

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

Maximização do desaguamento dos rejeitos minerais gerados pela concentração do  
minério de ferro

Autor: Gil Ribeiro Vilela Neto  
Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Fevereiro/2016

Gil Ribeiro Vilela Neto

Maximização do desaguamento dos rejeitos minerais gerados pela concentração do minério de ferro.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
2016

V699m

Vilela Neto, Gil Ribeiro.

Maximização do desaguamento dos rejeitos minerais gerados pela concentração do minério de ferro [manuscrito] / Gil Ribeiro Vilela Neto. – 2016. ix, 66 f., enc.: il.

Orientador: George Eduardo Sales Valadão.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 61-66.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral-Teses.  
3. Resíduos - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. 5. Filtros e filtração - Teses.  
I. Valadão, George Eduardo Sales. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)

A Deus,  
à minha esposa, ao meu filho  
e aos meus pais.

## AGRADECIMENTO

Agradeço a todos que participaram de alguma etapa de construção deste trabalho e, de maneira especial, agradeço:

A empresa Samarco Mineração S/A pela oportunidade e pelos recursos disponibilizados;

Ao Professor Dr. George Eduardo Sales Valadão pela orientação e pelo aprendizado;

Aos colegas da Samarco, especialmente, ao Dr. Denílson Rodrigues de Araújo, Gerente Geral de Tecnologia e Ecoeficiência, aos engenheiros especialistas M. Sc. Mauricio Cota Fonseca e Gustavo Eduardo Praes e à geóloga Dra. Júnia Maria Pinho da Rocha;

A Universidade Federal de Minas Gerais, em especial, ao Professor Dr. Antonio Eduardo Clark Peres por todo o suporte;

A empresa FLSmidth Ltda pela confiança e disponibilização de tecnologias, especialmente, aos engenheiros Flavio Santos, Flavio Storolli e Antonio Melo pela efetiva participação na realização deste trabalho;

A minha esposa pela paciência e suporte durante todo o tempo em que me dediquei na elaboração deste trabalho.

## SUMÁRIO:

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS E METAS</b> .....	3
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
3.1. O minério de ferro.....	4
3.2. A concentração de minério de ferro.....	7
3.3. A disposição de rejeitos gerados a partir da concentração do minério de ferro ..	13
3.4. O uso da água na mineração .....	18
3.5. Tecnologias de separação sólido líquido .....	19
3.5.1. Espessamento .....	21
3.5.2. Filtragem .....	24
3.5.2.1. Filtros a Vácuo .....	25
3.5.2.2. Filtro a Pressão .....	26
3.6. Filtragem de rejeitos de minério de ferro.....	33
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
4.1. Amostragem.....	36
4.2. Caracterização de Amostras.....	37
4.3. Ensaio Tecnológico .....	37
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	42
5.1. Caracterização das Amostras .....	42
5.1.1. Análise Granulométrica .....	42
5.1.2. Composição Química .....	44
5.1.3. Área Superficial Específica.....	45

5.2.	Ensaio Tecnológico .....	46
5.2.1.	Ensaio de Espessamento de Lama .....	46
5.2.1.1.	Seleção de Floculantes para a Lama.....	46
5.2.1.2.	Diluição Ideal para a Lama.....	47
5.2.1.3.	Ensaio de Sedimentação com a Lama.....	49
5.2.1.4.	Concentração de Sólidos no Underflow do Espessador de Lama .....	50
5.2.2.	Ensaio de Filtragem de Lama .....	51
5.2.2.1.	Seleção de Tecidos .....	51
5.2.2.2.	Ensaio com o Filtro Prensa .....	52
5.2.3.	Ensaio de Espessamento de Rejeito Arenoso .....	53
5.2.3.1.	Seleção de Floculantes para o Rejeito Arenoso .....	53
5.2.3.2.	Diluição Ideal para o Rejeito Arenoso .....	54
5.2.3.3.	Ensaio de Sedimentação com o Rejeito Arenoso .....	55
5.2.4.	Ensaio de Filtragem de Rejeito Arenoso .....	57
5.2.4.1.	Seleção de Tecidos .....	57
5.2.4.1.	Teste de Folha (Leaf Test).....	58
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>59</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>60</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 3.1- Fluxograma simplificado do Concentrador II da Samarco .....	7
Figura 3.2 - Esquema de um circuito tradicional de flotação de minério de ferro .....	11
Figura 3.3 - Histórico das formas de disposição dos rejeitos da mineração .....	15
Figura 3.4 - A relação dos níveis de desaguamento e limites de escoamento da polpa .	15
Figura 3.5 - Comparativo em relação a área ocupada para três formas de disposição de rejeito de minério de ferro .....	16
Figura 3.6 - Disposição de rejeito filtrado em Mantos Blancos (Chile).....	17
Figura 3.7 – Codisposição de rejeito e estéril na planta da Karara Mining .....	17
Figura 3.8 - Relação entre as tecnologias de desaguamento e o custo energético relativo .....	21
Figura 3.9 – Fluxo Esquemático de Espessadores .....	22
Figura 3.10 - Tecnologias de espessamento atuais .....	24
Figura 3.11 - Principais partes do filtro tipo esteira .....	26
Figura 3.12 - Principais partes de um filtro a pressão horizontal .....	29
Figura 3.13 - Etapas de um ciclo de filtragem em filtro prensa horizontal .....	29
Figura 3.14 - Mecanismo de filtragem quando as partículas são menores que os poros do meio filtrante.....	30
Figura 3.15 - Representação de Placas com Câmaras .....	31
Figura 3.16 - Relação entre umidade residual e tempo de ciclo para dois tipos de filtro prensa.....	31
Figura 3.17 - Filtro prensa tipo overhead .....	32
Figura 3.18 - Filtro prensa tipo side bar.....	32
Figura 3.19 - Umidade e produtividade - filtragem do rejeito arenoso .....	35
Figura 3.20 - Umidade e produtividade - filtragem de lama .....	35
Figura 4.1 - Kit para a avaliação da sedimentação estática. ....	38
Figura 4.2 - Kit para a realização do teste de folha ( <i>leaf test</i> ). ....	40
Figura 4.3 - Kit para a realização do teste de filtragem a pressão .....	41
Figura 5.1 -Distribuição granulométrica da alimentação do espessador de lama do concentrador 1 e 2 e do rejeito arenoso do concentrador 2 .....	42

