

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM DE REJEITOS PARA
EMPILHAMENTO A SECO

FREDERIC YANN ARMACHE BRAGA

BELO HORIZONTE-MG

MARÇO DE 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM DE REJEITOS PARA
EMPILHAMENTO A SECO

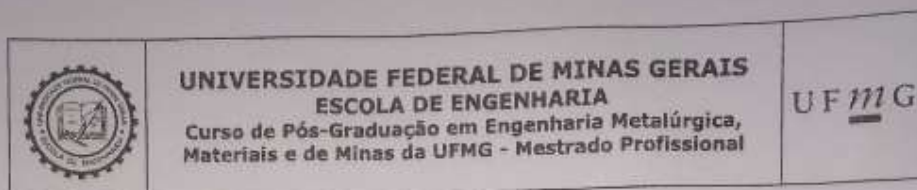
Autor: FREDERIC YANN ARMACHE BRAGA
Orientador: PROF. DR. LUIZ CLAUDIO MONTEIRO
MONTENEGRO

Planejamento da dissertação apresentada para o Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Minas Gerais como pré-requisito para a conclusão da disciplina “Introdução à Metodologia em Pesquisa Científica”

BELO HORIZONTE-MG

MARÇO 2021

R433c	<p>Braga, Frederic Yann Armache. Utilização de tecnologias de filtragem de rejeitos para empilhamento a seco [recurso eletrônico] / Frederic Yann Armache Braga. – 2021. 1 recurso online (xi, 80 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Luiz Cláudio Monteiro Montenegro.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexo: f. 74.</p> <p>Bibliografia: f. 75-77. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Microondas - Teses. 4. Resíduos - Teses. 5. Ferro - Teses. 6. Separação magnética de minério - Teses. I. Montenegro, Luiz Claudio Monteiro. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	--



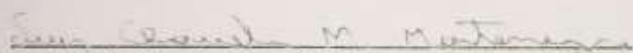
**UTILIZAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE FILTRAGEM DE REJEITOS PARA
EMPILHAMENTO A SECO**

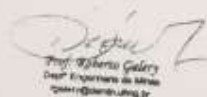
FREDERIC YANN ARMACHE BRAGA

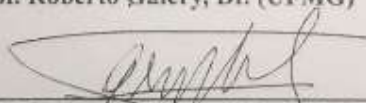
Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

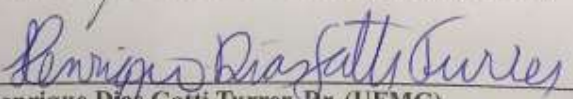
Aprovada em 12 de abril de 2021.

Por:


Prof. Luiz Claudio Monteiro Montenegro, Dr. (UFMG)
Orientador


Prof. Roberto Galery, Dr. (UFMG)


Prof. George Eduardo Sales Valadao, Dr. (UFMG)


Henrique Dias Gatti Turrer, Dr. (UFMG)

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na preparação deste trabalho e, em particular:

- Ao orientador Luiz Cláudio Monteiro Montenegro por todo apoio, dedicação, exemplo e amizade;
- Aos membros da banca pelo apoio prestado;
- Ao Henrique Turrer pela oportunidade e pelo incentivo;
- Ao Luan Queiroz, André Gazire e Eron Lage por todo apoio prestado ao longo da execução dos testes;
- A mineradora Anglo American e equipe de processo do CTM pela oportunidade e todo suporte para o desenvolvimento dos estudos;
- A Outotec pela execução dos ensaios.

RESUMO

Diante do atual cenário vivido pela mineração brasileira faz-se necessário o estudo e utilização de tecnologias que possibilitem uma disposição de rejeitos de forma mais segura e controlada. Cabe as empresas avaliarem, entre as diversas alternativas existentes, aquelas que atendam aos requisitos ambientais, legais e ainda apresentem uma relação técnico-econômica satisfatória. As alternativas de processo mais estudadas e aplicadas industrialmente contemplam a combinação entre etapas de adensamento da polpa seguida de filtração, com o intuito de maximizar a remoção de água e possibilitar o empilhamento do material filtrado com baixa umidade residual. O presente estudo contempla avaliações de processo que visam a máxima eficiência de separação sólido-líquido para os diferentes tipos de rejeitos proveniente do beneficiamento do minério de ferro da Serra do Sapo. Os testes foram realizados com três diferentes tecnologias de filtração, o filtro de disco convencional, filtro cerâmico e filtro prensa, e dois tipos de amostras preparadas sob diferentes condições de composição entre material arenoso e material ultrafino, adensamento da polpa e coagulação da polpa. Foram avaliados os valores de umidade residual da torta filtrada e produtividade dos filtros. A composição da amostra apresentou impacto significativo no desempenho dos filtros de tecnologia a vácuo, onde a ausência de material ultrafino obteve produtividades médias de 2.410 kg/m².h e 1870 kg/m².h, para os filtros de cerâmico e a vácuo convencional respectivamente. Para o filtro prensa a diferença não foi considerável, mas as produtividades obtidas foram da ordem de 278 kg/m².h. Os valores de umidade de todos os ensaios ficaram abaixo do limite estabelecido de 14%. A coagulação apresentou papel de fundamental relevância no desempenho da etapa de filtração. Nos testes com tecnologias a vácuo e sem coagulação prévia nem houve formação de torta suficiente para obtenção de valores de produtividade. Em relação ao filtro prensa, quando comparados com a amostra tal qual os testes com a amostra coagulada, nas mesmas condições, apresentaram uma redução da umidade residual, de 15,92% para 7,26%, e aumento da produtividade média, de 111,40 kg/m².h para 251,12 kg/m².h. A diluição da polpa também possui relevância na eficiência do processo de filtração, principalmente para as tecnologias de filtração a vácuo. Quando comparados com a amostra tal qual, os testes com a amostra adensada nas mesmas condições apresentaram em média aumento da umidade residual, de 9,10% para 11,41%, e aumento da produtividade, de 1208 kg/m².h para 2410 kg/m².h no filtro cerâmico. Para o filtro de disco a vácuo convencional, a amostra adensada obteve aumento da umidade, de 9,26% para 9,98%, e aumento da produtividade, de 903 kg/m².h para 1870 kg/m².h. Já para o filtro prensa a diferença foi menor, sendo a amostra adensada e tal qual com umidades residuais entre 7% e 8% com produtividades da ordem de 260 kg/m².h. Os resultados demonstraram potencial de aplicação das tecnologias de filtração a vácuo para o rejeito arenoso e para a composição entre rejeito arenoso e ultrafino, com uma queda na produtividade e aumento nos valores de umidade residual. Já para o material ultrafino, só foi possível obter resultados mensuráveis a partir do uso de filtro prensa.

Palavras-chave: Minério de ferro; Filtração; Desaguamento.

ABSTRACT

In view of the current scenario experienced by Brazilian mining, it is necessary to study and develop technologies that enable a safer and controlled disposal of waste. It is up to the companies to evaluate, among the several existing alternatives, those that meet the environmental and legal requirements and still present a satisfactory technical-economic relationship. The most studied and industrially applied process alternatives include the combination of slurry dewatering steps followed by filtration, in order to maximize the removal of water and make it possible to stock the filtered material with low residual moisture. The present study contemplates process evaluations that aim at the maximum efficiency of solid-liquid separation for the different types of tailings from the processing of the iron ore of Serra do Sapo. The tests were carried out with three different filtration technologies, the conventional disc filter, ceramic filter and press filter, and two types of samples prepared under different composition conditions between coarse and ultrafine material, pulp density and slurry coagulation. The residual moisture values of the filtered cake and the productivity of the filters were evaluated. The sample composition had a significant impact on the performance of vacuum technology filters, where the absence of ultrafine material obtained average productivities of 2,410 kg / m².h and 1870 kg / m².h, for ceramic and conventional vacuum filters respectively. For the press filter the difference was not considerable, in the order of 278 kg/m².h. The final moisture values of all tests were previously established in a limit of 14%. Coagulation played a fundamental role in the performance of filtering. In tests with vacuum technologies and without previous coagulation, there was not enough cake formation to obtain productivity values. In relation to the filter press, when compared to the sample just as the tests with the coagulated sample, under the same conditions, showed a reduction in residual moisture, from 15.92% to 7.26%, and an increase in average productivity, from 111,40 kg/m².h to 251.12 kg/m².h. Slurry dilution is also relevant to the efficiency of the filtration process, especially for vacuum filtration technologies. When compared to the sample as it is, tests with a dense sample under the same conditions showed an average increase in residual moisture, from 9.10% to 11.41%, and an increase in productivity, from 1208 kg/m².h to 2410 kg/m².h in the ceramic filter. For the conventional vacuum disc filter, the densified sample obtained an increase in moisture, from 9.26% to 9.98%, and an increase in productivity, from 903 kg/m².h to 1870 kg/m².h. As for the filter press, the difference was smaller, with the sample being dense and just as with residual moisture between 7% and 8% with productivity in the order of 260 kg/m².h. The results presents a potential for application of vacuum filtration technologies for flotation tailings and for the composition between flotation tailings and ultrafine tailings, with a drop in productivity and an increase in residual moisture values. As for the ultrafine material, it was only possible to obtain measurable results from the use of a filter press.

Key words: Iron ore; Filtering; Dewatering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Produção de aço cru e ferro no mundo e na China desde 1980 (Adaptado de LU 2015).	15
Figura 3.2 - Cava sistema Minas-Rio (extraído de Google Earth Pro, 2017).....	17
Figura 3.3 - Diferentes tipos de itabiritos da Serra do Sapo (BARROS, 2017).	17
Figura 3.4 - Fluxograma Minas-Rio (Anglo American, material interno).	19
Figura 3.5 - Número de incidentes de rompimento de estruturas de contenção de rejeitos por país (RICO et. al., 2008).	22
Figura 3.6 - Diagrama de coagulação (SASAKI, 2015).	26
Figura 3.7 - (A) Adição do reagente; (B) Homogeneização do produto na solução; (C) Adsorção na superfície do sólido; (D) Floculação; (E) Quebra dos flocos. (LUZ, 2004).	28
Figura 3.8 - Arranjo de um espessador convencional contínuo (Anglo American, material interno).	31
Figura 3.9 - Espessadores industriais (Anglo American, material interno).....	32
Figura 3.10 - Zonas de sedimentação em um espessador (LUZ et al., 2004).	33
Figura 3.11 - Princípio da filtração.	34
Figura 3.12 - Filtro de disco a vácuo convencional.....	36
Figura 3.13 - Zonas do filtro de disco a vácuo convencional.....	37
Figura 3.14 - Filtro de disco a vácuo convencional.....	38
Figura 3.15 - Filtro de disco cerâmico (SUTHERLAND, 2008).	39
Figura 3.16 - Comparativo material filtrado. (1) Filtro cerâmico, (2) Filtro de disco a vácuo convencional (Acervo Anglo American).....	41
Figura 3.17 - Ciclo de filtração de um filtro cerâmico. (1) - Formação, (2) - Secagem, (3) - Descarga, (4) - Limpeza, (5) Regeneração (SMITH, 2015).....	42
Figura 3.18 - Filtro cerâmico (Acervo Anglo American).....	43
Figura 3.19 - Mecanismo de funcionamento do Filtro Prensa.	44
Figura 3.20 - Arranjo de um par de placas com diafragma (SPARKS, 2012).	45
Figura 3.21 - Ciclo completo de um filtro prensa horizontal (SPARKS, 2012).....	46
Figura 4.1 - Fluxograma de processo Minas-Rio.	48
Figura 4.2 - Planejamento dos testes laboratoriais de filtração.....	54

Figura 4.3 - Filtro a vácuo convencional laboratorial.	55
Figura 4.4 - Filtro cerâmico laboratorial.	56
Figura 4.5 - Filtro prensa laboratorial.....	57
Figura 5.1 - Distribuição granulométrica das amostras testadas.	59
Figura 5.2 - Comparativo entre tecnologias para a amostra de rejeito da flotação adensado.	61
Figura 5.3 - Comparativo entre tecnologias para a amostra de rejeito total adensado.	62
Figura 5.4 - Comparativo entre amostra de rejeito da flotação, sendo a amostra da esquerda coagulada e a amostra da direita não coagulada.	64
Figura 5.6 - Formação de torta obtida com amostra sem coagulação utilizando filtro cerâmico..	65
Figura 5.7 - Torta filtrada em filtro prensa sem coagulação prévia.	66
Figura 5.8 - Torta filtrada em filtro prensa com coagulação prévia	66
Figura 5.9 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito da flotação utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.	67
Figura 5.10 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.	67
Figura 5.12 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro de disco cerâmico.....	69
Figura 5.13 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito da flotação utilizando o filtro prensa.....	70
Figura 5.14 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro prensa.	70
Figura 5.15 - Comparativo dos resultados de filtragem para amostras com diferentes composições utilizando o filtro cerâmico.....	71
Figura 5.16 - Comparativo dos resultados de filtragem para amostras com diferentes composições utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.	72
Figura 5.17 - Comparativo dos resultados de filtragem para amostras com diferentes composições utilizando o filtro prensa.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais impactos gerados pela má gestão de estruturas de contenção de rejeitos (RICO et. al., 2008).	21
Tabela 4.1 - Elementos quantificados na análise química.....	51
Tabela 4.2 - Condições de adensamento para execução dos ensaios.	53
Tabela 4.3 - Valores de pH antes e após coagulação.....	53
Tabela 5.1 - Caracterização Granulométrica.	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVO.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Mercado, jazidas e Minas-Rio	15
3.2 Beneficiamento do minério de ferro	18
3.3 Geração e disposição de rejeitos	21
3.4 Reologia de polpa	23
3.5 Adsorção	24
3.6 Coagulação.....	25
3.7 Flocculação	27
3.8 Espessadores	29
3.8.1 Espessador contínuo convencional.....	30
3.9 Filtragem.....	34
3.9.1 Filtro de disco a vácuo convencional.....	36
3.9.2 Filtro Cerâmico	39
3.9.3 Filtro Prensa	43
4. METODOLOGIA	48
4.1 Definição das amostras	48
4.2 Amostragem.....	49
4.3 Caracterização das amostras	50
4.3.1 Caracterização granulométrica.....	50
4.3.2 Análise química.....	51
4.3.3 Análise de densidade dos sólidos.....	51

4.3.4	Análise de área superficial específica	51
4.4	Ensaio tecnológicos.....	52
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	Caracterização Tecnológica.....	58
5.2	Ensaio tecnológicos.....	60
5.3	Influência da tecnologia.....	60
5.4	Influência da coagulação.....	63
5.5	Influência da diluição.....	66
5.6	Influência da composição da amostra.....	71
6.	CONCLUSÕES.....	74
	ANEXO I.....	76
	REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

As rotas de processo e etapas unitárias envolvidas no beneficiamento do minério de ferro são amplamente consolidadas e suficientemente eficientes do ponto de vista metalúrgico. Mesmo com a tendência de redução dos teores e consequente queda da qualidade geometalúrgica das jazidas houve, ao longo das últimas décadas, o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos que possibilitaram o tratamento de volumes cada vez maiores de minério. Tal fato aliado a metodologias extrativas de baixo custo, fizeram com que reservas, anteriormente vistas como economicamente inviáveis, se transformassem em empreendimentos lucrativos.

Um fato que demonstra a crescente e constante demanda ao redor do globo é o salto de produção obtido em um horizonte de apenas 11 anos. Como evidência pode-se citar que a produção mundial aumentou de 1,043 bilhão de toneladas em 2001 para 2,93 bilhões de toneladas em 2012. Uma engrenagem primordial no aumento dessa demanda foi o mercado asiático, liderado pela China, que elevou suas importações de 50 milhões de toneladas em 2000 para aproximadamente 820 milhões de toneladas em 2013 (LU, 2015).

Para o minério de ferro, a elevada demanda de mercado, a boa margem de lucro e a relativa facilidade de beneficiamento atraíram empreendimentos de grandes capacidades visando uma elevada produtividade e um baixo custo de produção. Tais empreendimentos, em sua grande maioria, combinam etapas unitárias tidas como clássicas, em rotas de processo cada vez mais bem detalhadas e com abertura para tecnologias que vem ganhando espaço ao longo dos últimos anos no setor mineral.

Na contramão de todo esse cenário há, conseqüentemente, uma elevação da geração dos rejeitos oriundos do processo, que demandam uma tratativa e manuseio tão eficiente quanto ao empregado ao produto de valor econômico. Tal situação aliada ao atual cenário vivido pela mineração brasileira, demandam o estudo e utilização de rotas e tecnologias que possibilitem o manuseio e disposição desses rejeitos de forma mais segura e controlada. Uma das alternativas passa pelo adensamento e posterior separação da fase líquida presente nos rejeitos, seja pela filtragem ou demais tecnologias existentes.

2. OBJETIVO

O objetivo geral desse trabalho é estudar as diferentes metodologias de adensamento e separação sólido-líquido com aplicabilidade para rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, visando a obtenção de rotas de processo que possibilitem uma disposição de rejeitos a seco que atendam aos requisitos técnicos de processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mercado, jazidas e Minas-Rio

Se o DNA é considerado o alicerce da vida, então pode-se afirmar que os minerais e rochas industriais são os alicerces do nosso estilo de vida. Tais elementos formam um grupo excepcionalmente diverso e vital de matérias primas que sustentam praticamente todos os aspectos da atividade humana, infraestrutura e padrão de vida. Atualmente mais de 60 commodities são comumente consideradas minerais e/ou rochas industriais que fornecem inúmeros produtos usados por praticamente todas as indústrias existentes no globo terrestre.

Entre as principais commodities existentes e comercializadas atualmente destaca-se o minério de ferro, matéria prima para fabricação do aço, que por sua vez é um composto formado basicamente por ferro e carbono e devido a sua combinação de força, capacidade de moldagem, versatilidade, reciclabilidade e baixo custo acabou se tornando um produto vital para a economia global. A figura 3.1 mostra o salto de produção de aço bruto a partir de 2000, sendo a China o maior responsável por tal elevação.

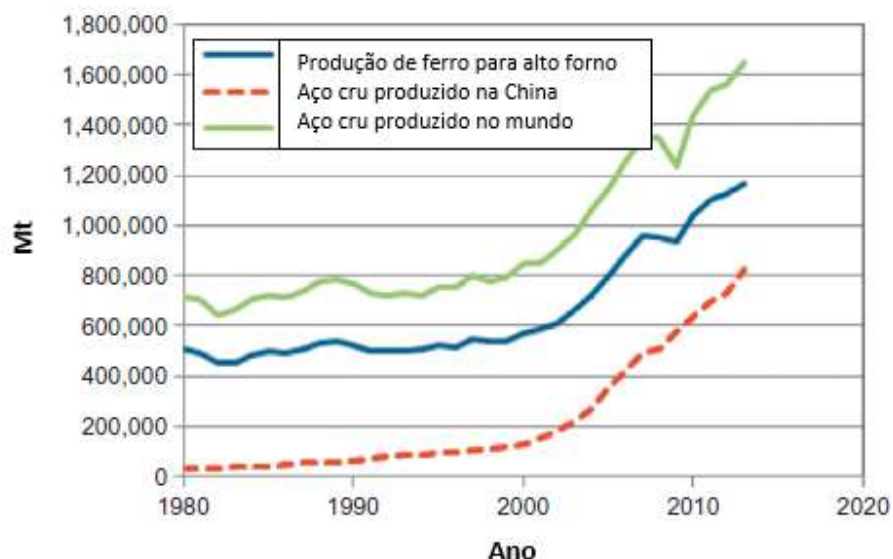


Figura 3.1 - Produção de aço cru e ferro no mundo e na China desde 1980 (Adaptado de LU 2015).

