-400	2,27	0,42	100,00	0,00
Total	539,99	Massa inicial 550,00 g	Perda percentual 1,84%	

.2 3: Análise granulométrica - 5% e 30 psi – Overflow Hidrociclone

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00	0,00	100,00
140#	105	0,02	0,02	0,02	99,98
170#	88	0,02	0,02	0,04	99,96
200#	74	0,04	0,04	0,08	99,92
230#	63	0,04	0,04	0,12	99,88
270#	53	0,02	0,02	0,14	99,86
325#	44	0,07	0,07	0,21	99,79
400#	37	0,16	0,16	0,37	99,63
-400#	37	98,54	99,63	100,00	0,00
Total		98,91	100,00		

A.2 4: Análise granulométrica - 5% e 30 psi – Underflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00	0,00	100,00
140#	105	0,57	0,06	0,06	99,94
170#	88	166,07	16,25	16,30	83,70
200#	74	94,91	9,28	25,59	74,41
230#	63	101,54	9,93	35,52	64,48
270#	53	144,75	14,16	49,68	50,32
325#	44	52,08	5,09	54,78	45,22
400#	37	90,67	8,87	63,65	36,35
-400#	37	371,62	36,35	100,00	0,00
Total		1022,21	100,00		

A.2 5: Análise granulométrica - 5% e 15 psi – Overflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00%	0,00%	100,00%
140#	105	0	0,00%	0,00%	100,00%
170#	88	0,02	0,03%	0,03%	99,97%
200#	74	0,02	0,03%	0,05%	99,95%
230#	63	0	0,00%	0,05%	99,95%
270#	53	0,04	0,05%	0,10%	99,90%
325#	44	0,12	0,15%	0,26%	99,74%
400#	37	0,24	0,31%	0,57%	99,43%
-400#	37	77,11	99,43%	100,00%	0,00%
Total		77,55	100,00%		

A.2 6: Análise granulométrica - 5% e 15 psi – Underflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0,16	0,02%	0,02%	99,98%
140#	105	56,61	8,79%	8,82%	91,18%
170#	88	54,79	8,51%	17,33%	82,67%
200#	74	54,75	8,50%	25,83%	74,17%
230#	63	33	5,13%	30,96%	69,04%
270#	53	60	9,32%	40,28%	59,72%
325#	44	31,97	4,97%	45,25%	54,75%
400#	37	60,98	9,47%	54,74%	45,30%
-400#	37	291,37	45,26%	100,00%	0,00%
Total		643,77	100,00%		

A.2 7: Análise granulométrica - 10% e 30 psi – Overflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,04	0,00	99,96
140#	105	0,05	0,05	0,04	99,95
170#	88	0,02	0,09	0,05	99,91
200#	74	0,05	0,09	0,09	99,91
230#	63	0	0,00	0,09	100,00
270#	53	0,16	0,22	0,00	99,78
325#	44	0,54	0,64	0,22	99,36
400#	37	0,47	1,00	0,64	99,00
-400#	37	255,72	0,04	100,00	0,00
Total		257,01	100,00		

A.2 8: Análise granulométrica - 10% e 30 psi – Underflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	3,03	0,14	0,14	99,86
140#	105	340,73	15,43	15,56	84,44
170#	88	202,93	9,19	24,75	75,25
200#	74	245,19	11,10	35,85	64,15
230#	63	100,00	4,53	40,38	59,62
270#	53	213,97	9,69	50,07	49,93
325#	44	179,56	8,13	58,20	41,80
400#	37	210,92	9,55	67,75	32,25
-400#	37	712,31	32,25	100,00	0,00
Total		2208,64	100,00		

A.2 9: Análise granulométrica - 10% e 15 psi – Overflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00	0,00	100,00
140#	105	0,08	0,04	0,04	99,96
170#	88	0,06	0,03	0,07	99,93
200#	74	0,06	0,03	0,11	99,89
230#	63	0	0,00	0,11	99,89
270#	53	0,08	0,04	0,15	99,85
325#	44	0,62	0,33	0,48	99,52
400#	37	0,39	0,21	0,68	99,32
-400#	37	187,82	99,32	100,00	0,00
Total		189,11	100,00		

A.2 10: Análise granulométrica - 10% e 15 psi – Underflow Hidrociclone.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	1,15	0,09	0,09	99,91
140#	105	143,41	11,16	11,25	88,75
170#	88	113,1	8,80	20,05	79,95
200#	74	142,26	11,07	31,12	68,88
230#	63	35,00	2,72	33,84	66,16
270#	53	100,73	7,84	41,68	58,32
325#	44	107,4	8,36	50,04	49,96
400#	37	147,28	11,46	61,50	38,50
-400#	37	494,77	38,50	100,00	0,00
Total		1285,1	100,00		

A.2 11: Análise granulométrica - 20%– Overflow Cuba.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00%	0,00%	100,00%
140#	105	0,06	0,05%	0,05%	99,95%
170#	88	0,06	0,05%	0,09%	99,91%
200#	74	0	0,00%	0,09%	99,91%
230#	63	0	0,00%	0,09%	99,91%
270#	53	0,04	0,03%	0,13%	99,87%
325#	44	0,18	0,14%	0,27%	99,73%
400#	37	0,03	0,02%	0,29%	99,71%
-400#	37	126,91	99,71%	100,00%	0,00%
Total		127,28	100,00%		

A.2 12: Análise granulométrica - 20%– Underflow Cuba.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	1,46	0,09	0,09	99,91
140#	105	246,41	15,09	15,18	84,82
170#	88	103,67	6,35	21,53	78,47
200#	74	145,97	8,94	30,47	69,53
230#	63	27,00	1,65	32,12	67,88
270#	53	100,19	6,14	38,26	61,74
325#	44	204,94	12,55	50,81	49,19
400#	37	180,68	11,07	61,88	38,12
-400#	37	622,4	38,12	100,00	0,00
Total		1632,72	100,00		

A.2 13: Análise granulométrica - 10%– Overflow Cuba.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0	0,00	0,00	100,00
140#	105	0,12	0,25	0,25	99,75
170#	88	0,12	0,25	0,49	99,51
200#	74	0,09	0,19	0,68	99,32
230#	63	0	0,00	0,68	99,32
270#	53	0,05	0,10	0,78	99,22
325#	44	0,13	0,27	1,05	98,95
400#	37	0,08	0,16	1,22	98,78
-400#	37	47,92	98,78	100,00	0,00
Total		48,51	100,00		

A.2 14: Análise granulométrica - 10%– Underflow Cuba.

Malha (#)	Tamanho (µm)	Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Passante Acumulado (%)
100#	150	0,83	0,10	0,10	99,90
140#	105	75,23	9,42	9,52	90,48
170#	88	95,81	11,99	21,51	78,49
200#	74	67,19	8,41	29,92	70,08
230#	63	40	5,01	34,93	65,07
270#	53	46,38	5,80	40,73	59,27
325#	44	65,81	8,24	48,97	51,03
400#	37	64,06	8,02	56,98	43,02
-400#	37	343,69	43,02	100,00	0,00
Total		799	100,00		