Figura 5.2 - Distribuição granulométrica do underflow do espessador de lama do concentrador 1 e 2 e do rejeito arenoso do concentrador 2 .....	43
Figura 5.3 - Distribuição granulométrica do rejeito arenoso do concentrador 1 .....	44
Figura 5.4 - Avaliação de flocculantes para a lama do concentrador 1 .....	46
Figura 5.5 - Avaliação de flocculantes para a lama do concentrador 2.....	47
Figura 5.6 - Determinação da diluição ideal para o espessamento da lama do concentrador 1.....	48
Figura 5.7 - Determinação da diluição ideal para o espessamento da lama do concentrador 2.....	48
Figura 5.8 - Curva de sedimentação da lama do concentrador 1 .....	49
Figura 5.9 - Curva de sedimentação da lama do concentrador 2.....	49
Figura 5.10 - Relação entre o tempo de retenção e a concentração de sólidos no underflow para a lama do concentrador 1 .....	50
Figura 5.11 - Relação entre o tempo de retenção e a concentração de sólidos no underflow para a lama do concentrador 2.....	51
Figura 5.12 - Avaliação de flocculantes para o rejeito arenoso do concentrador 1 .....	53
Figura 5.13 - Avaliação de flocculantes para o rejeito arenoso do concentrador 2.....	54
Figura 5.14 - Determinação da diluição ideal para o espessamento do rejeito arenoso do concentrador 1.....	55
Figura 5.15 - Determinação da diluição ideal para o espessamento do rejeito arenoso do concentrador 2.....	55
Figura 5.16 - Curva de sedimentação do rejeito arenoso do concentrador 1 .....	56
Figura 5.17 - Curva de sedimentação do rejeito arenoso do concentrador 2.....	56

## **LISTA DE TABELAS:**

Tabela 5.1- Análise química da lama do concentrador 1 e concentrador 2 .....	44
Tabela 5.2- Análise química do rejeito arenoso do concentrador 1 e concentrador 2 ....	45
Tabela 5.3- Área superficial específica da lama e do rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2.....	45
Tabela 5.4- Taxa de transbordo e área unitária no espessamento da lama do concentrador 1 e 2.....	50
Tabela 5.5- Resultados da avaliação de tecidos para filtração de lama.....	52
Tabela 5.6- Resultados dos ensaios de filtração de lama .....	52
Tabela 5.7- Taxa de transbordo e área unitária no espessamento do rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2 .....	57
Tabela 5.8- Resultados da avaliação de tecidos para filtração de rejeito arenoso.....	57
Tabela 5.9- Resultados dos ensaios de filtração de rejeito arenoso .....	58

## RESUMO

Na busca por se tornar cada vez mais sustentável, a indústria mineral vem recorrendo às soluções tecnológicas que minimizem o impacto ambiental gerado pela disposição dos rejeitos gerados a partir do processo de beneficiamento de minérios.

Neste cenário, umas das soluções é a aplicação de tecnologias de separação sólido-líquido com o objetivo de maximizar o desaguamento dos rejeitos e, conseqüentemente, diminuir o volume ocupado por eles quando dispostos e aumentar a recirculação de água.

Este trabalho tem como objetivo avaliar algumas otimizações nas tecnologias de espessamento e filtração para o desaguamento dos rejeitos gerados durante a etapa de concentração do minério de ferro pela Samarco Mineração S/A.

Os resultados dos ensaios de sedimentação mostraram a viabilidade técnica de maximização do desaguamento dos rejeitos na etapa de espessamento através do ajuste da concentração de sólidos que alimenta o espessador para a condição ideal. Além de promover uma maior taxa de sedimentação e uma maior concentração de sólidos no fluxo de espessado, esta modificação trouxe ganhos em relação à produtividade de uma etapa posterior de filtração.

Os ensaios de filtração mostraram ser possível atingir níveis de umidade residual nos rejeitos que os caracterizam como torta. Com esta consistência, a disposição dos rejeitos demandará um menor volume e haverá uma maior recirculação de água na planta de concentração de minério de ferro.

## **ABSTRACT**

In the pursuit to become more sustainable, the mineral industry has sought new technological solutions to decrease its ecological footprint generated by tailings disposal of mineral dressing.

In this scenario one of the solutions is the application of solid-liquid separation technologies to maximize the tailings dewatering in order to reduce its volume and to increase water recirculation.

The purpose of this work is to evaluate some technological optimization of thickening and filtering to tailings from iron ore processing at Samarco Mineração S/A.

The thickening tests results indicated technical feasibility to maximize the tailings dewatering through of adjust of solid concentration on feeding of thickener. In addition to increase the settling rate and solid concentration of underflow the new process configuration bring allows productivity gains to a subsequent filtering step.

The filtering tests results indicated to be possible to achieve moisture of cake level for tailings. On this tailings consistency will be necessary less volume to disposal and will promote more water recirculation in iron ore concentration plant.

## 1 INTRODUÇÃO

A humanidade sempre buscou na natureza os compostos químicos necessários à sua sobrevivência e qualidade de vida. O planeta é a fonte dos elementos que formam os materiais do cotidiano e, devidos às condições físico-químicas do ambiente, uma expressiva parcela está presente nos minerais. A ação humana para aproveitar estes compostos é chamada de mineração.

Além de ser responsável pelo fornecimento de matéria-prima para as mais diversas aplicações, a mineração e todas as atividades correlatas promovem renda para a sociedade e tem participação expressiva na economia global.

Nas últimas décadas, a demanda por uma maior quantidade e variedade de materiais vem crescendo devido essencialmente ao crescimento econômico mundial e ao maior poder aquisitivo das pessoas. Isso exigiu um salto de produção da indústria mineral.

Da mesma forma que o cenário da escala produtiva da indústria mineral está sendo modificado, os critérios considerados pela sociedade para conceder o direito de minerar estão cada vez mais embasados em princípios de eco eficiência. Já não basta apenas garantir o fornecimento de materiais e geração de renda, a atividade de mineração também deve ter uma visão ambiental.

No caso da mineração de ferro, primeira etapa da cadeia de produção do aço, o cenário já descrito é agravado pelo aumento da proporção de minerais com baixo teor deste metal nos recursos minerais atualmente aproveitados. Na maioria dos empreendimentos minerais, aqueles que não possuem na sua composição o elemento químico de interesse ou que não são tecnologicamente processáveis, conhecidos como rejeito, são dispostos em barragens que caracterizam-se como um passivo ambiental.

No processamento do minério de ferro são gerados dois tipos de rejeitos. O primeiro, denominado lama, é composto por partículas relativamente finas que são separadas do processo produtivo por dificultarem a seletividade na etapa de concentração (MAPA, 2006). O segundo, denominado de rejeito arenoso, é composto por partículas ricas em

dióxido de silício que são separadas das partículas ricas em ferro por algum processo de concentração.