O Brasil desempenha papel fundamental quando se trata do mercado de minério de ferro. Suas jazidas estão entre as maiores já descobertas até o presente momento e seus empreendimentos são responsáveis por grande parte do abastecimento de minério para as mais diversas regiões do planeta. Até o ano de 2013, o Brasil possuía um volume de minério não beneficiado da ordem de 31.000 Mt com um conteúdo metálico de interesse de aproximadamente 16.000 Mt, ficando atrás apenas da Austrália (LU, 2015).

A variabilidade do território nacional e as diferentes formações geológicas existentes proporcionaram a formação de jazidas ferríferas das mais diversas formas, indo desde minérios hematíticos de baixa compactidade com teores entre 60% e 69% até itabiritos compactos e semi compactos com teores variando entre 35% e 55%. Com o passar dos anos e consequente queda da qualidade dos minérios fez-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e aperfeiçoamento de rotas de processo visando eficiência técnico-econômica dos empreendimentos.

Em termos de tratamento mineral, uma outra vantagem do minério de ferro é a menor complexidade em seu beneficiamento, quando comparado aos demais tipos de minérios. Atualmente as rotas de processo para o tratamento do ferro são bem consolidadas e eficientes do ponto de vista metalúrgico, sendo constituídas pela combinação entre etapas unitárias clássicas e a inserção de novas tecnologias que vem ganhando espaço no mercado. Por fim, a fabricação de equipamentos com porte para processamento de elevados volumes de material e a combinação de novas tecnologias fez com que reservas tidas como economicamente inviáveis no passado se transformassem em empreendimentos lucrativos de grande porte.

A mina da Serra do Sapo, situada na porção meridional da Serra do Espinhaço, em Conceição do Mato Dentro-MG, e pertencente a Anglo American, corresponde a um dos grandes empreendimentos de minério de ferro em operação no Brasil, denominado sistema Minas-Rio. A reserva atualmente avaliada possui um volume da ordem de 3,8 bilhões de toneladas de um minério predominantemente itabirítico, com um teor variando entre 25% e 60% de Fe em uma cava projetada de aproximadamente 12 km de extensão. A figura 3.2 ilustra o local do empreendimento descrito (BARROS, 2017).



Figura 3.2 - Cava sistema Minas-Rio (extraído de Google Earth Pro, 2017).

Os diferentes graus de intemperismo e processos de decomposição da rocha possibilitaram a formação de estruturas geológicas das mais diversas compacidades, sendo observados desde minérios mais friáveis, predominantemente encontrados na superfície, até minérios mais compactos, que se situam em camadas mais inferiores e próximos da rocha sã. Atualmente a compacidade dos itabiritos existentes na Mina da Serra do Sapo é classificada da seguinte forma: itabirito friável, semi-friável e compacto (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Diferentes tipos de itabiritos da Serra do Sapo (BARROS, 2017).

Apesar da elevada variabilidade do teor da jazida e heterogeneidade da compacidade do material, o minério apresenta um desempenho geometalúrgico satisfatório para a rota de processo estabelecida. O empreendimento Minas-Rio contempla uma mina a céu aberto e uma planta de beneficiamento, produzindo *pellet feed* de alta qualidade. A operação na Mina do Sapo iniciou em outubro de 2014 e visa uma produção anual de 26,5 Mta (base úmida) de *Pellet Feed* através da alimentação de aproximadamente 55Mt de minério de ferro na usina de beneficiamento. O concentrado de minério de ferro é transportado através de um mineroduto de 529 km até o Porto do Açu-RJ, de onde é exportado (FERREIRA, 2018).

3.2 Beneficiamento do minério de ferro

O beneficiamento do minério de ferro contempla a geração de produtos que atendam as mais diversas especificações, de acordo com a demanda requerida para a aplicação do material. Basicamente tais especificações são controladas pela granulometria, pelo teor de contaminantes, como sílica e alumina, e pela umidade do concentrado final. Os contaminantes em si são determinados conforme as exigências de mercado.

Em termos práticos, os produtos mais comercializados atualmente são:

- Granulado – Material na faixa entre 31,5 mm e 6,30 mm;
- *Sinter Feed* – Material na faixa entre 6,30 mm e 0,15 mm;
- *Pellet Feed* – Material na faixa entre 0,15 mm e 0,010 mm.

O processamento do minério de ferro se dá basicamente a partir da combinação de etapas de cominuição, deslamagem, flotação e separação sólido-líquido. Tal combinação proporciona uma separação do mineral de interesse de seus contaminantes gerando um produto de valor econômico atrativo.

O sistema Minas-Rio foi projetado visando a produção de *Pellet Feed* de alta qualidade em sua totalidade e possui algumas particularidades em sua rota de processo. Entre elas pode-se destacar a presença de novas tecnologias de processamento como prensa de rolos (HPGR), moinhos verticais e filtros cerâmicos. A figura 3.4 ilustra o fluxograma completo, que consiste das seguintes operações unitárias:

- Britagem primária;
- Britagem secundária;
- Peneiramento;
- Prensa de rolos;
- Moagem primária;
- Classificação e deslamagem em hidrociclones;
- Flotação em células mecânicas;
- Remoagem em moinhos verticais;
- Espessamento;
- Bombeamento via mineroduto;
- Filtragem em filtros cerâmicos.

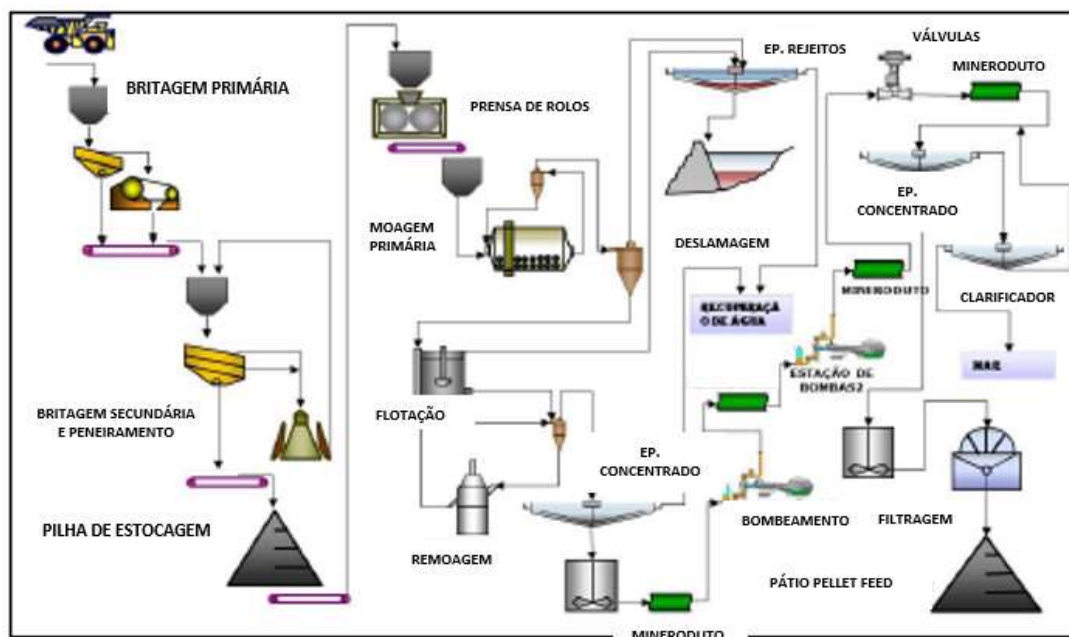


Figura 3.4 - Fluxograma Minas-Rio (Anglo American, material interno).

De forma bem resumida, o beneficiamento se inicia na britagem primária, composta por dois britadores de mandíbulas operando em paralelo. Em seguida tem-se a etapa de peneiramento e britagem secundária, que opera em circuito fechado com quatro peneiras e quatro britadores cônicos. O material retido no peneiramento alimenta os britadores secundários (carga circulante), enquanto que o material passante (< 22 mm) vai para a pilha pulmão. Na pilha pulmão existe um sistema de alimentadores de sapatas que direciona o material passante no peneiramento para a três prensas de rolos que operam em paralelo. Tal circuito é denominado via seca e não contempla o uso de água em nenhuma das etapas citadas acima.

O circuito subsequente a via seca é denominado via úmida e contempla a adição de água para possibilitar o beneficiamento e transporte do minério de forma eficiente. O processo se inicia com a moagem primária, que contempla dois moinhos de bolas operando paralelamente em circuito fechado e direto com hidrociclones. O produto da moagem é direcionado para duas etapas de deslamagem por hidrociclones que prepara o material para a etapa de flotação. A flotação é feita em células mecânicas em um circuito composto por etapas *Rougher*, *Cleaner* e *Scavenger*. O produto da flotação passa por uma etapa de remoagem em moinhos verticais, que tem como finalidade adequar a granulometria do concentrado da flotação para atender as especificações de mercado e requisitos de bombeamento do mineroduto; a remoagem opera em circuito fechado e reverso com hidrociclones. Por fim, o produto da remoagem é direcionado para um espessador que promove a recuperação de parte da água e adequa o percentual de sólidos da polpa para o bombeamento via mineroduto. O mineroduto possui 529 km de extensão e é responsável por transportar o material de Conceição do Mato Dentro-MG até o porto do Açú, no Rio de Janeiro. Já no porto a polpa é filtrada em filtros cerâmicos e adequada conforme especificações de umidade para o transporte em navios.

Em termos de rejeitos gerados, o Minas-Rio possui dois tipos distintos de materiais: lamas e rejeito da flotação. A lama é proveniente da etapa de deslamagem, representa entre 10% e 15% de todo rejeito gerado e possui uma granulometria extremamente fina ($65\% < 7$ μm). Já o rejeito da flotação corresponde aos demais 85% a 90% da massa de rejeito gerada e possui uma granulometria mais grosseira quando comparado a lama. Ambos materiais são direcionados para um espessador de

rejeitos, que promove a recuperação da água de processo e direciona o material adensado para a barragem de rejeitos existente.

3.3 Geração e disposição de rejeitos

Por se tratar de um bem não renovável, pode-se afirmar que é inevitável que a produção futura de minérios provenientes de jazidas de baixo teor aumentará, gerando uma maior tonelagem de rejeitos de forma geral. De acordo com um estudo realizado, aproximadamente 14 bilhões de toneladas de rejeitos foram produzidas globalmente pela indústria de mineração em 2010, o que gera a necessidade de construção, manutenção e monitoramento de estruturas sustentáveis e seguras para contenção e armazenamento desse material (SAFAAT et al., 2015).

A gestão dos rejeitos é de importância crítica para o sucesso de qualquer projeto de mineração. Falhas de instalações resultaram em perda de vida, danos ambientais devastadores, fechamento de operações de mineração, declínios dramáticos no valor de empresas e, em alguns países, a responsabilidade pessoal do gerenciamento das estruturas. Em 2007, (RICO et al., 2008) realizaram um levantamento onde foram avaliados 147 casos de falhas em maciços ao redor do globo, a tabela 3.1 mostra os principais impactos causados por uma má gestão dos rejeitos e a figura 3.5 ilustra o número de incidentes por país.

Tabela 3.1 - Principais impactos gerados pela má gestão de estruturas de contenção de rejeitos (RICO et. al., 2008).

Ambiental	Econômico	Social	Governamental
Poluição do ar e da água	Despesas de capital	Problemas a saúde	Conformidades legais
Esgotamento de recursos hídricos	Despesas operacionais	Segurança das comunidades próximas	
Destruição de ecossistemas	Custo de energia	Impactos culturais	
Alterção de ecossistemas	Custo de fechamento	Perda de credibilidade das empresas	
Emissões	Pagamento de indenizações		

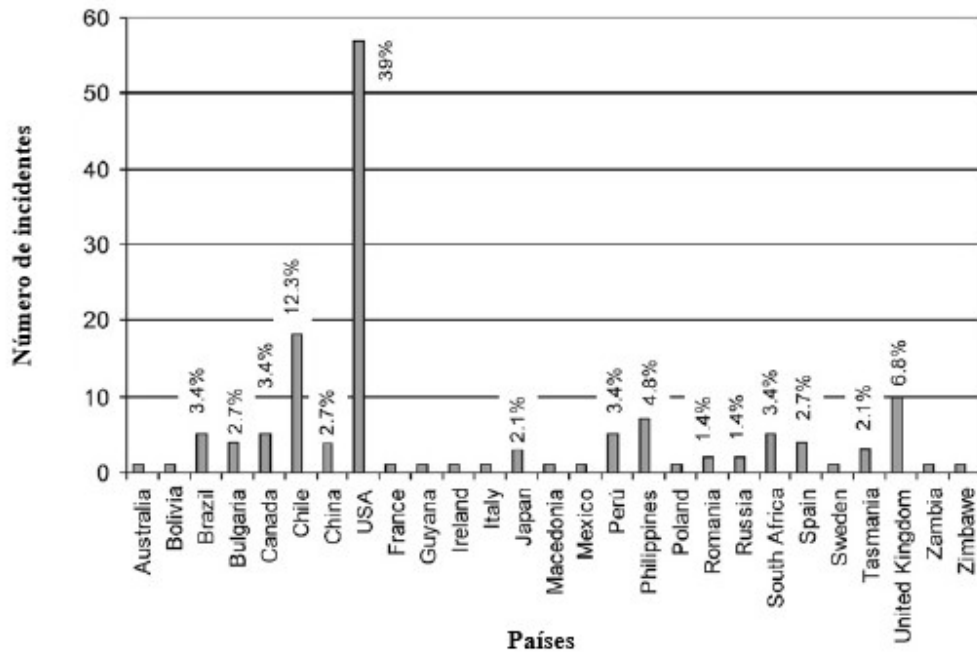


Figura 3.5 - Número de incidentes de rompimento de estruturas de contenção de rejeitos por país (RICO et. al., 2008).

A disposição de rejeitos pode ser realizada de diversas formas e de acordo com os aspectos legais, sociais, ambientais, territoriais e econômicos de cada empreendimento. No Brasil, os rejeitos de beneficiamento são normalmente dispostos em forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens. Em outros países, existe uma tendência para o adensamento dos rejeitos, visto que a disposição de rejeitos na forma de polpa de alta densidade, pastas minerais ou tortas apresenta vantagens consideráveis e representa alternativas às práticas convencionais (GUIMARÃES, 2011).

Após os acontecimentos de Fundão e Brumadinho fez-se necessário uma reflexão sobre a disposição de rejeitos em barragens no Brasil. As consequências dos acontecimentos trouxeram uma maior rigidez nas legislações de monitoramento dos maciços, uma maior dificuldade de obtenção de licenças de alteamento e de licenças de instalação para novas estruturas. Diante disso, diversas empresas iniciaram estudos visando alternativas mais seguras para disposição de rejeitos, as soluções estudadas passam por rotas de processo que contemplam etapas de desaguamento, seja por espessadores, peneiras desaguadoras ou por hidrociclones, seguidas de etapas de filtragem, onde o tipo de filtro aplicado depende diretamente das características do material a ser desaguado.

Por fim, o material é disposto a seco em pilhas de maior estabilidade geotécnica e, conseqüentemente, mais seguras do ponto de vista de processo e ambiental.

O empilhamento a seco já vem sendo aplicado em empreendimentos que possuem recursos hídricos limitados e em áreas nas quais as condições geotécnicas e topográficas impossibilitam o represamento do rejeito em barragens. A mina de Pau Branco, no Estado de Minas Gerais, é um dos exemplos de implantação de uma planta de desaguamento de rejeitos de minério de ferro inovadora e sustentável, onde o rejeito passa por uma etapa de desaguamento por peneiras de alta frequência seguida por uma filtragem em filtro prensa horizontal, o produto filtrado de baixa umidade residual permite seu empilhamento, evitando assim a necessidade da disposição em barragens (BRANDAO; TOMI; SANTOS, 2016).

3.4 Reologia de polpa

A reologia de polpa consiste no estudo da deformação e escoamento da matéria, onde ocorre a verificação da resposta cinemática dos fluidos a solicitações de movimento e força. Um ensaio reológico consiste na verificação da deformação de um fluido a partir da aplicação de uma força, ou da resistência de um fluido a partir da aplicação de uma deformação sob o mesmo (VIEIRA, 2011). Se tratando de estudo de escoamento, a variável de que mais deve ser levada em consideração é a viscosidade, que pode ser definida como a propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao cisalhamento.

Para polpas minerais, faz-se necessário a verificação e o estudo da microreologia e das propriedades físicas e químicas da polpa. Se tratando da microreologia, deve-se considerar efeitos como agregação-repulsão, efeito hidrodinâmico e movimento browniano como os principais efeitos referentes a microreologia.

- Efeito de agregação-repulsão: Efeito de forças de van der Waals, forças eletrostáticas e magnetismo remanescente que provocam a atração ou repulsão das partículas;
- Efeito hidrodinâmico: Consequência da presença de partículas sólidas não coloidais. Efeito da dissipação de energia à medida em que as partículas se aproximam umas das outras. É o principal efeito causador de dissipação de energia para polpas com sólidos não coloidais;

- Movimento browniano: Consiste no estudo do movimento aleatório das partículas em suspensão em um fluido.

Já no aspecto físico-químico das polpas minerais, deve-se avaliar outras variáveis do material a ser estudado e que possuem fundamental importância na avaliação do comportamento do material. Entre os principais pode-se citar o percentual de sólidos, a densidade da polpa, a distribuição granulométrica do material, a forma das partículas, o pH do meio, o tipo e concentração dos íons dissolvidos e os agentes dispersantes existentes.

Se tratando de polpa minerais e em estudos de separação sólido-líquido, a velocidade de sedimentação das partículas possui fundamental importância no entendimento do comportamento do material e, principalmente, nas tecnologias e processos possíveis de serem aplicados para cada tipo de polpa mineral. A partir do entendimento das principais variáveis e com a execução de ensaios de sedimentação, torna-se possível o entendimento quanto a aplicabilidade de aditivos químicos que favoreçam o processo e promovam uma maior eficiência na separação sólido-líquido.

3.5 Adsorção

Para um melhor entendimento e otimização dos processos de separação sólido-líquido deve-se entender diversos aspectos reológicos e químicos do comportamento da polpa mineral. Um conceito fundamental é a adsorção, que pode ser dita como a concentração de uma determinada espécie química na superfície. A adsorção, seja ela química ou física, pode ser entendida como uma medida do excesso, positivo ou negativo, da entidade considerada na região interfacial em relação a uma das fases (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004). No fenômeno de adsorção entende-se por adsorvatos como a substância que se retém em um sólido, seja ela um gás, um fluido, moléculas ou íons e por adsorvente como a substância que promove a retenção de outras substâncias, seja ela metálica, covalente ou iônica.

O fenômeno pode ser dividido em adsorção física e adsorção química. A adsorção física é causada principalmente por ação das forças de van der Waals, onde o equilíbrio é atingido rapidamente e está presente na maioria dos processos de purificação e separação. Entre as suas principais características pode-se citar como pouco energética, pouco seletiva, reversível, rápida, suas

espécies envolvidas mantêm sua individualidade e existe a possibilidade de formação de multicamadas. Já a adsorção química ocorre a partir de ligações químicas primárias, formando componentes de superfície e suas principais características são o alto calor de adsorção, o que indica uma ligação forte, seletividade, irreversibilidade, necessidade de um tempo mínimo de contato e apenas uma camada pode ser quimissorvida.

Ao se tratar da especificidade entre o adsorvente e o adsorvato, temos que a adsorção não específica ocorre por um fenômeno de atração puramente eletrostático entre ambos, sendo rápida, facilmente reversível e, além disso, não capaz de reverter o sinal da carga original do adsorvente. Já o fenômeno dito específico decorre da existência de espécies adsorvidas especificamente, que podem alterar significativamente a carga do adsorvente sendo aumentando, diminuindo, anulando ou, até mesmo, revertendo a carga original, o que faz com que ela seja lenta e irreversível (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004).

Em termos práticos de separação sólido-líquido, quanto menor a granulometria do material, maior sua área superficial específica e, conseqüentemente, maior a carga elétrica superficial, diante disso, tem-se uma tendência das partículas se repelirem e dificultarem o processo de sedimentação. Visando facilitar o processo de sedimentação faz-se o uso de reagentes ditos coagulantes e floculantes, que atuam no sentido de reduzir as forças de repulsão entre as partículas ou no sentido de formar pontes de ligação entre as moléculas, respectivamente.

3.6 Coagulação

Partículas imersas em um meio aquoso, seja ele purificado ou com a presença de coloides, produtos químicos e/ou íons em suspensão, tendem a adquirir cargas elétricas superficiais. Interações entre partículas com carga superficial similar resultam em uma força repulsiva elétrica entre elas, dificultando sua agregação. Na química coloidal, uma solução estável ou um conjunto de partículas é definido como aquele em que a maioria das partículas tem cargas semelhantes e, portanto, essas partículas tendem a não se agregar ou assentar. Entretanto, se tratando da separação sólido-líquido, o pré-tratamento químico é necessário para reduzir ou eliminar essa repulsão e melhorar a remoção

de partículas por processos de sedimentação e filtração, tal processo é chamado de coagulação (WEI et al., 2018)

O processo de coagulação implica na adição de produtos químicos que consigam desestabilizar ou neutralizar as cargas elétricas superficiais das partículas e, conseqüentemente, reduzir as forças repulsivas entre elas, tornando o meio favorável a formação de agregados, ou coágulos, que sedimentam em uma maior velocidade (BARREDA, 2007). A figura 3.6 ilustra um diagrama de coagulação clássico.

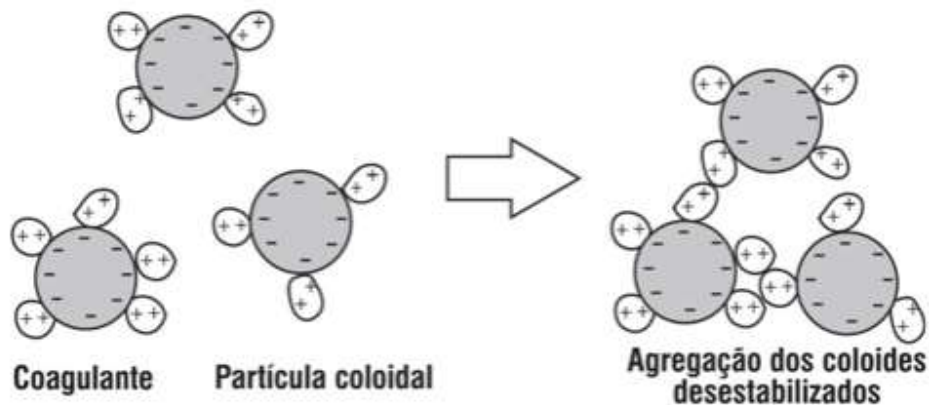


Figura 3.6 - Diagrama de coagulação (SASAKI, 2015).

Os reagentes coagulantes usualmente são compostos de ferro ou alumínio, dentre os quais pode-se citar o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o sulfato férrico, o policloreto de alumínio e coagulantes orgânicos catiônicos, onde a aplicabilidade pode ser realizada na fase sólida ou líquida. Cada coagulante possui uma característica de modificação de cargas e condições ótimas de aplicabilidade, que devem ser estudadas e definidas previamente em ensaios laboratoriais.

Entre as variáveis operacionais de controle de um processo de coagulação algumas merecem destaque como a espécie do coagulante utilizado, características químicas da água, temperatura, agitação da suspensão e pH do meio. As características de solubilidade de vários coagulantes e, portanto, a faixa de pH em que são mais eficazes, são propriedades importantes dos coagulantes. Solubilidade refere-se à concentração máxima de espécies dissolvidas que podem existir em solução antes da precipitação. Essa concentração varia com a temperatura e o pH. O pH de mínima solubilidade representa o pH no qual a concentração de espécies coagulantes dissolvidas é mínima.

Isso é importante da perspectiva do tratamento, pois esse pH também corresponde ao ponto em que a quantidade máxima de espécies de flocos sólidos é formada (BRATBY, 2016).

3.7 Floculação

A agregação de pequenas partículas em suspensões líquidas, visando a formação de flocos com massa suficiente para sedimentarem, ou como preparação para processos subsequentes, é uma prática comum nos processos industriais. Tal agregação é comumente chamada de floculação e possui aplicabilidade em soluções com a presença de sólidos de tamanhos variados, desde colóides até partículas visíveis (IVES, 1977).

Se tratando da separação sólido-líquido, a floculação é possivelmente a principal prática no intuito de favorecer a sedimentação de partículas em suspensão, podendo ser aplicada em conjunto com processos mecânicos e/ou processos de coagulação (BARREDA, 2007). A floculação consiste na adição de produtos químicos, geralmente polímeros de elevado peso molecular, que se adsorvem aos flocos e facilitam a ligação das lacunas entre eles, gerando um agregado composto por diversas partículas menores de maior massa que, conseqüentemente, tem sua sedimentação favorecida. Tais fenômenos podem ocorrer simultaneamente, a depender das condições do meio e das cargas superficiais existentes.

O processo de formação de flocos passa primeiramente por uma fase de dissolução do polímero na solução a ser floculada e favorecimento do contato partícula-polímero para que haja a adsorção de parte da cadeia reativa do produto na superfície das partículas, esse contato pode ocorrer devido ao movimento *browniano*, devido a agitação térmica ou por forças externas. Após a adsorção partícula-polímero, a outra parte da cadeia do polímero é responsável por formar uma extensão, ou laço. Tais laços em contato um com os outros, e adsorvidos em superfície de partículas distintas, formam o agregado partícula-polímero-partícula e formam o floco.

Em termos práticos, cabe salientar que caso haja turbulência após a formação do floco, o mesmo pode se quebrar e separar as partículas agregadas. Sendo assim, recomenda-se a dosagem do floculante inicialmente sob forte agitação, e logo em seguida a máxima redução possível no

processo de agitação para evitar tal fenômeno. LUZ (2004) descreve a possibilidade de execução de uma dosagem por etapas como forma de distribuir o polímero da melhor forma sob a suspensão.

O entendimento de variáveis como área superficial das partículas suspensas e o tamanho da cadeia do polímero a ser utilizado devem ser avaliados criteriosamente visando uma maior eficiência de floculação. A figura 3.7 ilustra os processos simultâneos que ocorrem durante uma dosagem de floculante.

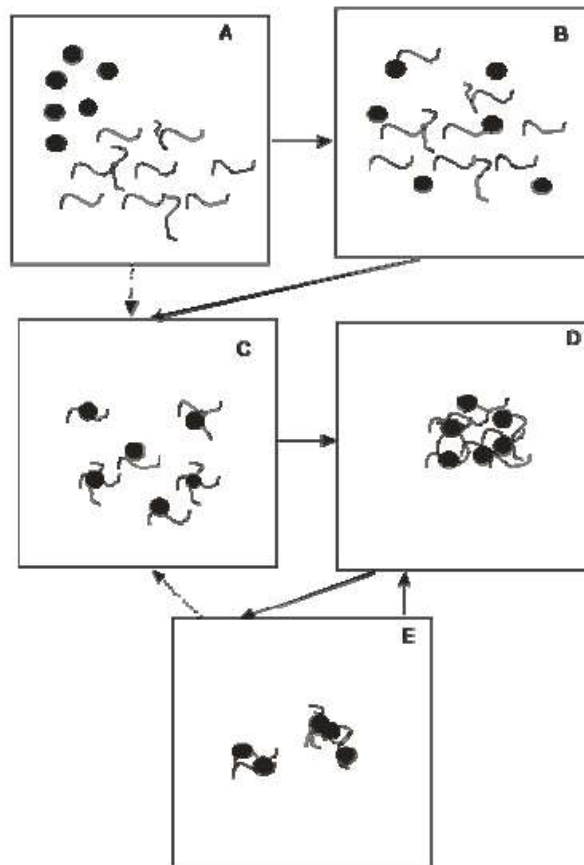


Figura 3.7 - (A) Adição do reagente; (B) Homogeneização do produto na solução; (C) Adsorção na superfície do sólido; (D) Floculação; (E) Quebra dos flocos. (LUZ, 2004).

Os floculantes podem ser classificados quanto a natureza, sendo orgânico ou inorgânico, quanto a origem, sendo natural ou sintético, e, por fim, quanto a sua carga elétrica, sendo divididos em aniônico, catiônico e não-iônico. Se tratando da separação sólido-líquido para o caso do minério de ferro, os produtos comumente utilizados são as poliacrilamidas aniônicas que possuem um desempenho satisfatório do ponto de vista técnico-econômico. Por fim, do ponto de vista prático, a combinação de práticas como coagulação e floculação são amplamente utilizadas em conjunto com equipamentos que favorecem ainda mais o processo de sedimentação, tais equipamentos são chamados espessadores (GREGORY; BARANY, 2011).

3.8 Espessadores

Os espessadores são equipamentos utilizados há muitos anos em diversos setores da indústria. Suas aplicações iniciais são datadas do século XVI com a finalidade de lavar metais como ouro, prata e estanho, onde o equipamento era alimentado por bateladas visando a sedimentação do material de interesse no fundo do equipamento.

No processamento mineral os espessadores são amplamente aplicados com as mais diversas finalidades como na recirculação de água, preparação da polpa para processos subsequentes e/ou desaguamento de concentrados ou rejeitos para transporte ou disposição final. Sua importância na indústria abrange os aspectos de processo, econômico e ambiental, por se tratar de um equipamento de elevada eficiência, simplicidade, alta capacidade, baixo custo operacional e que proporciona a redução do consumo de água proveniente de fontes naturais, como rios e lagos.

Seu princípio de funcionamento se baseia no uso da sedimentação por gravidade para aumentar a concentração da suspensão no fundo do tanque, acompanhada da formação de um líquido clarificado na parte superior. Tais equipamentos podem operar em regime de batelada ou contínuo, a depender da necessidade de sua aplicação e das particularidades da polpa mineral que o alimenta. (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Ao longo dos anos sua aplicação foi aumentando cada vez mais, assim como as tecnologias empregadas, o que acarretou na comercialização de equipamentos de elevadas capacidades e eficiência. Atualmente existem diversos tipos de espessadores no mercado, dentre os principais pode-se citar os espessadores contínuos convencionais, espessadores de alta capacidade, espessadores de lamelas e espessadores de pasta.

Se tratando da realidade operacional da grande maioria das usinas de beneficiamento de minério de ferro ao redor do globo, temos o espessador contínuo convencional como o principal equipamento utilizado atualmente. Os demais espessadores citados são aplicados de acordo com as particularidades de cada empreendimento.

3.8.1 Espessador contínuo convencional

O espessador contínuo convencional é atualmente o equipamento mais utilizado na indústria mineral. Ele consiste basicamente em um tanque composto por uma sessão cilíndrica na parte superior e uma sessão cônica na parte inferior, onde o diâmetro varia de 2 a 200 metros e a profundidade de 1 a 7 metros. A alimentação de polpa é feita pelo centro do equipamento, chamado de *feedwell*, onde pode haver ou não a adição de reagentes coagulantes e floculantes para favorecerem a sedimentação. O fundo do equipamento possui um braço raspador, denominado *rake*, que possui a finalidade de direcionar o material sedimentado (*underflow*) para a tubulação de coleta de material sedimentado, já a fração sobrenadante (*overflow*) é direcionada para as calhas de transbordo visando a coleta de água clarificada para posterior direcionamento ao processo. A figura 3.8 ilustra um arranjo detalhado do equipamento em questão.

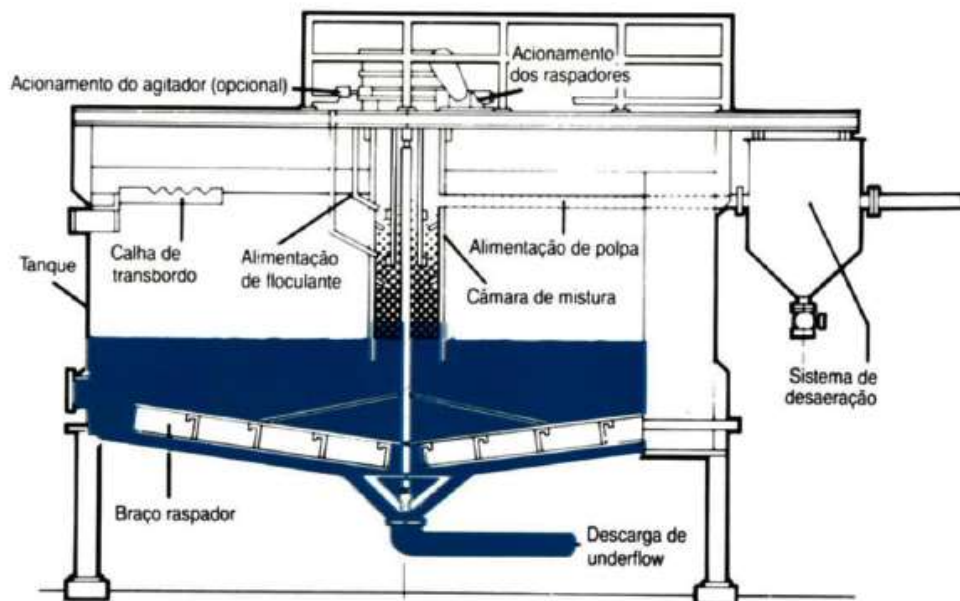


Figura 3.8 - Arranjo de um espessador convencional contínuo (Anglo American, material interno).

A capacidade do espessador é diretamente proporcional à sua área e é, geralmente, determinada em função da taxa de sedimentação dos sólidos na suspensão, o que independe da altura. A área da unidade determina o tempo que ocorre a sedimentação das partículas sólidas para uma dada taxa de alimentação. Por outro lado, a altura influencia o tempo necessário para o espessamento da polpa a uma dada taxa de alimentação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010). Além disso, deve-se levar em consideração algumas particularidades do processo como natureza das partículas, a concentração dos sólidos, a adição de reagentes modificadores de reologia e as condições operacionais requeridas para o tratamento da polpa. Tais fatores podem afetar diretamente a eficiência da etapa e, por isso, faz-se necessário uma extensa fase de estudos e testes laboratoriais antes de tomar a decisão de qual tipo de espessador será utilizado e suas respectivas dimensões, visto que o custo de implantação de um espessador é consideravelmente elevado. A figura 3.9 ilustra alguns espessadores industriais em atividade atualmente.

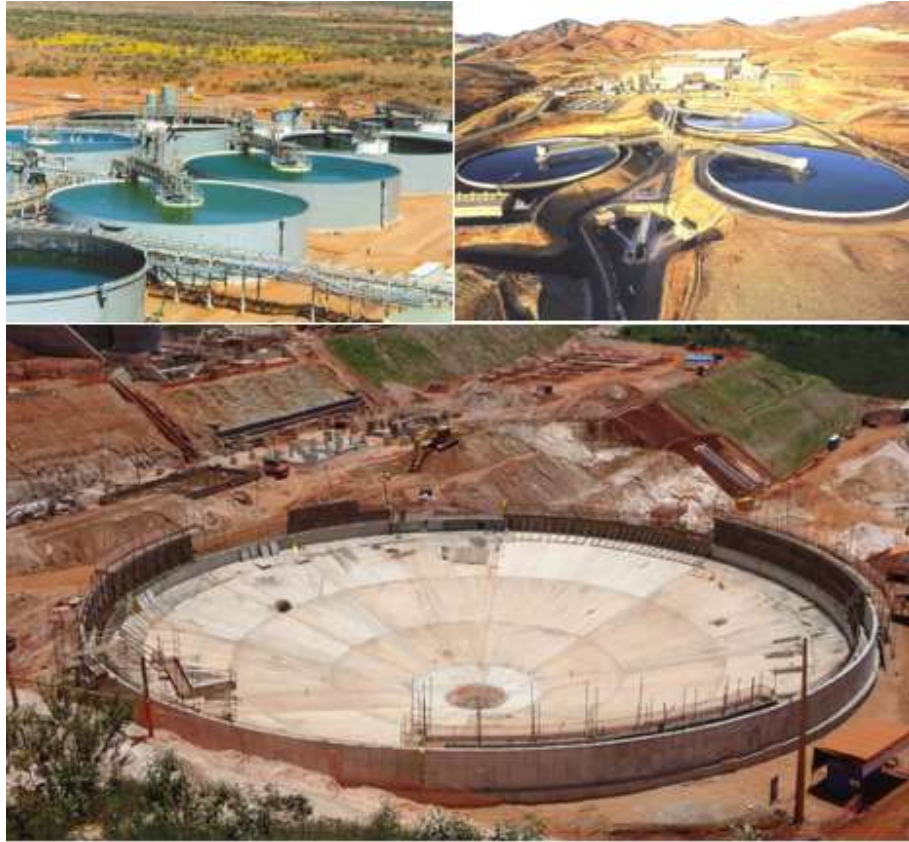


Figura 3.9 - Espessadores industriais (Anglo American, material interno).

As duas principais funções do espessador são a obtenção de um efluente clarificado na calha de transbordo (*overflow*) e a obtenção de um material adensando adequadamente na região inferior (*underflow*). Porém, no interior do equipamento ocorre um perfil de sedimentação com diferentes concentrações em diferentes alturas. Usualmente divide-se tais zonas em quatro, de acordo com sua concentração de sólidos e altura. São elas:

- Zona A – Zona de Clarificação;
- Zona B – Zona de Alimentação;
- Zona C – Zona Crítica;
- Zona D – Zona de Compressão.

Na Zona de Clarificação tem-se a menor concentração de sólidos possível, visto que nessa região ocorre a recuperação de água para o processo. Os sólidos presentes nessa faixa são, em sua maioria, partículas extremamente finas ou coloidais que apresentam dificuldade de sedimentação. Na Zona de Alimentação a concentração de sólidos será bem próxima, ou igual, a concentração da polpa que alimenta o equipamento inicialmente, essa zona fica um pouco abaixo da face superior do equipamento e, geralmente, é o local de aplicação de reagentes coagulantes e floculantes para que os efeitos ocorram o quanto antes e favoreçam o processo de sedimentação.