Segundo GUIMARÃES (2011), o aumento do volume de rejeitos gerados nas atividades mineradoras, promovido pelo aproveitamento crescente de recursos com menor teor metálico, demanda a construção de barragens cada vez maiores para a contenção dos rejeitos.

Entretanto, segundo PEIXOTO (2012), a obtenção de licenças no mundo para a construção ou alteamento de novas barragens de contenção desses resíduos tem-se tornado um processo lento e complexo devido às dificuldades crescentes de disponibilidade de novas áreas para a disposição de rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento dos minérios. Associado a isto há escassez de grandes volumes de água e preocupações relacionadas à preservação do meio ambiente.

Neste contexto, empresas sustentáveis buscam a avaliação de novas formas de desaguamento e disposição dos resíduos minerais. Segundo PEIXOTO (2012), as técnicas focadas no desaguamento dos rejeitos constituem as opções mais interessantes e mais promissoras no cenário atual da mineração no Brasil e no mundo.

## **2 OBJETIVOS**

Avaliar, em escala laboratorial, novas configurações de processo na etapa de espessamento e a aplicabilidade da filtração dos rejeitos gerados pela etapa de concentração do minério de ferro nos concentradores 1 e 2 da Samarco Mineração S/A, com o foco na maximização do seu desaguamento.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realização de testes de sedimentação com os rejeitos para a determinação da melhor configuração que maximize a concentração de sólidos no fluxo de espessado;
- Realização de testes de filtração para determinação da umidade residual mínima na torta dos rejeitos e produtividade que permita implantação da solução em escala industrial.

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 O minério de ferro

O ferro é um elemento químico relativamente pesado com uma massa atômica de 55,845u originado a partir de reações de nucleossíntese estelar. É o quarto elemento químico mais abundante na crosta terrestre e é classificado como um metal de transição. Seu aspecto é brilhante e metálico, com um tom cinzento prateado.

Na natureza, o ferro é raramente encontrado na forma elementar. Neste estado, é possível encontrá-lo apenas na composição de meteoritos, basaltos da ilha Disko na Groelândia e sedimentos carbonáceos do Missouri nos Estados Unidos (TURRER, 2007).

Segundo YELLISHETTY e MUDD (2014), mais de 300 minerais contêm ferro, mas cinco deles são as principais fontes de minério de ferro: magnetita, hematita, goethita, siderita e pirita.

Os depósitos de minério de ferro foram gerados em um amplo período geológico e em ambientes diversos. CHEMALE JUNIOR e TAKEHARA (2013) classificam os depósitos de minério de ferro, geologicamente, em cinco categorias principais:

- depósitos sedimentares acamadados ou formações ferríferas bandadas (tipos Algoma, Carajás, Lago Superior e Rapitan);
- depósitos relacionados a atividades magmáticas e/ou vulcano-sedimentar;
- depósitos formados por metamorfismo de contato;
- depósitos sedimentares oolíticos e pisolíticos;
- depósitos resultantes de alterações e acúmulo de superfície.

A relação da humanidade com este elemento é histórica e marcante, o que motivou a criação da Idade do Ferro, período onde a humanidade iniciou a metalurgia deste metal.

Os óxidos de ferro têm uma vasta aplicação em vários segmentos como medicina, ciência do solo, pigmentos, produção de aço dentre outros.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), a mina africana de hematita Ngwenya é um exemplo desta antiga relação de dependência dos homens com este recurso. Localizada em Suazilândia, é considerada a mais antiga mina do mundo e foi lavrada no período da idade da pedra por homens que utilizavam a hematita para pintura corporal na cor vermelho ocre.

Destacada das outras várias aplicações é a utilização do minério de ferro como matéria-prima na fabricação do aço. Esta liga metálica constituída basicamente de ferro e carbono tem propriedades mecânicas que a tornam um material ainda insubstituível para diversas aplicações.

O Brasil é o segundo maior produtor de minério de ferro, considerando o teor de ferro contido no minério. A mineração de ferro constitui o mais importante segmento da mineração e da transformação mineral no Brasil em termos econômicos, tanto pelo valor da produção quanto pela contribuição às exportações brasileiras (BRASIL, 2011).

O Brasil é destaque no setor de minério de ferro devido aos altos teores em suas formações. No país, estas reservas estão concentradas nos estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul (JESUS, 2014).

Em Minas Gerais, as reservas e a produção concentram-se na região denominada como Quadrilátero Ferrífero. Segundo ROESER (2010), o Quadrilátero Ferrífero tem uma área de 7.000 km<sup>2</sup> e tem uma estrutura geológica cuja forma se assemelha a um quadrado.

Na região leste do Quadrilátero Ferrífero, está localizado o Complexo Alegria, recurso mineral explorado atualmente pela Samarco Mineração S/A. Segundo ROCHA (2008), no início da década de 90 foram feitas determinações mineralógicas no minério Alegria cujos resultados mostraram que seus principais constituintes são:

- martita, constituinte mais abundante da jazida de Alegria;
- hematita especular, constituinte menos abundante que a hematita porosa, que está associado aos minérios menos aluminosos e menos fosforosos;
- goethita;

- magnetitas em pequenas quantidades;
- quartzo, que é o principal mineral da ganga.

O projeto para o aproveitamento deste corpo mineral tem conceitos tecnológicos inovadores que possibilitaram a transformação do itabirito com baixo teor de ferro em concentrado com um preço competitivo no mercado, onde concorrentes possuem recurso mineral com alto teor de ferro.

No período entre o final da década de 70 e o início da década de 90, a Samarco explorava o minério de ferro de uma mina chamada Germano. Apesar de estarem próximos geograficamente, os minérios de Germano e de Alegria diferenciam-se muito de um para o outro em termos mineralógicos.

Segundo ROSA (2013), o primeiro concentrador de Germano possuía um fluxograma original bastante simples que foi desenvolvido para um minério que, dentre outras vantagens, era bastante fino e pouco resistente à fragmentação.

Ainda segundo ROSA (2013), com a exaustão da Mina de Germano, em 1992, e a entrada dos minérios do Complexo Alegria, a operação do concentrador se deparou com novas dificuldades e, em consequência, foi necessário um reajuste no circuito.

NASCIMENTO (2014) apresenta em seu trabalho a configuração do concentrador 2 da Samarco, que iniciou as operações em 2008, e discorre sobre suas principais características. A Figura 3.1 apresenta um fluxograma simplificado das etapas de concentração deste concentrador.