As duas últimas zonas são aquelas nas quais ocorre a sedimentação de fato e são determinantes para obtenção de parâmetros de processo satisfatórios do ponto de vista de separação sólido-líquido, visto que uma sedimentação eficiente fará com que o mínimo de sólidos se reporte ao *overflow* do espessador e promoverá a obtenção da concentração requerida no *underflow* para os processos seguintes. Na Zona crítica, com uma maior concentração de sólidos, a grande maioria das partículas está em contato com sua partícula vizinha, se houver uma tendência de agregação, os sólidos tendem a sedimentar com a mesma velocidade e formarem uma sedimentação por fase, onde há a interface nítida entre fase aglomerada e fase líquida, mas caso não haja uma tendência de agregação haverá uma colisão entre as partículas que resultará em um movimento individual de cada partícula, assim como velocidades de sedimentação distintas e características. Por fim, na Zona de Compressão, as partículas encontram-se tão adensadas que a sedimentação ocorre pela compactação resultante do peso da coluna adjacente (OLIVEIRA; LUZ; LACERDA, 2004). A Figura 3.10 ilustra os diferentes perfis de sedimentação descritos.

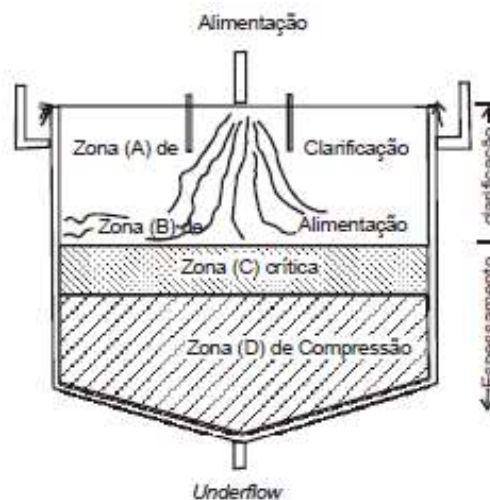


Figura 3.10 - Zonas de sedimentação em um espessador (LUZ et al., 2004).

Para uma eficiência adequada o dimensionamento do equipamento deve ser realizado de forma criteriosa respeitando as particularidades do processo como: capacidade requerida para alimentação, concentração requerida no *overflow* e *underflow*, características dos sólidos (tamanho, forma e massa específica das partículas), características do líquido (viscosidade e massa específica), estado de agregação ou dispersão das partículas suspensas no líquido e razão mássica sólido-líquido na suspensão que será submetida ao espessamento. (METCALF et al, 1979 apud SOUSA, 2012).

3.9 Filtragem

A filtragem especificamente refere-se ao ato de separar uma ou mais fases distintas em um processo que utiliza diferenças físicas entre as fases (tamanho, densidade ou carga elétrica). O processo de filtragem em questão consiste em submeter a polpa mineral a passagem por meio poroso permeável, seja pela ação do vácuo ou pela aplicação de pressão. Durante esse processo as partículas sólidas são retidas no meio, enquanto a fase líquida sofre uma menor resistência e passa através dos poros, promovendo assim a separação. O material retido no meio e de baixa umidade residual é chamado de torta, enquanto a fase líquida passante é denominada filtrado. A figura 3.11 ilustra de forma simples o princípio fundamental da filtragem.

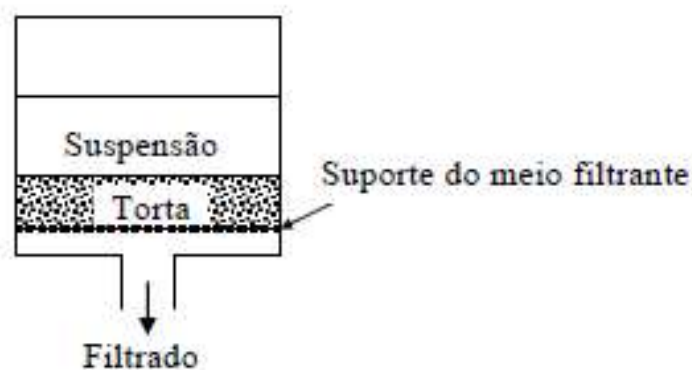


Figura 3.11 - Princípio da filtragem.

A filtração pode ser feita pela pressão hidrostática da suspensão sobre o meio filtrante, denominada filtração por gravidade, ou através de força externa. Nesse caso são possíveis as seguintes alternativas:

- Filtração a vácuo, uso de pressão negativa abaixo do meio filtrante;
- Filtração sob pressão, uso de pressão positiva sob o meio filtrante;
- Filtração centrífuga, utiliza-se a centrifugação para forçar a passagem do líquido;
- Filtração hiperbárica, utiliza-se a filtração a vácuo em um vaso de pressão;
- Filtração capilar, utiliza-se meios cerâmicos porosos.

No processamento de minério de ferro, as tecnologias mais empregadas, seja para filtrar concentrados, rejeitos ou simplesmente uma preparação para uma etapa seguinte, são os filtros a vácuo convencionais, os filtros tipo prensa e os filtros cerâmicos. Tais tecnologias possuem vantagens distintas e que devem ser levadas em consideração antes da escolha do melhor tipo de equipamento de acordo com as características do material e as particularidades do processo.

As condições sob as quais a filtração é realizada são muitas e variadas. Diante disso, a escolha do tipo de equipamento mais adequado dependerá de diversos fatores. Porém, qualquer que seja o tipo de equipamento usado, a medida em que filtração ocorrer haverá a formação gradual de uma torta que fará com que a resistência ao fluxo aumente progressivamente ao longo da operação. Entre os fatores que podem afetar a taxa de filtração pode-se citar como principais a queda de pressão que ocorre entre o ponto de alimentação do filtro e sua extremidade oposta, a área de superfície disponível para filtração, a viscosidade do material filtrado, a resistência da torta, a resistência do meio filtrante e a granulometria do material a ser filtrado (WILLS; NAPIER-MUNN, 2006).

Nas instalações industriais é comum a combinação entre espessamento e filtração. Usualmente a etapa de espessamento precede a filtração com o intuito de alimentar os filtros com uma polpa já adensada e de forma constante. Além disso, outra prática muito comum é o uso de reagentes floculantes e/ou auxiliares de filtração previamente à filtração. As partículas extremamente finas possuem um efeito adverso na filtração por promoverem o bloqueio dos poros do meio filtrante, sendo assim, os reagentes floculantes de baixo peso molecular atuam no sentido de formar flocos

onde aglomeram-se grande parte dos finos além de aumentar o vazio entre as partículas, facilitando o fluxo de filtrado.

3.9.1 Filtro de disco a vácuo convencional

O filtro de disco a vácuo convencional é uma das tecnologias de filtração mais utilizadas nas indústrias de beneficiamento de minério de ferro ao redor do globo. Tais filtros possuem a vantagem de proporcionar uma grande área de filtração em um único equipamento, simplicidade operacional e versatilidade de manutenção. O princípio de construção do equipamento contempla vários discos montados, paralelos uns aos outros, em um eixo horizontal. Cada disco é feito de setores intercambiáveis cobertos por um meio filtrante, que permite sua remoção para troca após desgaste (TARLETON, 2015). A Figura 3.12 ilustra um arranjo do filtro em questão.

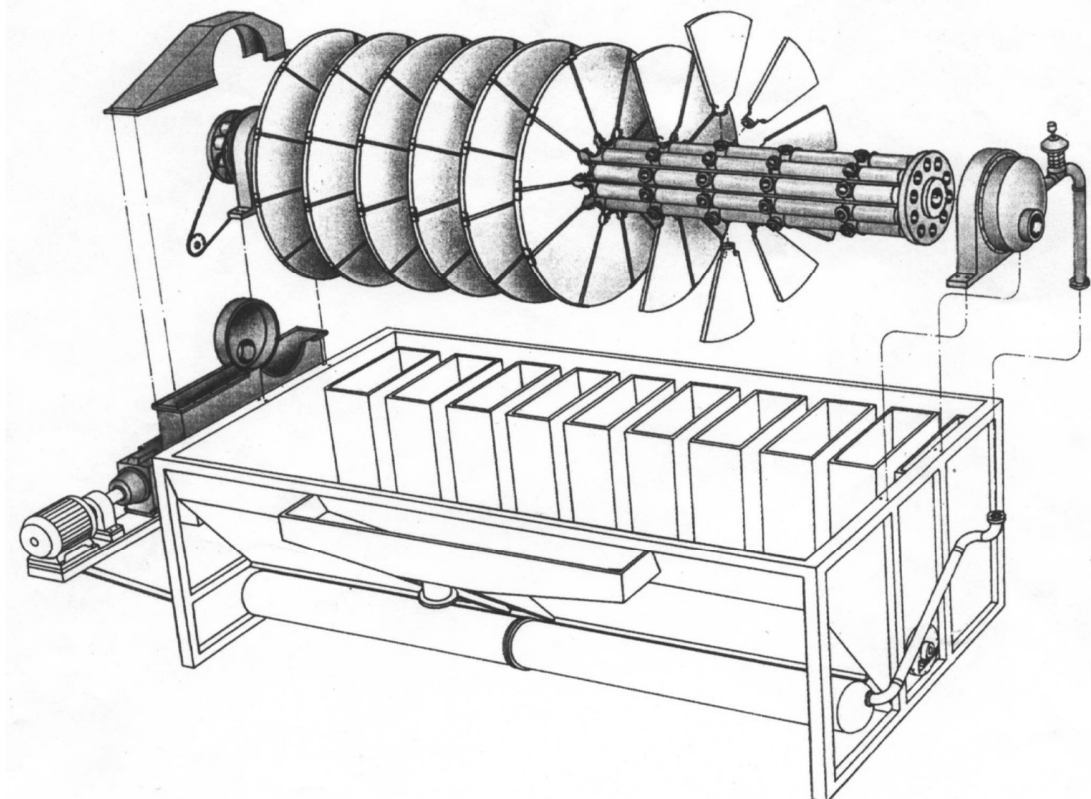


Figura 3.12 - Filtro de disco a vácuo convencional.

Nesse tipo de equipamento os discos se encontram em uma bacia com um sistema de agitação, para evitar sedimentação de material, na qual a suspensão é alimentada. O vácuo é aplicado nos setores do disco através de tubos no interior do eixo central formando o acúmulo de material na superfície do disco submerso em polpa, logo em seguida e, devido ao movimento rotativo, o disco emerge e a torta é seca através da passagem de ar formada pelo vácuo. Por fim, um pulso de retorno de ar para o interior do setor é aplicado com o intuito de descarregar a torta seca em uma calha e o disco submerge na polpa novamente para repetir o ciclo. Em resumo temos o seguinte ciclo:

- Zona de formação de torta: Fase em que o disco está submerso na polpa em agitação e o vácuo promove a sucção e adesão do material junto ao tecido filtrante;
- Zona de secagem: Fase em que o disco emerge na superfície e a força do vácuo promove e sucção da água ainda contida na torta;
- Descarga da torta: Fase em que o vácuo é substituído por uma pressão de ar que infla o elemento filtrante causando o desprendimento da torta e sua descarga na calha de coleta.

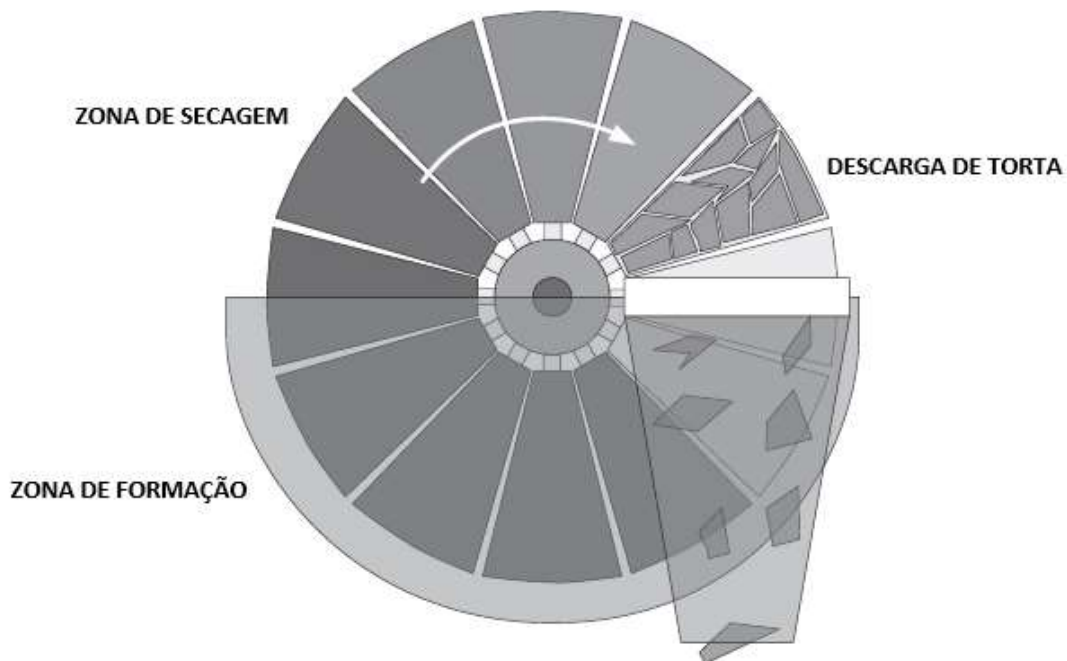


Figura 3.13 - Zonas do filtro de disco a vácuo convencional.

Em termos de desempenho, os parâmetros monitorados durante uma operação de filtração são:

- Taxa unitária de filtração ($t/h/m^2$) – Indicador de produtividade do filtro através da razão entre a tonelada hora filtrada pela área de filtração;
- Umidade (%) – Indica a quantidade de água presente na torta filtrada;
- % de sólidos no filtrado – Indica a massa de sólidos presente no material filtrado;
- Consumo específico de energia (kWh/t) – Mede a razão entre o consumo energético pela tonelada filtrada.

Operacionalmente os filtros possuem dispositivos que possibilitam ajustes de processo visando o controle dos parâmetros listados acima de acordo com as particularidades de cada empreendimento. Entre os principais componentes pode-se citar o cabeçote instalado na tubulação de vácuo que permite a mudança dos tempos de formação, secagem e descarga da torta e os diferentes tipos de tecidos com diferentes aberturas que possibilitam uma maior ou menor resistência a torta. A Figura 3.14 ilustra um filtro a disco convencional utilizado industrialmente.



Figura 3.14 - Filtro de disco a vácuo convencional.

A prática operacional indica que o filtro de disco a vácuo convencional, além de operar em regime contínuo, possui um bom desempenho para polpas com uma baixa presença de partículas extremamente finas. Tais partículas acabam passando pelo tecido e obstruindo os poros, o que leva a uma redução do desempenho da filtragem devido à dificuldade de atuação do vácuo para formação e secagem da torta. Por fim, deve-se manter o cuidado com a manutenção do equipamento através de inspeções periódicas, trocas de setores e trocas de tecidos dos discos de acordo com a recomendação do fabricante ou quando houver uma queda significativa na eficiência do processo (SPARKS et al., 2016).

3.9.2 Filtro Cerâmico

O filtro de disco cerâmico se parece com qualquer outro filtro de disco rotativo a vácuo padrão, como pode ser visto na Figura 3.15, mas o meio filtrante é composto por um disco cerâmico finamente poroso que atrai o filtrado através do material do disco por ação da capilaridade, sob o vácuo aplicado. Os discos filtrantes são feitos de alumina sinterizada compostos por microporos uniformes e com diâmetro de 2,5 a 5,0 μm , o que permite apenas a passagem da fase fluida.

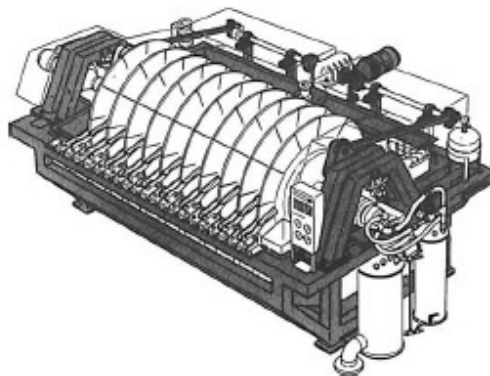


Figura 3.15 - Filtro de disco cerâmico (SUTHERLAND, 2008).

O material que compõe o disco cerâmico é inerte, resistente a quase todos os produtos químicos e temperaturas, o que proporciona ao equipamento uma versatilidade de aplicação muito grande para indústria química, mineral, metalúrgica e processamento de resíduos (SUTHERLAND, 2008). O princípio de funcionamento é muito semelhante ao disco a vácuo convencional, onde a polpa é

alimentada na bacia do filtro e um sistema de vácuo faz a sucção do material para adesão ao disco e posterior filtração.

Dentre as diferenças significativas pode-se salientar que as placas são conectadas ao eixo central do filtro diretamente, a ausência do sistema de sopro de descarga de torta, nesse caso a descarga da torta é feita por raspadores milimetricamente posicionados a uma distância mínima das placas para remover a torta aderida ao disco, um sistema de *back-wash* que utiliza parte do líquido filtrado para promover a lavagem do interior da placa para o exterior da bacia e a existência de um sistema de ultrassom para restaurar a permeabilidade das placas devido as obstruções dos poros ao longo da operação do equipamento. Por fim, em algumas aplicações tem-se um sistema de lavagem química para desobstruir os poros que são bloqueados por contaminantes existentes nas diferentes polpas minerais.

Um dos grandes diferenciais do equipamento em relação aos demais filtros a vácuo é a ação da capilaridade durante o processo. Pelo fato de os poros serem extremamente pequenos, a capilaridade impede que o ar penetre nas placas, garantido uma maior estabilidade do vácuo e, conseqüentemente, reduzindo o tamanho das bombas de vácuo empregadas na aplicação. Na prática, os filtros de disco desse tipo são extremamente eficientes em termos energéticos, usando até 90% menos energia do que os outros filtros de vácuo, o que reduz significativamente o custo operacional do projeto. Além disso, outra ação pertinente a capilaridade e de extrema relevância operacional, é a capacidade de retenção de partículas extremamente finas, o que confere ao fluxo filtrado uma turbidez mínima. A Figura 3.16 compara a qualidade do filtrado de um filtro cerâmico e de um filtro a vácuo convencional.



Figura 3.16 - Comparativo material filtrado. (1) Filtro cerâmico, (2) Filtro de disco a vácuo convencional (Acervo Anglo American).

O ciclo do filtro cerâmico se assemelha muito ao ciclo do filtro de disco a vácuo convencional. As etapas são compostas por:

- Formação da torta: Com o disco imerso na polpa, a ação do vácuo, gerado pela capilaridade, provoca uma força de atração do líquido em direção a placa cerâmica. Com isso, a fração sólida se acumula rapidamente na superfície da placa e formam a torta;
- Secagem da torta: O movimento rotativo do filtro faz com que a torta formada saia da bacia com polpa e dê início a etapa de secagem. O meio micro poroso permite que apenas o líquido flua e, devido a força capilar que mantém os poros cheios de água, o ar é impedido de penetrar na superfície do disco. O resultado desse processo é uma torta com baixa umidade residual ao fim da etapa de secagem;
- Descarga da torta: Raspadores milimetricamente posicionados são utilizados para remover a torta seca do disco, deixando um fino resíduo de material com o intuito de proteger contra a abrasão mecânica. Essa estratégia reduz a manutenção nos discos e prolonga sua vida útil.

Esse sistema elimina a necessidade de um sistema de descarga de torta contínuo, existente nos filtros de disco a vácuo convencionais;

- Lavagem dos discos: O material filtrado é usado para lavar os discos após a descarga da torta, removendo assim o material residual e limpando a estrutura micro porosa, o que auxilia na manutenção da eficiência da filtração;
- Regeneração dos discos: A regeneração do disco é realizada periodicamente para manutenção da permeabilidade total dos discos. Geralmente utiliza-se sistemas com reagentes químicos e/ou ultrassônicos já incorporados ao filtro, ao depender da particularidade de cada material a ser filtrado.

A figura 3.17 ilustra o ciclo completo de um filtro cerâmico.

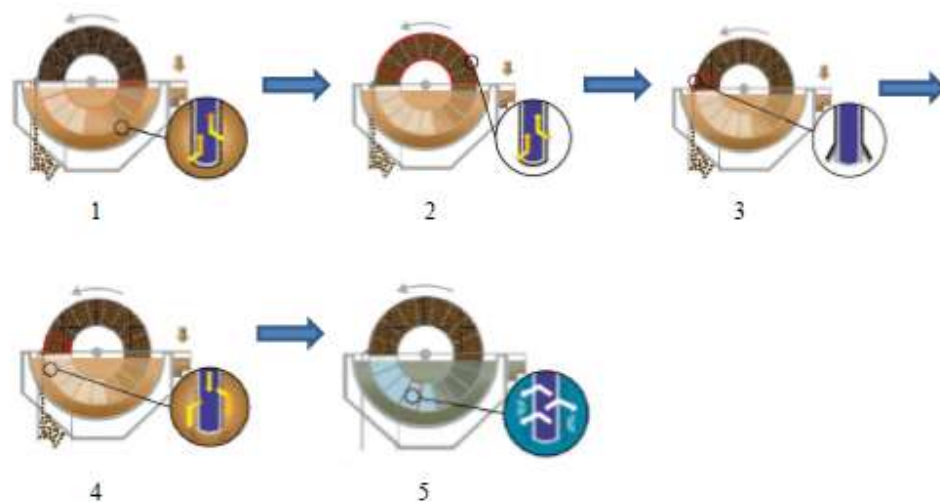


Figura 3.17 - Ciclo de filtração de um filtro cerâmico. (1) - Formação, (2) - Secagem, (3) - Descarga, (4) - Limpeza, (5) Regeneração (SMITH, 2015).

Os filtros cerâmicos empregados em mineração atualmente possuem elevadas capacidades, com equipamentos de até 144 m² de área com 12 a 15 setores por disco, são capazes de absorver um grande fluxo de material filtrado e possuem um elevado grau de automação. Operacionalmente é possível controlar o tempo de formação da torta, visando ajustar a capacidade, e o tempo de secagem, visando ajustar a umidade residual da torta seca. O conjunto completo do filtro contempla o painel de controle em campo, a bomba de vácuo, o tanque de filtrado, os tambores, os agitadores e a unidade de limpeza ultrassônica (SMITH, 2015). A Figura 3.18 ilustra um equipamento industrial em aplicação na filtragem de concentrado de minério de ferro.



Figura 3.18 - Filtro cerâmico (Acervo Anglo American).

3.9.3 Filtro Prensa

O filtro prensa é uma tecnologia de uso geral que pode ser usada em um grande número de aplicações. Essa grande variação na aplicação se reflete na variedade de modelos, opções e tamanhos disponíveis. Atualmente quantidades enormes de minério de ferro são filtradas em todo mundo em filtros prensa, enquanto o plasma sanguíneo também é filtrado em equipamentos com aparência superficialmente semelhante, embora em escala menor (SPARKS; CHASE, 2016).

Devido a incompressibilidade virtual dos sólidos, a filtragem sob pressão possui algumas vantagens quando comparada a filtragem a vácuo, entre elas destacam-se a capacidade de filtrar polpas que possuem partículas extremamente finas e maior flexibilidade de controle durante a secagem da torta filtrada, possibilitando a obtenção de tortas com menor umidade residual. Em contrapartida,

tais filtros costumam operar sob um regime de batelada, o que limita sua capacidade produtiva, e gera a necessidade de instalação de vários equipamentos operando em conjunto para se obter algo próximo de uma operação contínua.

A estrutura do filtro prensa possui um conjunto de placas paralelas, geralmente dispostas na posição vertical ou horizontal, onde cada par de placas é recoberto por um tecido filtrante e forma um espaço vazio entre elas. O mecanismo de funcionamento consiste no preenchimento desse vazio com o material a ser filtrado e logo em seguida aplica-se a pressão no interior da câmara, fazendo com que a torta se forme sobre o tecido filtrante e a água percole e se direcione para a saída do filtro, conforme ilustrado na Figura 3.19.

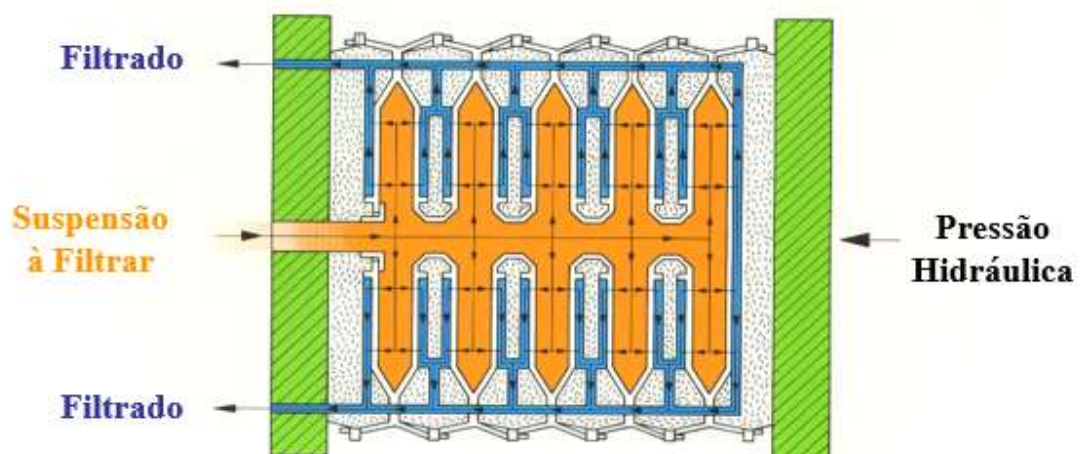


Figura 3.19 - Mecanismo de funcionamento do Filtro Prensa.

Três elementos fundamentais para garantia de uma boa operação de filtros do tipo prensa são:

- Uma estrutura física robusta o suficiente para suportar a pressão aplicada mantendo a integridade estrutural da máquina pressurizada. Deve-se ter em mente que as forças envolvidas podem ser enormes e, dada a natureza cíclica das cargas, as tensões de fadiga podem ser extremamente relevantes;
- Um conjunto de placas recobertas por tecido filtrante e com canais para direcionamento do material filtrado e descarregamento da torta;

- Mecanismos de abertura e fechamento do conjunto de placas, local apropriado para descarga da torta filtrada e sistema de limpeza pós descarga.

Com o desenvolvimento da tecnologia, algumas melhorias foram implementadas nos filtros prensa de forma a possibilitar uma maior eficiência de filtração, uma maior produtividade e/ou uma redução nos tempos de ciclo. Dentre as principais evoluções destacam-se (SPARKS, 2012):

- Placas de diferentes espessuras internas que se unem com o intuito de formar câmaras de filtração com diferentes volumes, a depender do processo a ser aplicado;
- Placas diafragma que consistem em uma placa com uma membrana de borracha ou polímero encaixável e interna. O diafragma permite a aplicação de uma maior pressão em ambos os lados da torta forçando ainda mais a saída do líquido presente no interior das placas, conforme ilustrado na Figura 3.20.

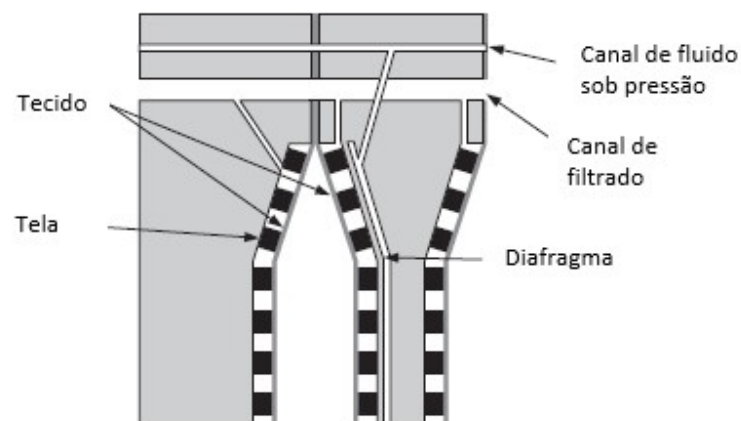


Figura 3.20 - Arranjo de um par de placas com diafragma (SPARKS, 2012).

Essencialmente, a operação de um filtro prensa pode ser dividida em duas etapas: a filtração e o tempo mecânico. Na etapa de filtração, se a operação estiver conforme projetada, não há muita possibilidade de otimização, visto que durante a fase do projeto e ensaios laboratoriais deve-se contemplar todas as particularidades do material a ser filtrado. Já o tempo mecânico, período não

produtivo do filtro, pode ser otimizado através da automação do filtro, reduzindo o seu tempo de ciclo significativamente e aumentando sua produtividade (NETO, 2016).

A combinação entre o tempo de filtragem e o tempo mecânico constituem o chamado tempo de ciclo, que se refere ao tempo requerido para completar um ciclo completo de filtragem. Esse ciclo se inicia com o fechamento e travamento das placas, em seguida ocorre o bombeamento da polpa para o interior das placas, utilizando uma bomba de deslocamento positivo capaz de pressurizar o sistema. A pressão obriga o filtrado a atravessar as telas e a escorrer pelos espaços existentes nas placas. Após o tempo de secagem, as placas são descarregadas individualmente ou de forma conjunta. Por fim, as telas são lavadas, uma a uma, e o filtro de fecha para início de um novo ciclo. A Figura 3.21 ilustra o ciclo completo de um filtro prensa horizontal.

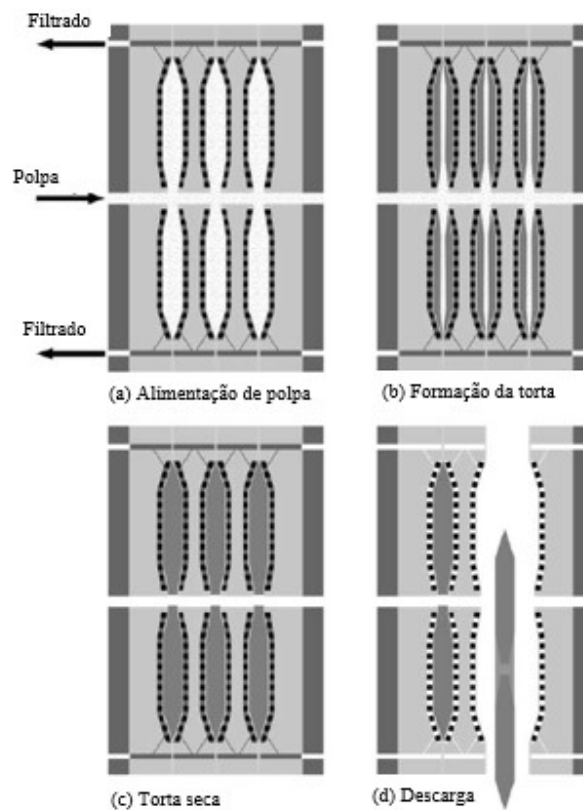


Figura 3.21 - Ciclo completo de um filtro prensa horizontal (SPARKS, 2012).

Atualmente é comum o uso de filtros prensa automáticos nas mais diversas aplicações industriais, inclusive no setor mineral. Um filtro prensa automático é aquele no qual a abertura das placas, a partida da bomba e do equipamento auxiliar e a operação da válvula, bem como a descarga da torta, são todos controlados automaticamente. Atualmente tem-se a aplicação de filtros prensa na mineração de cobre onde a massa processada atinge valores em torno de 150 toneladas por hora, com áreas de filtração de até 144 m². Para o minério de ferro, é possível obter rendimento ainda maiores, a depender do tipo de material a ser filtrado. Em relação a umidade residual da torta, o valor pode variar de acordo com as particularidades da polpa, mas valores entre 7,50% a 12,50% são os mais comuns.

4. METODOLOGIA

Esse capítulo apresenta o desenvolvimento contemplado para avaliação das tecnologias que possibilitem uma disposição de rejeitos a seco. Para tal, uma gama de ensaios em diferentes equipamentos foi realizada com a finalidade de abranger várias possibilidades e alternativas de processo, visando embasar uma tomada de decisão técnico-econômica para uma futura instalação industrial definitiva.

4.1 Definição das amostras

O primeiro passo do trabalho consistiu na avaliação do fluxograma de processo para definição dos pontos em que seriam coletadas as amostras para execução dos ensaios e suas particularidades. A Figura 4.1 ilustra o fluxograma em questão com destaque para os pontos de geração de rejeitos.

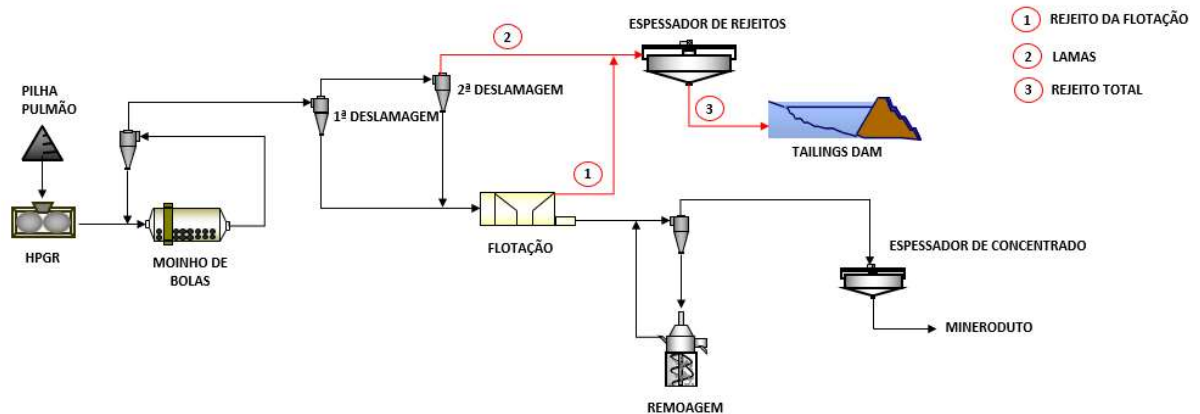


Figura 4.122 - Fluxograma de processo Minas-Rio.

De posse do fluxograma e após uma criteriosa avaliação de processo optou-se por realizar a coleta das amostras em três fluxos distintos, sendo eles:

- Rejeito da flotação – Representa 85% em massa dos rejeitos totais gerados;
- Lamas – Representa 15% em massa dos rejeitos totais gerados;
- Rejeito total – Composição entre o rejeito da flotação e das lamas após a etapa de espessamento;

4.2 Amostragem

A amostragem foi definida com o intuito de se obter massa suficiente para execução de todos os ensaios contemplados ao longo do trabalho a partir de uma única campanha de amostragem. Tal decisão foi tomada visando evitar oscilações de processo e perda de representatividade caso as amostras fossem coletadas em momentos distintos e em alíquotas com um longo espaço de tempo entre elas.

Para o rejeito da flotação foi contemplada uma coleta de aproximadamente 420 kg de material base seca, tais amostras foram coletadas em um amostrador automático tipo VEZIN do fornecedor Multotec para garantir a representatividade do material. Para as lamas foram coletas de 100 kg de material base seca em um amostrador automático tipo VEZIN da empresa Multotec para garantir a representatividade do material. Por fim, para os rejeitos totais foram coletas aproximadamente 210 kg de material base seca e utilizando um amostrador manual após o bombeamento para garantir a homogeneidade e representatividade do material. Todas as amostras coletadas na mesma data em um intervalo de tempo menor do que 2 horas e durante a campanha houve a avaliação da estabilidade do processo como um todo de forma a garantir uma boa representatividade dos fluxos em questão.

4.3 Caracterização das amostras

Após a coleta as amostras foram encaminhadas para o Centro de Tecnologia Mineral da Anglo American em Conceição do Mato Dentro para início das caracterizações previamente estabelecidas pela equipe de Processo Mineral. Todas as amostras foram submetidas aos mesmos ensaios de caracterização, onde o primeiro passo foi realizar a homogeneização completa das amostras em agitadores com bomba de recirculação, seguida da coleta de alíquotas em cortes manuais em intervalos de tempo pré-estabelecidos até a composição de um volume adequado para todos os ensaios. Num primeiro momento as amostras foram submetidas a secagem em estufa a 100°C para determinação do percentual de sólidos e, por fim, homogeneizadas novamente e quarteadas em um quarteador automático para obtenção de alíquotas representativas para as demais caracterizações.

4.3.1 Caracterização granulométrica

As análises granulométricas foram realizadas em um peneirador suspenso a úmido utilizando peneiras da série Tyler. O peneiramento foi realizado com injeção de água e finalizado no momento em que o fluxo passante na última malha estivesse completamente clarificado. As malhas utilizadas para o estudo foram as de 600 μm , 425 μm , 300 μm , 212 μm , 150 μm , 106 μm , 74 μm , 53 μm , 44 μm e 38 μm .

O material passante na malha de 38 μm foi utilizado para alimentar um *cyclosizer*, marca CDC, com o tempo de ciclo total de 15 minutos e classificação em 5 tamanhos efetivos de separação diferentes, o material passante no último ciclone do *cyclosizer* foi coletado, filtrado e pesado para obtenção dos dados para o estudo.

4.3.2 Análise química

Para execução da caracterização química das amostras foi utilizado o método de fluorescência por raio-x em pastilhas fundidas pelo aparelho Axios Fast, da empresa Panalytical. A Tabela 4.1 ilustra os elementos analisados para todos os fluxos em questão.

Tabela 4.1 - Elementos quantificados na análise química.