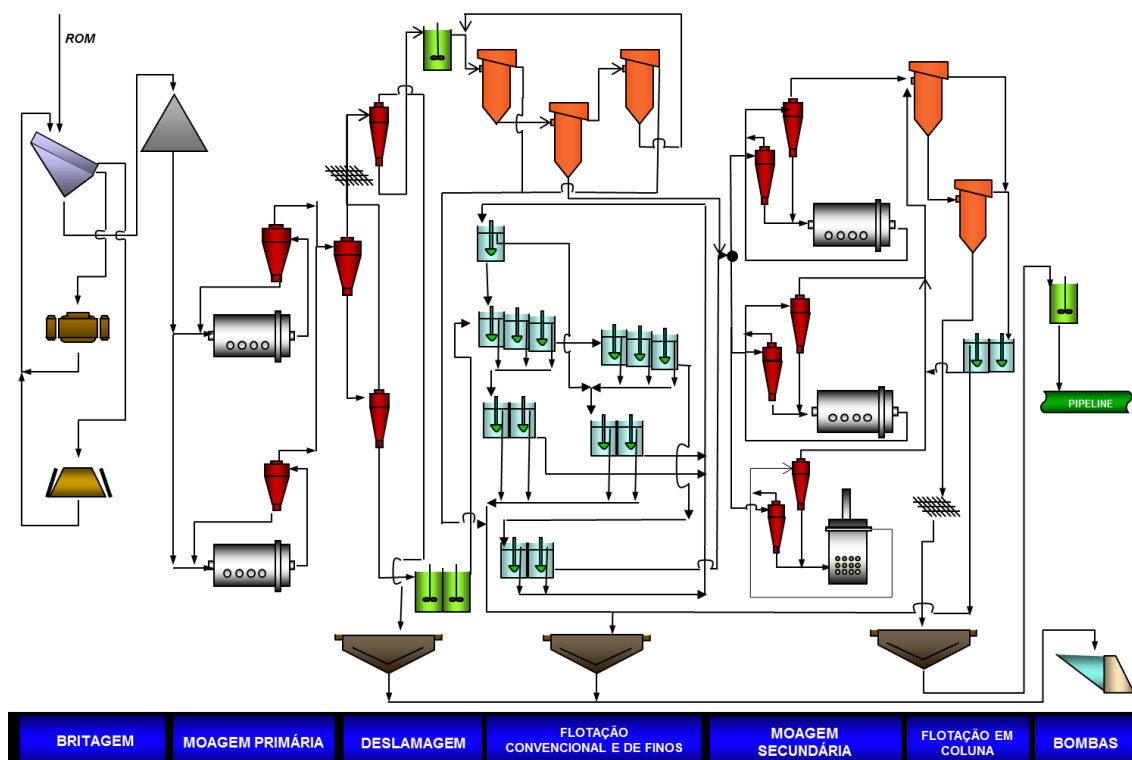


Figura 3.1 - Fluxograma simplificado do Concentrador II da Samarco (NASCIMENTO, 2014).

### 3.2 A concentração de minério de ferro

Geralmente, um bem mineral não pode ser utilizado tal como é lavrado. Quando o seu aproveitamento vai desde a concentração até a extração do metal, por exemplo, a concentração traz vantagens econômicas e energéticas à metalurgia, devido ao descarte de massa de rejeito (LUZ *et al*, 2010).

As operações de concentração, ou separação seletiva de minerais, baseiam-se nas diferenças de propriedades entre os minerais-minério e os minerais de ganga. As propriedades mais comumente exploradas, desde que os minerais estejam fisicamente liberados, são: a cor, o peso específico, a forma, o tamanho, a susceptibilidade magnética e as características de superfície (MAPA, 2006).

No caso específico do minério de ferro, a escolha do processo de concentração depende de vários fatores, como o teor do minério e o teor do concentrado que se deseja obter, composição química e mineralógica do minério, malha de liberação, tamanho de grão, fatores econômicos e efeitos em etapas posteriores como a pelletização (LOPES, 2009).

A flotação é um processo de separação de minerais, que é conduzido em meio aquoso e na presença de bolhas de ar. Neste caso, partículas cuja superfície é hidrofóbica, tendem a aderir às bolhas de ar e flutuar. De maneira oposta, partículas em que as superfícies exibem afinidade pela água, chamadas hidrofílicas, tendem a afundar. A modulação das propriedades interfaciais dos minerais que compõem um determinado sistema, seja através da indução do caráter hidrofóbico ou reforço do caráter hidrofílico, se dá através do uso de reagentes químicos, que permitem a realização de uma separação que atende, tanto aos requisitos de qualidade quanto de quantidade (MARTINS *et al*, 2012).

O desenvolvimento da indústria mineral nas últimas décadas não teria sido possível sem a aplicação intensa da flotação, devido essencialmente à redução das reservas de alto teor e ao aumento da demanda mundial por metais e por outros bens minerais. (MARIA *et al*; 2010).

Segundo OLIVEIRA e AQUINO (2005), os processos físicos tradicionais, gravíticos, magnéticos e eletrostáticos, em grande parte baseados nas propriedades naturais dos minerais, não teriam possibilitado a escala de produção necessária dos metais básicos - cobre, chumbo, zinco e níquel - a partir dos de minérios complexos. Também não teria sido possível a produção atual dos metais nobres, nem a produção do fosfato necessário ao desenvolvimento da agricultura. Até mesmo grande parte da produção mundial de minério de ferro, necessário à produção de aço nos níveis de consumo atual, só se tornou possível nas últimas décadas com a utilização, em larga escala, do processo de flotação.

O processo de flotação por espumas é a modalidade de flotação mais utilizada na tecnologia mineral. Segundo BERALDO (1983) *apud* CHAVES *et al* (2010), os processos típicos de flotação são:

- flotação direta - quando os minerais de interesse são flotados e separados nas espumas. Os minerais de ganga acompanham o fluxo da polpa mineral;
- flotação reversa - quando os minerais de ganga são flotados e os minerais de interesse permanecem na polpa mineral;

- flotação coletiva - quando um grupo de minerais com características semelhantes são flotados em conjunto;

- flotação seletiva - é quando uma única espécie mineral é flotada;

- flotação instantânea (*flash flotation*) - é quando a flotação é realizada em intervalos de tempo curto, logo após a moagem. As partículas mistas (não liberadas) retornam ao moinho para uma nova etapa de moagem e, a seguir, são novamente flotadas.

As operações diretamente envolvidas na flotação de minérios são:

(i) condicionamento;

(ii) dosagem e adição de reagentes;

(iii) flotação propriamente dita.

Algumas outras operações se fazem necessárias, com muita frequência, tais como :

(i) adensamento das polpas para permitir o condicionamento;

(ii) atrição (*scrubbing*) da superfície das partículas para remover coberturas de lama ou de óxidos;

(iii) transporte de polpas e espumas;

(iv) instrumentação e controle do processo.