Fe₂O₃	Al₂O₃	SiO₂	P	Mn	TiO₂	CaO	MgO	Na₂O	K₂O
------------------------------------	------------------------------------	------------------------	----------	-----------	------------------------	------------	------------	------------------------	-----------------------

4.3.3 Análise de densidade dos sólidos

A avaliação da densidade dos sólidos foi realizada a partir do uso de um Pentapicnômetro, modelo Pentapyc 5200e, da marca Quantachrome. O ensaio consiste na determinação do volume da amostra, através da variação de gás Hélio injetado na célula utilizada. O gás é usado como fluido de deslocamento porque penetra nos poros mais finos, garantindo a máxima precisão. As células do Pentapicnômetro já possuem volume conhecido e variação do volume de gás injetado, possibilita o cálculo de volume da amostra. A determinação da densidade ocorre de forma automática, sendo necessária apenas a inserção da massa de amostra pesada para execução da medição.

4.3.4 Análise de área superficial específica

A medição de área superficial específica das amostras foi feita com um Permeabilímetro Automático de Blaine, modelo PC-Blaine Star, da marca ZEB. O ensaio é realizado pelo método de permeabilidade do ar onde a área superficial específica é medida pela comparação com uma amostra de referência, que para o ensaio em questão foi uma amostra padrão de Quartzo.

4.4 Ensaios tecnológicos

De posse das amostras caracterizadas, optou-se pelo estudo das alternativas de processo e tecnologias de filtração de maior potencial para cada tipo de rejeito. Devido a grande diversidade de tecnologias de filtração disponíveis atualmente no mercado, optou-se por realizar um levantamento de tecnologias que já vêm sendo aplicadas com sucesso na indústria da mineração de acordo com as características de cada material. Os tipos de filtros selecionados para o estudo foram:

- Filtro de disco a vácuo convencional;
- Filtro de disco cerâmico;
- Filtro Prensa.

Os testes em escala laboratorial foram realizados em parceria com a empresa Outotec nas instalações da Fundação Gorceix em Ouro Preto- MG. Para definição de quais tecnologias seriam testadas para cada tipo de material houve uma avaliação de aplicabilidade junto aos responsáveis técnicos da Outotec e a Anglo American. As caracterizações indicaram os seguintes potenciais de aplicabilidade:

- Rejeito da flotação: Filtro de disco a vácuo convencional e filtro de disco cerâmico;
- Lamas: Filtro prensa;
- Rejeito total: Filtro de disco a vácuo convencional, filtro de disco cerâmico e filtro prensa.

Além da determinação das tecnologias a serem testadas, optou-se por avaliar também o impacto do adensamento na eficiência da etapa de filtração. Para isso, foi elaborado um protocolo de testes considerando polpas na diluição tal qual coletadas na usina de beneficiamento e polpas adensadas para valores considerados adequados para cada tecnologia de filtração. A Tabela 4.2 ilustra as condições definidas para os testes.

Tabela 4.2 - Condições de adensamento para execução dos ensaios.

Amostra	Condição tal qual (% Sólidos em peso)	Condição adensada (% Sólidos em peso)
Rejeito da flotação	50,00%	65,00%
Lamas	4,50%	25,00%
Rejeito total	55,00%	65,00%

Outro ponto avaliado foram as condições reológicas da amostra, o que levou a execução de ensaios sem nenhum tipo de condicionamento comparativo a ensaios com uma coagulação prévia das polpas minerais. Para coagulação das amostras foi utilizado cal virgem hidratada numa diluição de 15% em massa e o controle realizado visou a aplicação da cal até a obtenção de um pH de 11,50 para todas as polpas minerais. A tabela 4.3 ilustra os valores de pH no momento da coleta das amostras e após a coagulação.

Tabela 4.3 - Valores de pH antes e após coagulação.

Amostra	pH antes da coagulação	pH depois da coagulação
Rejeito da flotação	10,30	11,50 a 11,80
Lamas	9,30	11,50 a 11,80
Rejeito total	10,20	11,50 a 11,80

Após as definições das tecnologias, das condições de adensamento e das condições reológicas da polpa, foi possível estabelecer um planejamento completo dos ensaios laboratoriais. A Figura 4.2 contém o planejamento de acordo com cada tipo de tecnologia de filtração.

Filtro de disco a vácuo convencional				
	Tal Qual Sem Coagular	Tal Qual Coagulado	Adensado s/ coagular	Adensado coagulado
Rejeito flotação	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Rejeito total		Teste 21	Teste 5	Teste 6

Filtro cerâmico				
	Tal Qual Sem Coagular	Tal Qual Coagulado	Adensado s/ coagular	Adensado coagulado
Rejeito flotação	Teste 7	Teste 8	Teste 9	Teste 10
Rejeito total		Teste 22	Teste 11	Teste 12

Filtro Prensa				
	Tal Qual Sem Coagular	Tal Qual Coagulado	Adensado s/ coagular	Adensado coagulado
Rejeito flotação	Teste 13	Teste 14	Teste 15	Teste 16
Rejeito total		Teste 23	Teste 17	Teste 18
Lamas			Teste 19	Teste 20

Figura 4.223 - Planejamento dos testes laboratoriais de filtração.

A execução dos ensaios seguiu a metodologia proposta pela Outotec de acordo com cada tipo de filtro. Os equipamentos utilizados e os procedimentos de cada tecnologia estão descritos abaixo, conforme o procedimento padrão utilizado pela Outotec para execução de testes laboratoriais:

- **Filtro de Disco a Vácuo Convencional**

O equipamento completo contempla uma unidade de testes com 0,01 m² de área de filtração, sistema de geração de vácuo, Kitassato de 2 litros com tampa devidamente lacrada, manômetro de pressão com variação entre -1,0 a +5,0 bar, válvulas esfera para controle de vácuo e tecidos de filtração.

O procedimento de teste consiste em mergulhar o disco em polpa suspensa durante tempo de formação pré-determinado. Ao fim do tempo de formação da torta retira-se o disco da polpa, de maneira cuidadosa, e inicia-se a secagem. Todos os tempos de formação e secagem são determinados de acordo com o nível da bacia e velocidade de rotação do disco, simulando a operação de um equipamento piloto ou industrial. Imediatamente ao fim da secagem, a torta deve ser retirada do disco desligando-se o vácuo e, se necessário, realizado o sopro. Mede-se a espessura

da torta, a massa úmida torta e coloca-se a torta em estufa para secar totalmente. Com a massa seca da torta pode-se determinar a umidade residual e a capacidade de filtragem do equipamento. A Figura 4.3 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 24.3 - Filtro a vácuo convencional laboratorial.

- Filtro Cerâmico

O equipamento completo contempla uma placa cerâmica com 0,027 m² de área de filtragem, sistema de geração de vácuo, Kitassato de 2 litros com tampa devidamente lacrada, manômetro de pressão com variação de -1,0 a +5,0 bar, válvulas esfera para controle d fluxo de água e de vácuo e um equipamento de ultrassom para limpeza da placa ao fim de cada teste.

O procedimento de teste consiste em mergulhar a placa cerâmica na polpa suspensa durante um tempo de formação pré-determinado. Ao fim do tempo de formação da torta retira-se a placa da polpa, de maneira cuidadosa, e inicia-se a secagem. Todos os tempos de formação e secagem são determinados de acordo com o nível da bacia e velocidade de rotação do disco, simulando a operação de um equipamento piloto ou industrial. Imediatamente ao fim da secagem, a torta deve ser retirada da placa através da raspagem. Mede-se a espessura da torta, a massa úmida torta e coloca-se a torta em estufa para secar totalmente. Com a massa seca da torta pode-se determinar a umidade residual e a capacidade de filtragem do equipamento. A Figura 4.4 ilustra o equipamento utilizado ao longos dos testes.



Figura 25 - Filtro cerâmico laboratorial.

- Filtro Prensa

O procedimento de testes com o filtro contempla alimentar a câmara de filtração por uma bomba de diafragma com pressão entre 1 e 8 bar. Na câmara do filtro, a polpa flui para o tecido filtrante, que retém os sólidos na sua superfície. Após percolar o meio filtrante composto pela torta recém-formada e pelo tecido, o filtrado flui pelos denominados canais de filtrado que o transportam para fora do filtro. Após completar a etapa de bombeamento e total preenchimento da câmara, o diafragma é pressurizado para reduzir o volume de líquido na torta. A pressão de prensagem é de 2 a 12 bar. Ao fim da prensagem, é injetado ar comprimido que percola pela torta e reduz ainda mais a umidade residual. A pressão de secagem pode variar entre 1 e 10 bar. Por fim, o descarregamento da torta só pode ser realizado após o alívio de todas as pressões remanescentes no filtro. Então deve-se aliviar o sistema hidráulico de fechamento de placas, colocar um recipiente coletor de torta abaixo da câmara e abrir as placas. Mede-se a espessura e umidade residual da torta. A Figura 4.5 ilustra o equipamento utilizado.



Figura 4.526 - Filtro prensa laboratorial.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização Tecnológica

Os primeiros resultados obtidos foram referentes a caracterização de cada amostra. A Tabela 5.1 ilustra os resultados obtidos nas análises granulométricas realizadas, conforme metodologia apresentada anteriormente, e a Figura 5.1 contém as curvas granulométricas sob a forma gráfica.

Tabela 4.1 - Caracterização Granulométrica.

% Passante Acumulado			
Malha (µm)	Rejeito Flotação	Rejeito Total	Lamas
600	100,00%	100,00%	100,00%
425	99,91%	99,82%	100,00%
300	98,78%	97,88%	100,00%
212	90,86%	90,11%	99,97%
150	79,16%	79,77%	99,89%
106	57,37%	62,38%	99,75%
74	40,20%	49,09%	99,51%
53	29,39%	40,46%	99,16%
44	26,06%	37,91%	98,32%
38	24,66%	36,61%	97,82%
27	10,18%	25,39%	89,03%
19	6,52%	20,50%	81,63%
12	4,12%	16,32%	73,45%
9	2,85%	12,31%	57,38%

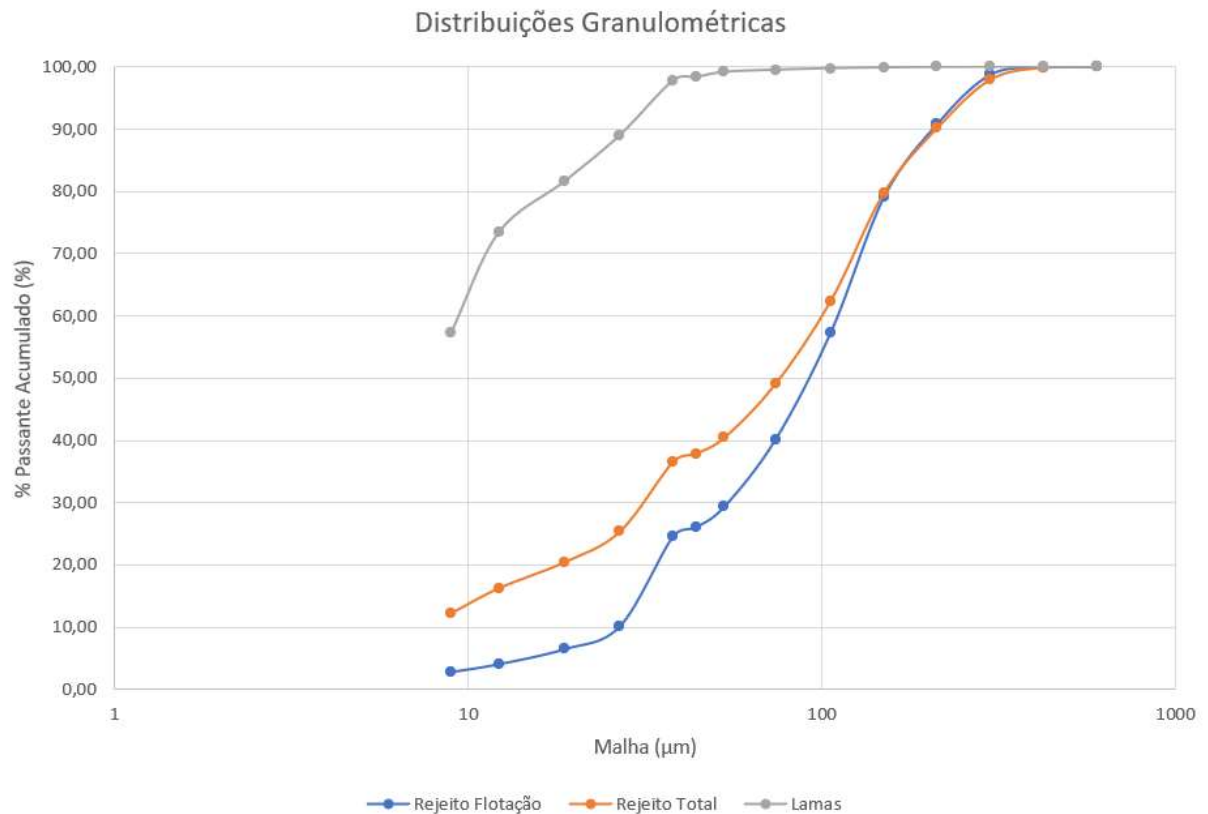


Figura 5.127 - Distribuição granulométrica das amostras testadas.

Nota-se que a presença do material ultrafino no rejeito total faz com que haja uma diferença significativa na fração fina da curva quando comparada com o fluxo proveniente do rejeito da flotação. A Tabela 5.2 contém os dados de análise química, densidade do sólido e área superficial das três amostras testadas.

Tabela 5.2 - Análise química, densidade de sólido e blaine.

Amostra	Fe (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Densidade (t/m ³)	Blaine (cm ² /g)
Rejeito flotação	13,39	0,97	79,03	0,01	0,01	0,06	0,01	0,00	2,95	630
Rejeito total	16,18	1,84	72,86	0,02	0,01	0,07	0,08	0,00	3,01	1150
Lamas	40,94	6,11	28,80	0,12	0,43	0,12	0,00	0,14	3,74	7000

5.2 Ensaio tecnológicos

Os ensaios tecnológicos foram realizados conforme o planejamento de testes exposto na Figura 4.2. As variáveis e ajustes operacionais foram determinadas de forma a possibilitar a avaliação mais completa possível das possibilidades tangíveis de filtração com cada tecnologia testada. Os dados detalhados se encontram no Anexo I com todas as imagens, variáveis adotadas e resultados obtidos de todos os testes considerados.

Após a realização dos ensaios e obtenção dos resultados, fez-se uma análise visando o comparativo entre diferentes variáveis consideradas no estudo. Para tal, dividiu-se as análises de acordo com a influência de cada variável no desempenho da filtração, sendo possível de analisar a influência da tecnologia, da coagulação e da diluição da polpa.

5.3 Influência da tecnologia

Com o objetivo realizar um comparativo entre as tecnologias, considerando uma mesma amostra, a primeira análise avaliou os resultados obtidos com as amostras de rejeito da flotação adensado e rejeito total adensado, visto que todas as tecnologias possibilitaram a medição das principais variáveis do estudo, que são umidade final da torta e taxa unitária de filtração. A Figura 5.2 ilustra os resultados obtidos com os três tipos de filtros para a amostra de rejeito da flotação adensada, vale salientar que os resultados apresentados dos testes com filtro de disco a vácuo convencional e filtro de disco cerâmico são os valores médios obtidos dos ensaios em duplicata.

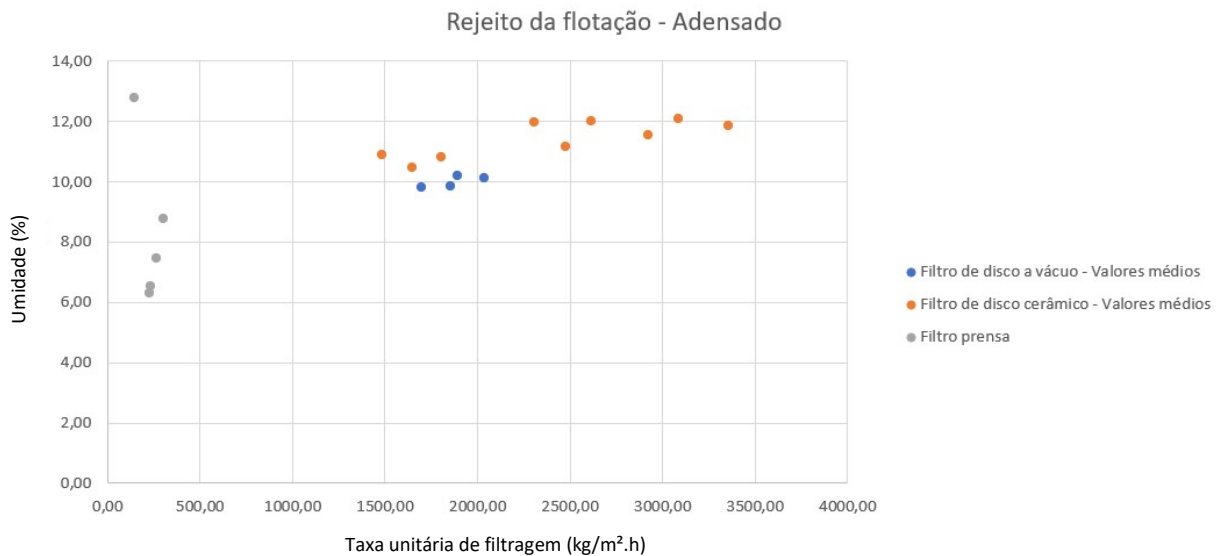


Figura 5.228 - Comparativo entre tecnologias para a amostra de rejeito da flotação adensado.

De posse dos resultados pode-se afirmar que:

- Todas as tecnologias apresentaram capacidade produzir uma torta filtrada com uma umidade residual abaixo de 14%, valor tido como adequado para a etapa seguinte do processo;
- Os valores de produtividade obtidos com o uso do filtro tipo prensa foram os menores dentre as tecnologias testadas. Nota-se que para todos os ensaios os resultados ficaram abaixo de 400 kg/m²h o que praticamente invalida o uso da tecnologia para a amostra em questão, visto que as demais tecnologias apresentaram valores de umidade semelhante com produtividades bem maiores;
- O filtro de disco a vácuo convencional possibilitou uma taxa unitária de filtragem entre 1.700 e 2.000 kg/m²h, tais valores devem ser considerados como base para uma análise técnico econômica mais detalhada objetivando uma tomada de decisão assertiva;
- O filtro de disco cerâmico obteve as maiores taxas unitárias de filtragem dentre as tecnologias testadas, apresentando valores máximos acima de 3000 kg/m²h, o que indica uma melhor eficiência de processo e um potencial de aplicação para a amostra testada.

Cabe ressaltar que testes em maior escala devem ser realizados com o intuito de fornecer mais dados e considerar um maior número de variáveis para um estudo de implementação de uma planta de filtragem de rejeitos.

O segundo comparativo realizado entre as tecnologias foi considerando o uso da amostra proveniente do rejeito total adensado. A Figura 5.3 ilustra os resultados obtidos com os três tipos de filtros.