Na concentração do minério de ferro a prática comum é fazer o que se chama flotação reversa, que consiste em flotar o mineral de quartzo e deprimir a hematita. Isto deve a hematita ser mais abundante, o que dificulta a sua remoção na espuma, além do fato de que a hematita é pesada e teria que ser moída mais finamente para poder flutuar com a espuma (CHAVES *et al*, 2010).

Na flotação, as perdas dos minerais de interesse ocorrem principalmente nas frações de granulometria grossa e fina. A coluna possibilita a geração de bolhas com tamanho controlado e diâmetros inferiores aos da célula mecânica (CHAVES *et al*, 2010).

A maior área superficial de bolhas obtida na coluna permite um aumento da probabilidade de colisão entre as partículas minerais e as bolhas de ar, maximizando, assim, a recuperação das partículas finas na fração flotada. Outro fator importante no aumento de recuperação das partículas finas é o tempo de residência efetivo da bolha na coluna, uma vez que as bolhas são geradas em sua base e têm que percorrer todo o comprimento da seção de recuperação. (CHAVES *et al* , 2010).

A coluna de flotação é capaz de produzir um produto com teor mais elevado que as células mecânicas. Esse aumento no teor é devido aos seguintes fatores :

- (i) o regime não é turbulento na interface polpa-espuma o que diminui o arraste das partículas hidrofílicas da região de coleta para a de limpeza;
- (ii) a maior altura da camada de espuma apresenta um maior efeito de filtro das partículas hidrofílicas arrastadas pelas bolhas de ar;
- (iii) a utilização de água de lavagem minimiza a quantidade de partículas hidrofílicas arrastadas da seção de coleta para a de limpeza pela substituição da água de processo contida na polpa de alimentação.

Essa ação de limpeza é uma das principais razões para a utilização da coluna, principalmente nas etapas *cleaner* de diferentes circuitos de concentração mineral (CHAVES *et al*, 2010).

Para uma mesma capacidade, os circuitos industriais que utilizam colunas de flotação têm menor custo de investimento se comparada com as células mecânicas devido, essencialmente:

- (i) ao menor número de etapas de limpeza;

- (ii) a ausência de partes móveis na coluna e menor número de equipamentos de transporte;
- (iii) a menor quantidade de pontos de controle;
- (iv) a menor área de piso.

As colunas apresentam um menor custo de operação devido à ausência de peças móveis, menor potência instalada e custo de manutenção mais baixo. A obtenção de produtos com teor mais elevado do elemento de interesse contribui para a redução nos custos de transporte e de tratamento além da redução do nível de impurezas do concentrado. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de um circuito tradicional de flotação de minério de ferro (CHAVES *et al*, 2010).

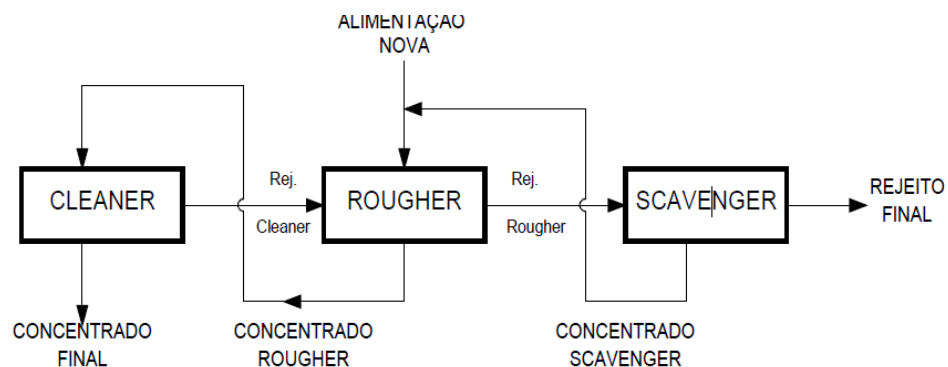


Figura 3.2: Esquema de um circuito tradicional de flotação de minério de ferro (CHAVES *et al*, 2010).

Segundo FILIPPOV *et al* (2014), a importância de uma etapa de deslamagem antes da flotação reversa catiônica foi reportada em 1947. Uma grande quantidade de ultrafinos demandará uma maior quantidade de coletores catiônicos e reduzirá a seletividade.

Os depósitos de minérios de ferro brasileiros contêm regiões altamente decompostas por ação do intemperismo, o que justifica grandes participações de partículas minerais finas. Além dos finos naturais, típicos em itabiritos friáveis, ocorre a geração de partículas finas durante as operações de lavra e processos de cominuição (FERREIRA, 2002).

SOUZA JR. (1994) *apud* MAPA (2006), estudando a influência da presença de lamas na flotação de minérios de ferro, verificou que quanto menor a recuperação metálica na deslamagem, isto é, quanto maior a perda de minerais de ferro e argilominerais

ultrafinos na deslamagem, maiores foram os valores de recuperação metálica na flotação. Menores percentuais de lama também implicavam em um menor teor de sílica no concentrado.

ARAÚJO (1982) *apud* MAPA (2006), estudando a influência do efeito de “*slimes coating*” na flotabilidade de partículas de quartzo e hematita, observou que a mineralogia da lama influencia a flotação. Lamas constituídas basicamente por caolinitas afetam menos a flotabilidade do quartzo com etermonoaminas do que lamas naturais de minérios de ferro, constituídas por uma mistura de diversos minerais, tais como: goethita, hematita, caolinita e gibbsita.

SANTOS e BRANDÃO (2003), realizando a caracterização mineralógica de amostras provenientes da mina de Alegria, observaram que a hematita martítica apresenta porosidade variada e pode conter goethita terrosa em seus poros. Esse material é de difícil remoção devido ao pequeno tamanho dos poros. Nas amostras estudadas, a goethita terrosa apresentou variações quanto a sua forma de ocorrência (intergranular e intragranular) e mostrou teores de  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$  variáveis. Esse material terroso e friável produz uma grande quantidade de finos durante as etapas do processamento mineral.

Com isso, concluíram que sua presença constante e seus valores relativamente altos podem influenciar na composição química dos concentrados finais correspondentes. LIMA (2001) *apud* MAPA (2006) estudou a influência do percentual de lama na flotação de minérios de ferro e observou que a quantidade de lama afeta de modo diferente a seletividade de cada amostra testada. Em algumas amostras, um maior percentual de lama afetou somente o teor de fósforo no concentrado. Devido a esses fatos, concluiu que o comportamento na flotação está associado às características químicas, granulométricas e mineralógicas das respectivas lamas.

Segundo a teoria de Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek (DLVO), o grau de estabilidade de um sistema funcionará de acordo com o somatório de forças atrativas de van der Waals e das forças repulsivas atribuídas ao efeito da superposição das duplas camadas elétricas das partículas. Assim, quando a componente correspondente às forças de van der Waals for maior que a componente de repulsão entre as partículas, ocorrerá agregação, e o sistema se tornará termodinamicamente instável. Contrariamente, quando

a repulsão eletrostática prevalecer sobre as forças de van der Waals, haverá dispersão e, em consequência, o sistema permanecerá termodinamicamente estável (PERES; COELHO; ARAUJO, 1980 *apud* MAPA, 2006).

SILVA (1994) *apud* MAPA (2006) afirma que os fenômenos de agregação e dispersão, baseados na teoria DLVO, são atribuídos a fatores que influenciam as características elétricas das partículas de uma polpa. Alguns desses fatores são: adição de eletrólito indiferente, mudanças na concentração dos íons determinadores de potencial (IDP) da polpa e variação da força iônica da solução.

Estudos de SOUZA JR. (1994) *apud* MAPA (2006) mostraram que, para o minério de ferro processado na usina de concentração da Samarco, o grau de dispersão das partículas contidas na lama varia com o pH, ou seja, aumentando-se o pH aumenta-se a estabilidade do sistema.

Esses resultados corroboram as observações de SOUZA JR. (1994) *apud* MAPA (2006), ou seja, que quanto menor a recuperação metálica na deslamagem, isto é, quanto maior a extração de minerais de ferro e argilominerais ultrafinos na deslamagem, maiores os valores de recuperação metálica na flotação e que menores percentuais de lama também implicam em um menor teor de sílica no concentrado.

### **3.3 A disposição de rejeitos gerados a partir da concentração do minério de ferro**

O desenvolvimento sustentável ocorre quando as ações para suprir as necessidades do presente não comprometem a capacidade das novas gerações de suprir suas próprias necessidades.

Segundo YELLISHETY *et al* (2010), a indústria mineral tem dois grandes desafios para se tornar mais sustentável. Primeiro é o gerenciamento sustentável de um recurso natural finito e o segundo é a busca pela excelência no desempenho ambiental, por se tratar de uma atividade de alto consumo energético e com alto impacto ambiental.

Em geral, os rejeitos de mineração são dispostos sob forma de polpa, devido à condição do resíduo constituir o subproduto natural das atividades de concentração dos minérios,

sempre associados a grandes demandas de água. A mistura em forma de polpa é transportada por canaletas ou por tubulações até o sistema de disposição final (PEIXOTO, 2012).

Geralmente, a disposição final dos rejeitos pode ser realizada em cavidades subterrâneas, em ambientes subaquáticos ou, mais comumente, na superfície dos terrenos. Neste caso, a disposição pode ocorrer em reservatórios limitados por diques, em barragens, em empilhamentos drenados ou ainda em cavas exauridas. A prática brasileira tem sido a adoção em larga escala de barragens de múltiplos alteamentos como estruturas de contenção de rejeitos em polpas depositados pelas técnicas de aterro hidráulico (PEIXOTO, 2012).

Na década de 70 foram registradas aproximadamente 35 falhas de barragens no mundo inteiro, resultando, em pelo menos 471 mortes de seres humanos, com um grande dano ambiental associado. Além da problemática ambiental, existe uma tendência mundial à racionalização do uso da água para reduzir assim os custos operacionais, melhorando a eficiência da usina. Uma alternativa que apresenta vantagens significativas, quanto à segurança e outros fatores, seria a utilização de técnicas de disposição a seco, a partir de rejeitos desaguados antes de sua disposição (SOFRÁ *et al*, 2002 *apud* BARREDA, 2012).

Segundo FITTON e ROSHDIEH (2013), a melhor configuração do processo de desaguamento pode variar de um caso para o outro. A filtragem pode ser consideravelmente mais cara do que as diferentes tecnologias de espessamento estudadas. No entanto, se o custo de captação e bombeamento de água for alto, a filtração pode ser mais barata do que o espessamento. Geralmente, quanto mais o terreno for montanhoso mais viável se tornará a filtração.

A Figura 3.3, retirada do trabalho de DAVIES (2011), mostra a tendência de aplicação de tecnologias de desaguamento para rejeitos de mineração. Neste mesmo trabalho o autor apresenta em um esquema os diferentes estados nos quais é possível encontrar os resíduos e aponta para o limite de bombeamento, importante no dimensionamento de sistemas de desaguamento, conforme apresentado na Figura 3.4.

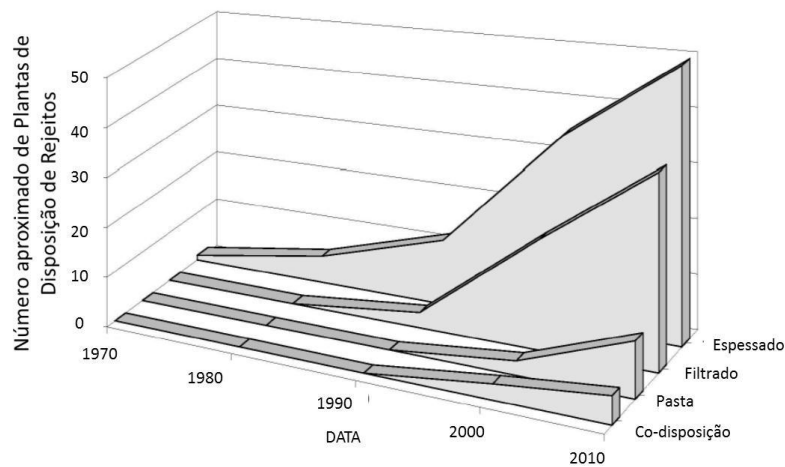


Figura 3.3: Histórico das formas de disposição dos rejeitos da mineração (Adaptado de DAVIES, 2011).