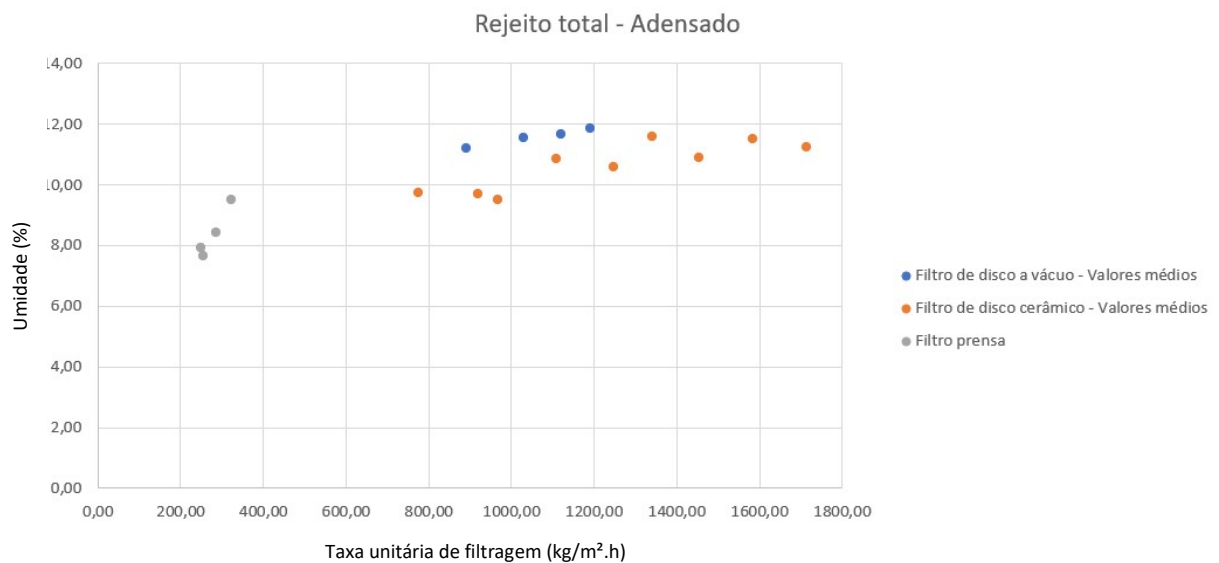


Figura 5.329 - Comparativo entre tecnologias para a amostra de rejeito total adensado.

Avaliando os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Todas as tecnologias apresentaram capacidade produzir uma torta filtrada com uma umidade residual abaixo de 14%, valor tido como adequado para a etapa seguinte do processo;
- Os valores de taxa unitária de filtragem obtidas com o uso do filtro tipo prensa foram os menores dentre as tecnologias testadas. Nota-se que para todos os ensaios os resultados ficaram abaixo de 400 kg/m²h o que praticamente invalida o uso da tecnologia para a amostra em questão, visto que as demais tecnologias apresentaram valores de umidade semelhante com taxas unitárias de filtragem bem maiores;

- O filtro de disco a vácuo convencional possibilitou uma taxa unitária de filtração entre 900 e 1.200 kg/m²h. Tais valores demonstram um potencial de aplicação da tecnologia para uma amostra com a presença de ultrafinos, mas deve ser melhor avaliado em termos técnicos e econômicos;
- O filtro de disco cerâmico obteve as maiores taxas unitárias de filtração dentre as tecnologias testadas, mas com uma elevada variação. Os valores máximos atingiram algo em torno de 1.700 kg/m²h mas ainda assim devem ser melhor avaliados do ponto de vista técnico econômico;
- Entre as duas amostras testadas visando o comparativo das tecnologias, nota-se que a presença do material ultrafino reduz a capacidade de filtração das tecnologias a vácuo consideravelmente. Tanto o filtro de disco quanto o filtro cerâmico apresentaram uma queda da taxa unitária de filtração em torno de 40%, o que pode ser explicado pela obstrução que as partículas ultrafinas geram nos poros dos filtros e impedem um melhor desempenho da etapa. Estudos mais detalhados devem ser realizados visando mensurar até quanto de ultrafino pode ser adicionado a um fluxo de rejeito arenoso sem impactar consideravelmente a produtividade da filtração. Em relação ao filtro prensa, houve um pequeno aumento nos valores de taxa unitária de filtração, demonstrando que o equipamento não sofre tanto impacto produtivo com a presença de material ultrafino, mas ainda assim apresenta valores de produtividade bem abaixo quando comparado com as demais tecnologias.

5.4 Influência da coagulação

Ao longo dos ensaios com o uso dos filtros de tecnologia a vácuo (filtro de disco convencional e cerâmico) pôde-se observar que a coagulação possui fundamental importância na eficiência da filtração. Os ensaios realizados, seja com o rejeito da flotação ou com o rejeito total, sem coagulação prévia da polpa em uma diluição tal qual, não apresentaram formação de torta adequada para medição e quantificação dos resultados, sendo possível concluir que se faz necessário um ajuste prévio visando a obtenção de uma polpa coagulada previamente à filtração. A Figura 5.4 possui um comparativo entre uma amostra de rejeito da flotação coagulada e uma amostra não

coagulada. Já as Figuras 5.5 e 5.6 ilustram a formação de torta obtida em amostras com uma diluição tal qual e sem coagulação previa.



Figura 5.430 - Comparativo entre amostra de rejeito da flotação, sendo a amostra da esquerda coagulada e a amostra da direita não coagulada.



Figura 5.5 - Formação de torta obtida com amostra sem coagulação utilizando filtro de disco convencional.



Figura 31 - Formação de torta obtida com amostra sem coagulação utilizando filtro cerâmico.

Quanto ao filtro prensa, foi possível observar que a coagulação influencia diretamente na taxa unitária de filtragem e na umidade residual da torta filtrada. Os testes em diferentes diluições mostraram que o efeito da coagulação é direto e também deve ser considerado como premissa para ensaios futuros. Para o rejeito da flotação numa diluição tal qual, a polpa sem coagulação apresentou valores de taxa unitária de filtragem da ordem de 111,40 kg/m²h e umidade de 15,92% enquanto que a polpa coagulada teve uma média de 251,12 kg/m²h e umidade de 7,26% respectivamente. Para a polpa adensada os valores foram semelhantes, sendo a polpa sem coagulação com uma taxa unitária de filtragem de 144,50 kg/m²h e umidade de 12,79% enquanto que a polpa coagulada teve uma média de 259,12 kg/m²h e umidade de 7,26% respectivamente. Além disso, observou-se uma maior dificuldade no descarregamento das tortas provenientes de polpas não coaguladas e uma maior retenção de material no tecido após o ensaio. A Figura 5.7 ilustra os resultados de uma torta sem coagulação prévia e a Figura 5.8 uma torta com coagulação prévia.



Figura 32 - Torta filtrada em filtro prensa sem coagulação prévia.



Figura 33 - Torta filtrada em filtro prensa com coagulação prévia

Diante dos fatos, pode-se afirmar que a coagulação possui grande relevância na eficiência de filtragem das três tecnologias consideradas nesse estudo. Todos os resultados com polpas coaguladas se mostraram superiores em termos de produtividade e umidade residual do produto filtrado. Novos ensaios devem ser realizados visando determinar o melhor tipo de coagulante e suas respectivas diluições e dosagens adequadas para obtenção de uma maior eficiência de processo aliada a um bom resultado econômico.

5.5 Influência da diluição

A diluição da polpa de alimentação da filtragem foi a terceira variável de processo analisada ao longo do estudo. Tal variável possui influência direta no dimensionamento das instalações e a obtenção de uma diluição correta, fruto de ajustes de processo em etapas anteriores à filtragem ou da instalação de etapas destinadas ao adensamento da polpa, podem trazer ganhos significativos. As análises foram realizadas tendo como base as amostras coaguladas, variando a diluição entre

uma polpa tal qual e uma polpa adensada. Além disso, fez-se uma análise isolada em cada tipo de filtro de forma a isolar apenas a variável em questão.

Os primeiros resultados são referentes aos ensaios realizados com o filtro de disco a vácuo convencional utilizando as amostras de rejeito da flotação e rejeito total. A Figura 5.9 e 5.10 ilustram os resultados de taxa unitária de filtração e umidade residual obtidos nos ensaios.

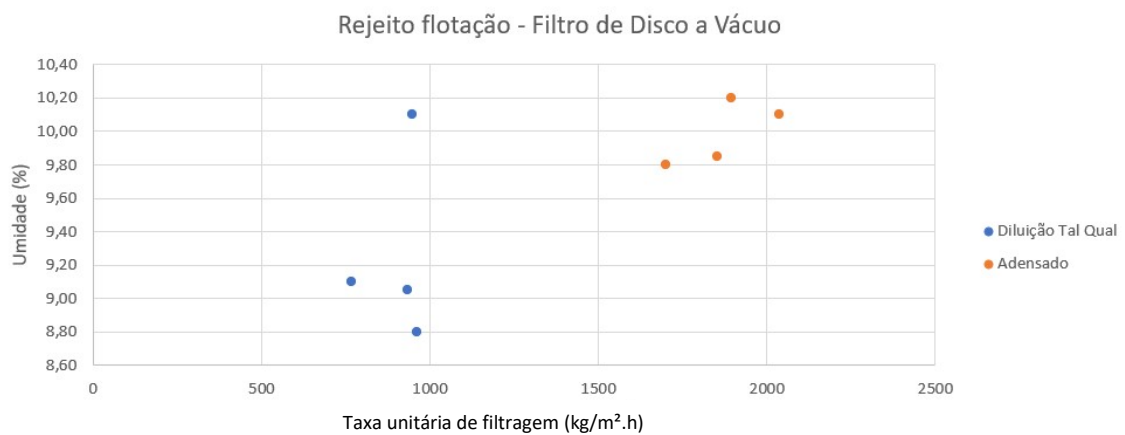


Figura 34 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito da flotação utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.

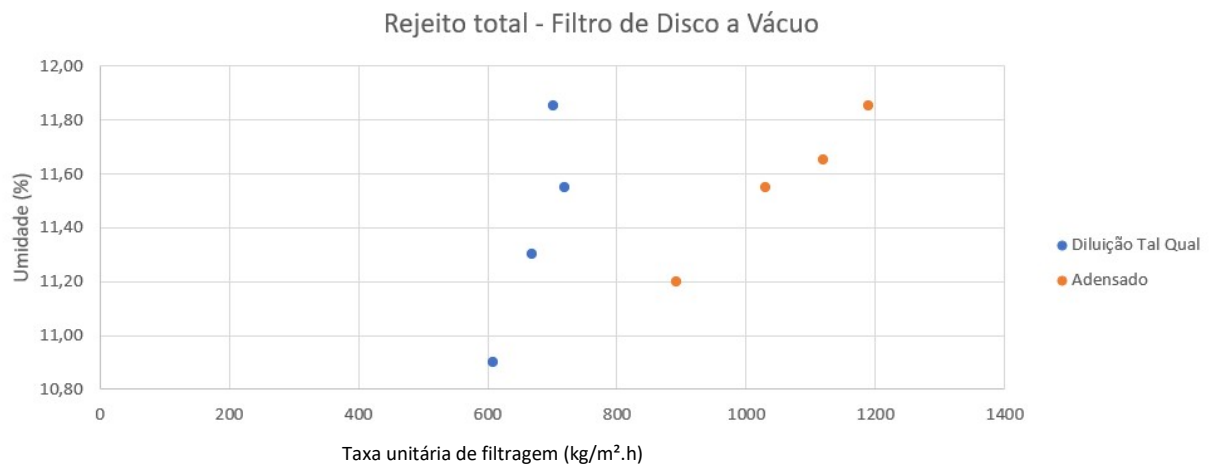


Figura 35 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.

Nota-se que o adensamento da polpa influencia diretamente no desempenho da filtração. Se tratando do rejeito da flotação, tanto a amostra tal qual quanto a amostra adensada apresentaram valores de umidade residual satisfatórios, mas quando se avalia a taxa unitária de filtração, tem-se um aumento considerável. Enquanto a amostra com diluição tal qual apresenta uma taxa unitária

de filtragem média da ordem de $900 \text{ kg/m}^2\text{h}$, a amostra adensada apresentou produtividade média da ordem de $1870 \text{ kg/m}^2\text{h}$, mostrando que uma boa adequação do percentual de sólidos da polpa pode dobrar a produtividade da etapa.

Ao se tratar do rejeito total, o efeito do adensamento também é significativo. Apesar da umidade final ter se mostrado acima da umidade obtida com o rejeito da flotação, mas dentro dos limites aceitáveis, os resultados de taxa unitária de filtragem apresentaram uma diferença da ordem de 56%. Enquanto que com a polpa a uma diluição tal qual obteve-se uma taxa unitária de filtragem média de $674 \text{ kg/m}^2\text{h}$, para a polpa adensada o valor obtido foi de aproximadamente $1057 \text{ kg/m}^2\text{h}$.

As mesmas análises foram realizadas para o filtro de disco cerâmico. Onde fez-se um comparativo entre as amostras de rejeito da flotação e rejeito total com diluições tal qual e adensadas. Cabe salientar que todos os resultados apresentados levam em consideração a utilização das amostras previamente coaguladas, visto que tal condição se mostrou fundamental para obtenção de um bom desempenho da filtragem. A Figura 5.11 e 5.12 ilustram os resultados de produtividade e umidade residual obtidos nos ensaios.

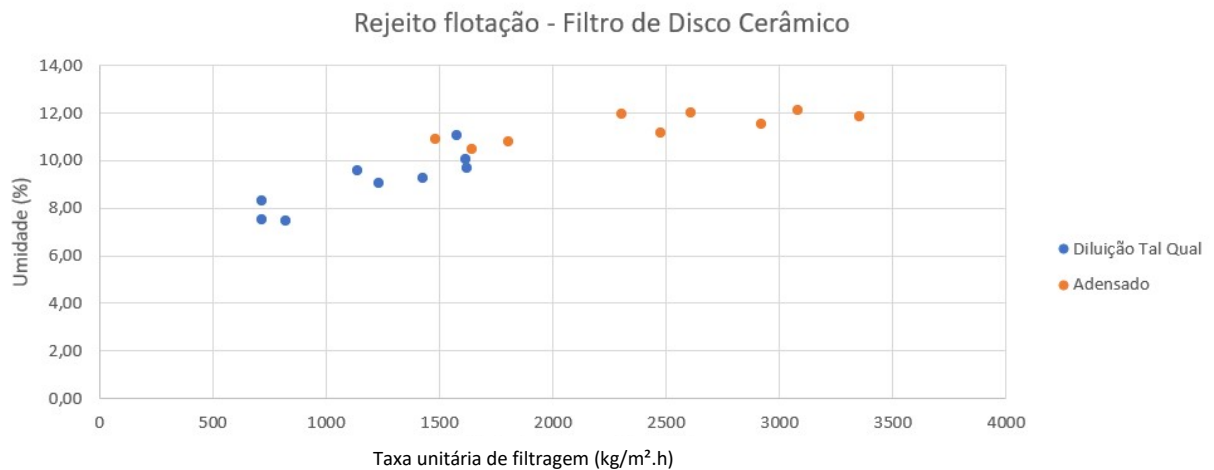


Figura 5.11 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito da flotação utilizando o filtro de disco cerâmico.

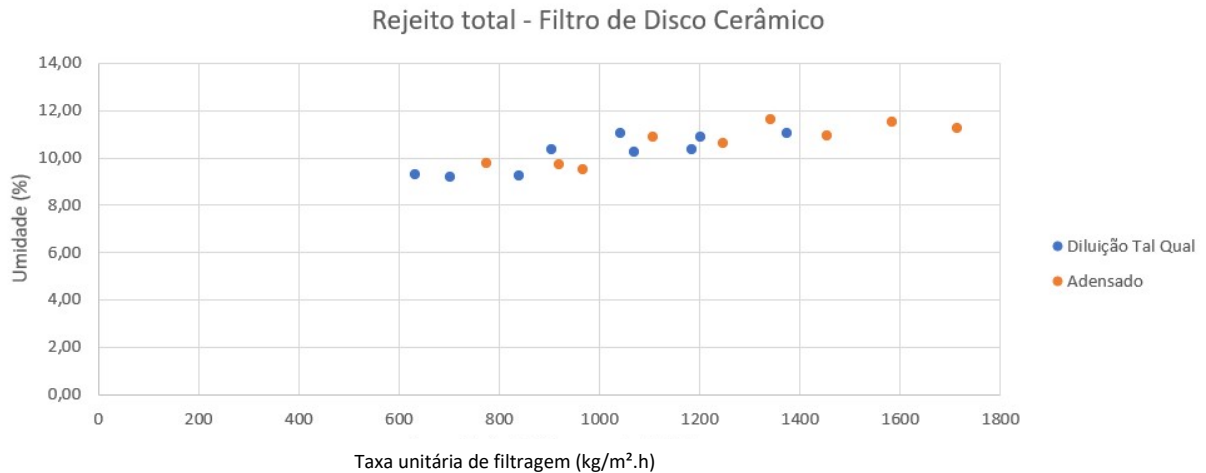


Figura 36 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro de disco cerâmico.

Os resultados obtidos ao longo dos ensaios comprovaram os ganhos de eficiência a partir do adensamento da polpa das amostras testadas. Apesar da obtenção de valores de umidade final satisfatórios para ambas amostras em diferentes condições de adensamento, nota-se que o efeito mais significativo foi na taxa unitária de filtração com a amostra de rejeito da flotação, onde houve um ganho da ordem de 100%, saindo de uma taxa unitária de filtração média de 1208 kg/m²h para 2410 kg/m²h após o adensamento. Já para a amostra utilizando o rejeito total os valores de taxa unitária de filtração se apresentam menores de forma geral, provavelmente pela presença de material ultrafino na polpa, mas ainda assim obteve-se um aumento da taxa da ordem de 24% saindo de uma média de 994 kg/m²h para uma polpa tal qual e atingindo aproximadamente 1234 kg/m²h após o adensamento.

Por fim, o mesmo comparativo foi feito utilizando o filtro prensa com as amostras de rejeito da flotação e rejeito total. Não foi possível realizar tal comparativo para a amostra de lama devido a baixa diluição da amostra tal qual, que estava em torno de 4,50% de sólidos e impossibilitou a execução de ensaios de filtração formação de torta. As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os resultados obtidos nos ensaios.

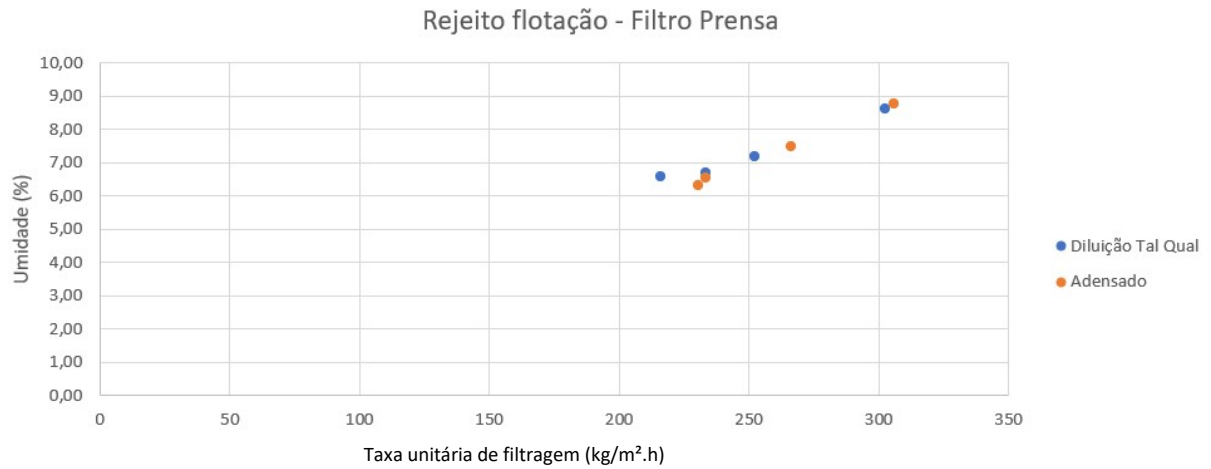


Figura 37 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito da flotação utilizando o filtro prensa.