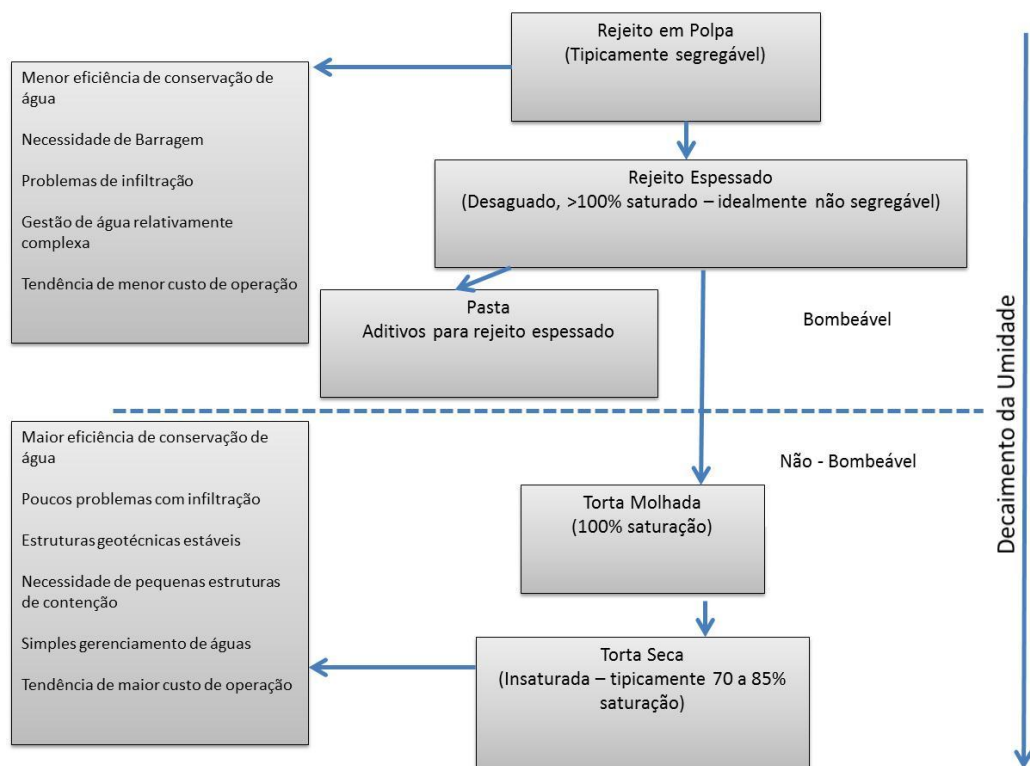


Figura 3.4: A relação dos níveis de desaguamento e limites de escoamento da polpa (Adaptado de DAVIES, 2011).

GÖRRES e PALMER (2013), alertam que enquanto a recuperação de água pode ser importante, e em alguns casos limitante, a seleção tecnológica para o desaguamento dos

rejeitos deve considerar também a metodologia de disposição e os requerimentos geotécnicos.

Segundo PORTES (2013), os parâmetros de resistência ao cisalhamento e permeabilidade dos rejeitos de minério de ferro com menor índice de vazios possibilitam a construção segura de estruturas geotécnicas para os resíduos de minério de ferro desaguados. Neste trabalho, a autora comparou a área e o volume ocupados por três diferentes formas de disposição de rejeitos de minério de ferro: barragem convencional, rejeito ciclonado e rejeitos filtrados. A Figura 3.5 apresenta a economia de área com o desaguamento do rejeito de minério de ferro.

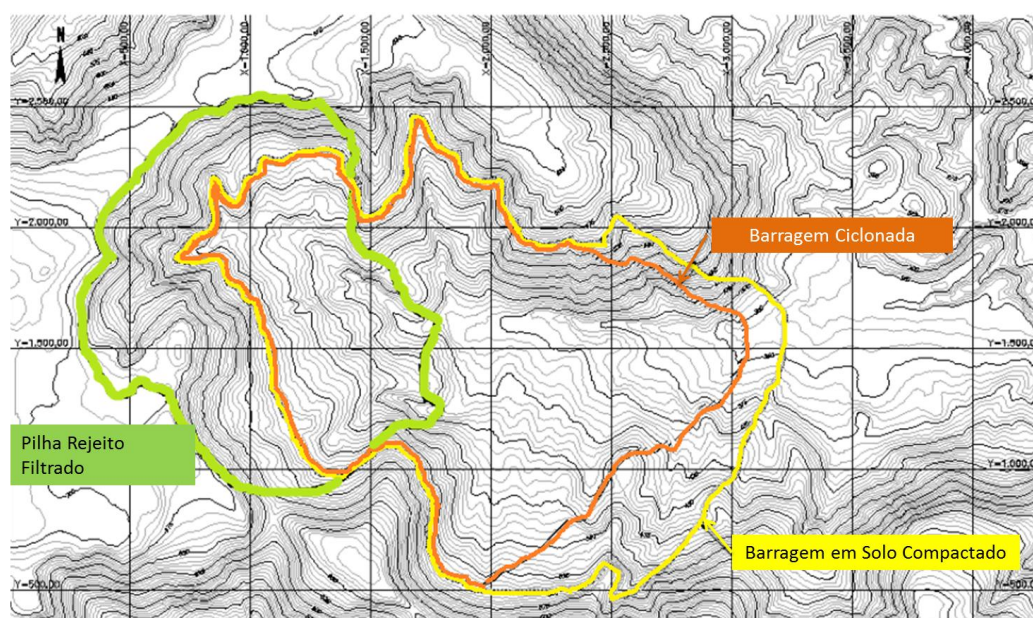


Figura 3.5: Comparativo em relação a área ocupada para três formas de disposição de rejeito de minério de ferro (Adaptado de PORTES, 2013).

A filtragem de rejeitos é uma prática comum nas minerações desérticas, por exemplo, no deserto de Atacama (Chile), para reduzir as perdas de água devido a sua escassez na região, conforme a Figura 3.6. Na disposição de rejeitos após filtragem é necessário o uso de caminhões ou transportadores de correia para o seu transporte e empilhamento e possivelmente de tratores para espalhá-los (GUIMARÃES, 2011).



Figura 3.6: Disposição de rejeito filtrado em Mantos Blancos (Chile) (VALE, 2009 *apud* GUIMARÃES, 2011).

Na mina de ouro de La Coipa (Chile), todo o rejeito do beneficiamento é filtrado para maximização da recuperação de água e é então transportado por correia transportadora até a área de empilhamento. Os rejeitos filtrados, com 20% de umidade, são transportados a uma distância de 1.700 metros por correias transportadoras fixas até a área de depósito onde são empilhadas por um sistema decorreias móveis de 500 metros de comprimento (GUIMARÃES, 2011).

Segundo HORE (2014), a mineradora de ferro Karara Mining, localizada no oeste australiano, optou pela filtragem dos rejeitos devido à escassez de água da região. Nesta empresa há um sistema para o empilhamento do rejeito em conjunto com os materiais considerado estéreis.

A Figura 3.7 apresenta a codisposição na mina da Karara Mining.



Figura 3.7. Co-disposição de rejeito e estéril na planta da Karara Mining (LUPPNOW, 2014).