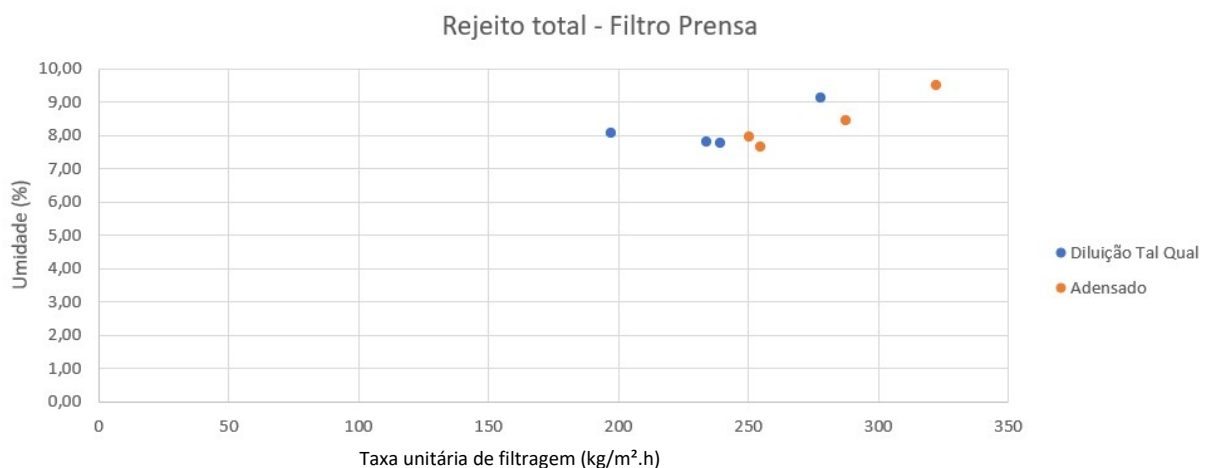


Figura 38 - Comparativo entre a diluição da amostra de rejeito total utilizando o filtro prensa.

Nota-se que o efeito da diluição não se mostrou tão relevante ao utilizar o filtro prensa. Nos testes com o rejeito da flotação os valores de umidade residual da torta e a taxa unitária de filtragem ficaram muito semelhantes, sendo obtido uma umidade média de 7,26% tanto para a amostra em uma diluição tal qual quanto para a amostra adensada. Em relação a taxa unitária de filtragem, o valor também ficou muito próximo, sendo de 251 kg/m²h para a amostra tal qual e de 259 para a amostra adensada.

Para o rejeito total a umidade se mostrou ligeiramente acima da obtida com o rejeito da flotação, sendo de 8,18% para a amostra tal qual e 8,37% para a amostra adensada. Em relação a taxa unitária

de filtração, a diferença foi um pouco mais relevante, apresentando um aumento de 18%, onde a amostra tal qual obteve uma produtividade média de 237 kg/m²h e a amostra adensada de 278 kg/m²h.

5.6 Influência da composição da amostra

Por fim, a última variável analisada foi a composição da amostra. O intuito dessa análise foi verificar a influência da presença de finos da alimentação da etapa de filtração. Como os melhores resultados obtidos foram com as amostras adensadas e coaguladas, optou-se por realizar uma análise separada pelas diferentes tecnologias de filtração, dos ensaios previamente adensados e coagulados.

Considerando o filtro cerâmico, fez-se um comparativo entre os resultados médios obtidos entre as amostras de rejeito da flotação adensada e coagulada com a amostra de rejeito total adensada e coagulada. A Figura 5.15 ilustra o comparativo entre os valores de umidade residual e taxa unitária de filtração média.

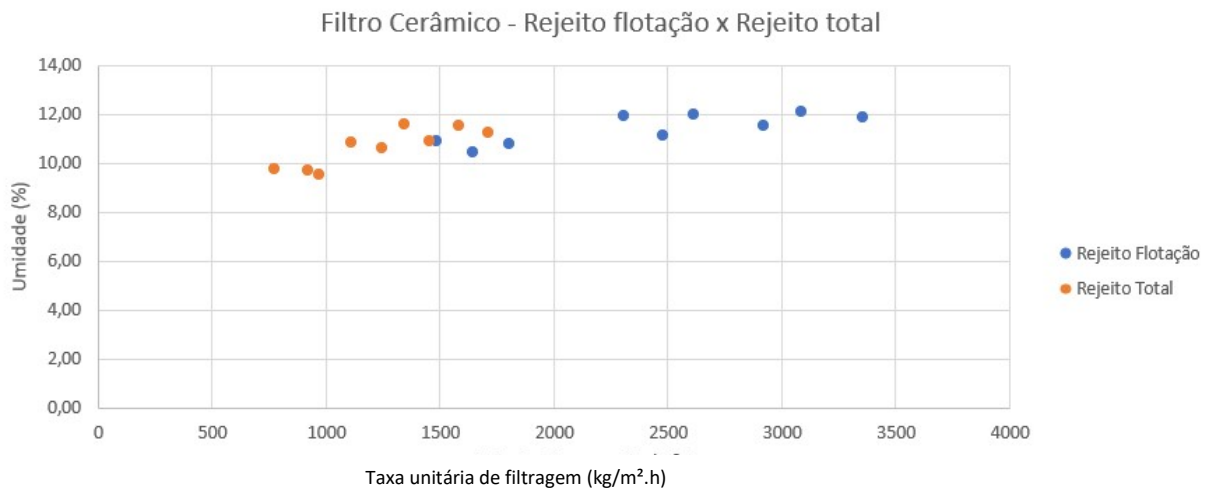


Figura 39 - Comparativo dos resultados de filtração para amostras com diferentes composições utilizando o filtro cerâmico.

Observa-se que a presença de material ultrafino na alimentação da filtração cerâmica impacta diretamente na produtividade da etapa. Apesar da possibilidade de se obter valores de umidade dentro dos limites estabelecidos, nota-se uma diferença da taxa unitária de filtração da ordem de

100%. Enquanto a amostra de rejeito total obteve uma taxa média de 1234 kg/m²h com valores máximos de 1713 kg/m²h, a amostra do rejeito da flotação apresentou uma taxa unitária de filtragem média de 2410 kg/m²h com valores máximos de 3354 kg/m²h.

Ao se realizar a mesma análise com a utilização do filtro de disco a vácuo convencional a diferença já se mostra mais relevante. A Figura 5.16 contém os valores médios de umidade residual e taxa unitária de filtragem obtidos com a amostra de rejeito da flotação adensado e coagulado e a amostra de rejeito total adensado e coagulado.

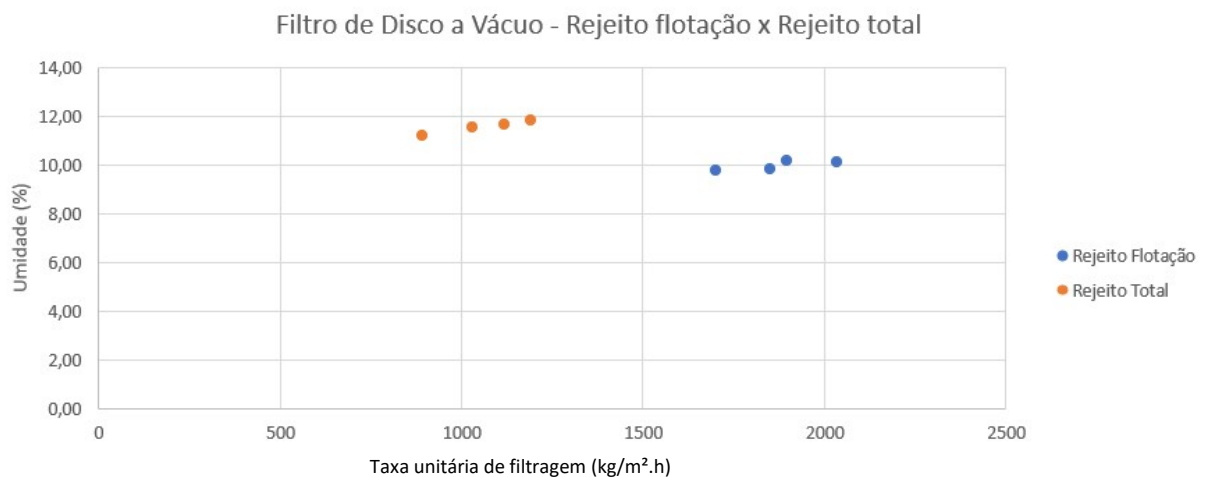


Figura 40 - Comparativo dos resultados de filtragem para amostras com diferentes composições utilizando o filtro de disco a vácuo convencional.

Nota-se que para o filtro de disco a vácuo convencional, o efeito da presença de ultrafinos impacta tanto na taxa unitária de filtragem quanto na umidade residual da torta filtrada, mostrando que efeito da obstrução dos poros para o processo de filtragem é extremamente relevante para essa tecnologia. Comparando os valores médios tem-se uma umidade de 11,50% e uma taxa unitária de filtragem de 1057 kg/m²h para o rejeito total enquanto que para o rejeito da flotação tais valores médios são de 9,98% para umidade e 1870 kg/m²h para taxa unitária de filtragem.

Para o filtro prensa foi possível realizar o comparativo entre as três amostras testadas. Os resultados apresentados na Figura 5.17 são referentes aos testes executados com o uso do filtro prensa com as

amostras de rejeito da flotação adensado e coagulado, rejeito total adensado e coagulado e amostra de lama adensada e coagulada.

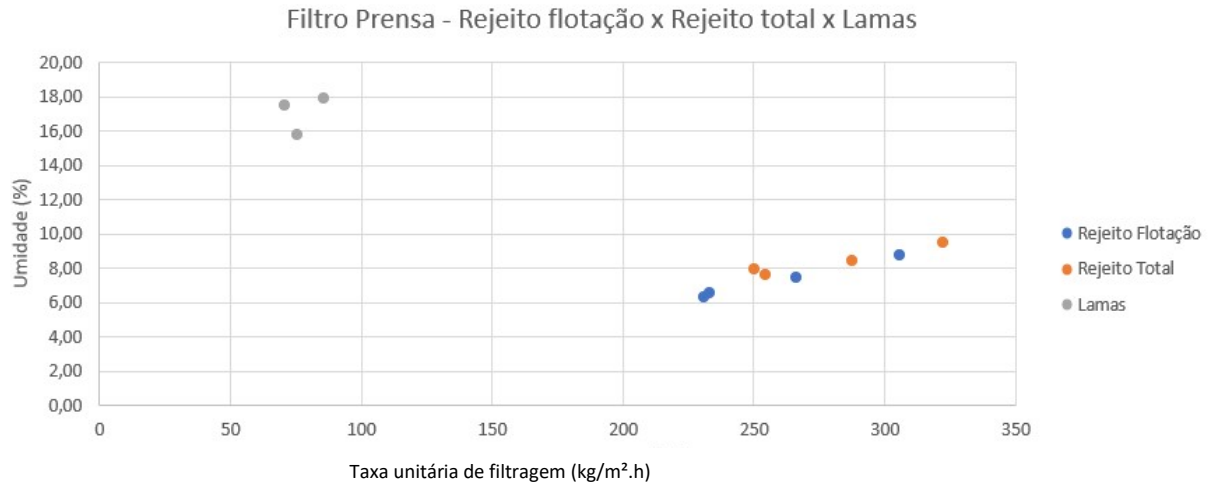


Figura 41 - Comparativo dos resultados de filtragem para amostras com diferentes composições utilizando o filtro prensa.

Analisando os resultados obtidos com o rejeito da flotação e com o rejeito total, o impacto da presença de ultrafinos em um rejeito arenoso não é tão relevante quando comparado com o mesmo impacto nas tecnologias de filtragem a vácuo. A umidade e a taxa unitária de filtragem média obtida com o rejeito total foram de 8,37% e de 278,72 kg/m²h respectivamente, enquanto que para o rejeito da flotação esses valores foram de 7,26% para umidade e 259 kh/m²h para taxa unitária de filtragem. Já se tratando da amostra de lama, que é composta exclusivamente por material ultrafino, o desempenho da filtragem apesar de baixo, foi o único tipo de tecnologia que permitiu a filtragem do material em questão, apresentando uma umidade média final de 17,05% e uma taxa unitária de filtragem de 77 kg/m²h.

6. CONCLUSÕES

Ao fim dos ensaios e avaliação dos resultados pode-se tirar algumas conclusões referentes ao desempenho do processo de filtração relativo as variáveis que impactam no processo e ao tipo de tecnologia. São elas:

- A coagulação apresenta papel de fundamental relevância no desempenho da etapa de filtração para qualquer tipo de amostra e para as diferentes tecnologias testadas. Nota-se que a coagulação possui efeito benéfico ao reduzir a quantidade de partículas ultrafinas em suspensão na polpa, o que reflete em melhores valores de umidade residual, produtividade e descarregamento de torta. Quando comparados com a amostra tal qual os testes com a amostra coagulada, utilizando o filtro prensa, nas mesmas condições apresentaram em média a metade da umidade residual e o dobro da taxa unitária de filtração. Nos testes 1, 3, 7 e 9, utilizando filtros de tecnologia a vácuo sem coagulação prévia, nem foi possível a formação da torta para avaliar o desempenho da amostra tal qual;
- A diluição da polpa também possui uma relevância fundamental na eficiência do processo de filtração, principalmente para as tecnologias de filtração a vácuo. O efeito conjunto de uma boa coagulação, aliada ao adensamento apropriado da polpa, podem aumentar significativamente a taxa unitária de filtração da etapa e trazerem ganhos significativos para implantação de um projeto industrial. Quando comparados com a amostra tal qual os testes com a amostra adensada nas mesmas condições apresentaram em média uma umidade 15% acima, mas ainda assim abaixo da umidade requerida, e 61,76% a mais de taxa unitária de filtração para o filtro cerâmico. Para o filtro de disco a vácuo convencional, a amostra adensada obteve uma umidade 4% acima, mas ainda assim abaixo da umidade especificada, e 81,90% a mais de taxa unitária de filtração. Já para o filtro prensa a diferença foi menor, sendo a amostra adensada com uma umidade 1,21% e uma taxa unitária de filtração 10,37% superiores;

- As amostras de rejeito da flotação e de rejeito total demonstraram potencial de filtração com o uso dos filtros de disco a vácuo convencional e filtro cerâmico, sendo possível de obter valores de umidade residual de torta abaixo dos 14% especificado e taxa unitária de filtração satisfatória para utilização em aplicações industriais;
- A amostra de lama só foi possível de realizar uma filtração adequada com o uso do filtro prensa, sendo necessário uma avaliação mais detalhada sobre as possibilidades de melhor adensamento do material ou incorporação ao rejeito arenoso, desde que o impacto técnico e econômico não seja elevado;
- Todos os ensaios apresentaram resultados de umidade residual de torta dentro dos valores especificados como ótimos e foi possível obter uma boa reprodutibilidade dos resultados obtidos nos testes em duplicata;
- Ao se objetivar uma instalação industrial de filtração de rejeitos, deve-se realizar um maior detalhamento dos ensaios visando estabelecer critérios de processo adequados para a instalação. Além disso, testes em maior escala devem ser realizados visando uma reprodutibilidade dos resultados e um futuro *scale-up* industrial;
- No caso dos filtros cerâmicos, deve-se levar em consideração o processo de obstrução de placas em aplicações industriais por diferentes motivos, como presença de matéria orgânica, partículas ultrafinas ou produtos químicos que possam reduzir significativamente a taxa unitária de filtração. Tais ocorrências requerem o uso de sistemas para promover a limpeza das placas e possibilitar o retorno da produtividade para níveis adequados.

ANEXO I



Anexo I - Resultados dos testes de filtragem.pdf

REFERÊNCIAS

- BARREDA, R. H. O. **Desenvolvimento de Equipamento Produtor de Pasta Miner.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- BRANDAO, R.; TOMI, G. DE; SANTOS, P. Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine , Brazil. **Integrative Medicine Research**, v. 5, n. 4, p. 339–344, 2016.
- BRATBY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment.** Third ed. London: IWA Publishing, 2016.
- DAHISTROM, Donald A. Liquid-Solid Separation. In: FUERSTENAU, Maurice C.; HAN, Kenneth N. **Principles of Mineral Processing.** Colorado: SME, 2003.
- FERREIRA, R. G. R. **Programa de Geometalurgia do Minas-Rio - Primeiras Análises.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- GREGORY, J.; BARANY, S. Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 169, n. 1, p. 1–12, 2011.
- GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- GUPTA, Ashok; YAN, Denis. **Mineral Processing Design and Operations - An Introduction.** [S. l.]: Elsevier, 2016.
- IVES, K. J. **The Scientific Basis Of Flocculation.** First ed. Cambridge: [s.n.].
- LU, L. **Iron Ore.** Kidlington: Elsevier, 2015.
- LUZ, A. B. DA; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios.** Quinta ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

NETO, G. R. V. **Maximização do desaguamento dos rejeitos minerais gerados pela concentração do minério de ferro.** [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

OLIVEIRA, M. L. M.; LUZ, J. A. M. DA; LACERDA, C. M. M. **Espessamento e filtragem.** Ouro Preto: [s.n.].

RICO, M. et al. Reported tailings dam failures A review of the European incidents in the worldwide context. v. 152, n. March 2006, p. 846–852, 2008.

SAFAAT, J. et al. A framework for a sustainable approach to mine tailings management : disposal strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1050–1062, 2015.

SASAKI, T. (2015, Março 02). **APEC Virtual Center for Environmental Technology Exchange.** Retrieved from APEC: <http://www.apec-vc.or.jp>

SMITH, J. An Assessment of Ceramic Filtration for a Metallurgical Process. 2015.

SPARKS, T. Solid- Liquid Filtration quality and productivity. 2012.

SPARKS, T. et al. Filters and Filtration Handbook. **Colloids and Surface**, v. 7757, n. 1, p. 1050–1062, 2016.

SPARKS, T.; CHASE, G. **Filters and Filtration Handbook.** Sixth ed. Waltham: Elsevier, 2016.

SVAROVSKY, L. Solid-liquid separation. (4. ed.). Woburn. BH, 2000.

TARLETON, S. **Progress in Filtration and Separation.** First ed. Waltham: Elsevier, 2015.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO A. C.; ANDRADE, A.L.L. **Curso de Separação Sólido Líquido.** Belo Horizonte. [s.n.], 1991.

VIEIRA, M. G. **Efeitos da reologia de polpa e avaliação de dispersantes**. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

WEI, H. et al. Coagulation / flocculation in dewatering of sludge : A review. **Water Research**, v. 143, n. 2015, p. 608–631, 2018.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Wills Mineral Processing Technology**. [s.l.] Elsevier, 2006.