### 3.4 O uso da água na mineração

Segundo a Agencia Nacional de Águas ANA (2006), o empreendimento minerário destaca-se, dentre todos os outros setores consumidores de água, pela sua significativa interação com os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Essa interação reverte-se de um olhar cuidadoso, considerando-se as características intrínsecas à atividade minerária, como a rigidez locacional e o caráter ainda insubstituível da grande maioria dos bens minerais para a manutenção da qualidade de vida da população, vis-à-vis à consideração de que a água é elemento indispensável à vida,

É comum, nas usinas com conceitos modernos, a prática de obtenção de água reciclada com as características físicas e químicas compatíveis com o processo, a fim de assegurar o controle da operação. Com efeito, os fluxogramas para reciclagem de água variam muito, dependendo do tipo de minério. Segundo LUZ *et al* (2010), de uma maneira geral, são levados em conta os seguintes fatores:

- i. limitada disponibilidade de água nova, devido à localização da usina ou de restrições ambientais;
- ii. custo elevado do tratamento da água para devolvê-la ao meio ambiente;
- iii. redução dos custos operacionais e com a recuperação de reagentes residuais;
- iv. possível redução de custo no bombeamento da água nova de longas distâncias;
- v. remoção de sólidos residuais da água, processo mais utilizado na mineração brasileira;
- vi. cumprimento das exigências legais do meio ambiente.

Segundo GUNSON *et al* (2012), uma série de esforços têm sido feitos para quantificar e entender o uso da água na mineração como foco na análise do ciclo de vida. Há uma série de ações que podem ser feitas para aumentar a eficiência do uso da água que inclui a recirculação da água e desta forma reduzindo a evaporação e a redução da água contida nos concentrados e rejeitos.

Os sistemas de desaguamento consideram dois conceitos básicos. O primeiro é que todo o processo deve ser dimensionado para atingir o produto com a mais alta concentração

de sólidos e o segundo ponto é que a água recirculada deve atender a especificação de qualidade mínima para retornar ao processo. No trabalho de GUNSON *et al* (2012) os autores avaliam seis exemplos e demonstram os ganhos que podem ser obtidos com a implementação destes sistemas de desaguamento.

As plantas industriais da Samarco Mineração contam com tratamento total de esgoto e efluentes industriais e possuem mecanismos de reuso de água, para controlar a pegada hídrica. A empresa mantém nos últimos anos um índice de reutilização de mais de 90% da água, nas usinas de concentração. O restante é tratado antes de ser lançado, em conformidade com os padrões e exigências legais, na Lagoa de Mãe-Bá em Anchieta (ES) ou nos córregos próximos à unidade de Germano (MG). Ações de controle de qualidade da água, preservação de mananciais e manutenção dos reservatórios também fazem parte do trabalho (SAMARCO, 2014).

Segundo LUZ *et al* (2010), a água é o meio de transporte mais utilizado no processamento mineral. Assim, o líquido é usado de forma intensa como meio de transporte nas mais variadas operações, tais como:

- i. na lavra como desmonte hidráulico;
- ii. na lavagem de minérios;
- iii. nos processos de concentração a úmido;
- iv. nos minerodutos.

### **3.5 Tecnologias de separação sólido líquido**

A separação sólido - líquido é um conjunto de operações que possibilitam a separação das fases sólida e líquida e está inserida no grupo de tecnologias de separação. Segundo SVAROVSKY (2000), estas operações estão presentes na maioria dos processos químicos e podem ser aplicadas em processos que buscam o líquido, o sólido ou ambos.

No processamento mineral, a separação sólido-líquido tem diversas aplicações e entre elas se destacam: o desaguamento de concentrado obtido por rotas de processamento a

úmido, o desaguamento de rejeitos minerais e a recuperações de metais solubilizados nos processos hidrometalúrgicos.

A separação das fases sólida e líquida só é possível devido aos diferentes comportamentos destas fases quando expostas a certos fenômenos físicos. Os métodos de separação atuais baseiam-se na diferença de densidade e de compressibilidade entre as fases e na diferença de temperatura de transformação de fases das substâncias químicas.

Geralmente, no processamento mineral, a densidade da fase sólida é bem superior – no mínimo o dobro - à densidade da fase líquida. Quando estas fases de uma suspensão são expostas a uma aceleração, de gravidade ou de centrifugação, por exemplo, responderão de forma distinta à esta força e isto fará com que estejam em diferentes locais após algum tempo.

Se a suspensão for forçada a passar por um meio poroso, a fase sólida, por ser incompreensível nos níveis de pressão destes equipamentos, apenas transpassará se for menor que o poro deste meio poroso. Já a fase líquida demandará um esforço relativamente menor para permear o meio se comparado com o sólido.

Na maioria dos casos, as fases sólida e líquida de uma suspensão são formadas por substâncias químicas diferentes. Como a quantidade de energia para ocorrer a transformação de fase varia de substância para substância e a da entropia da sua fase física, quando se expõe uma suspensão à alta temperatura, a fase líquida se transformará em fase gasosa primeiro e se separará da fase sólida que ainda não se transformou.

Observam-se grandes diferenças de demanda energética de uma tecnologia para outra. METSO MINERALS (2006) *apud* FRANÇA *et al* (2010), apresentam a relação entre a quantidade de energia e demanda energética para desaguar suspensões com partículas de diferentes tamanhos mostrada na Figura 3.8.

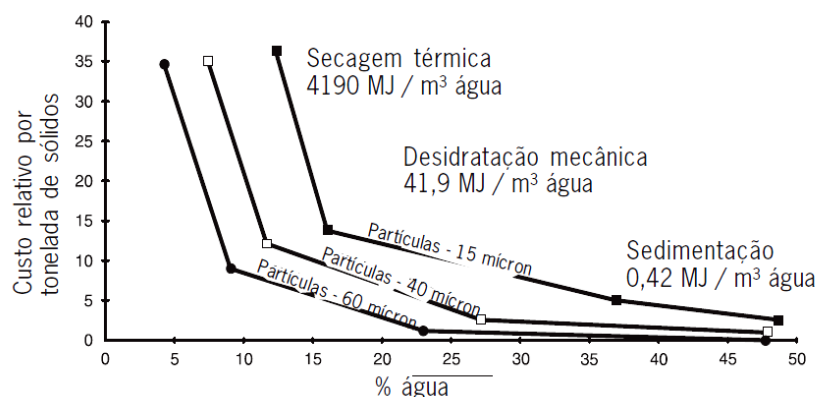


Figura 3.8: Relação entre tecnologia de desaguamento e custo energético específico (METSO MINERALS, 2006 *apud* FRANÇA *et al.*, 2010).

O que se observa é uma diferença grande no consumo energético específico entre os métodos de separação sólido-líquido. Se fosse tecnologicamente possível, o ideal seria desaguar por diferença de densidade. Entretanto, verifica-se usualmente na operação de espessadores (sedimentação) o máximo de 25% de água em massa após o desaguamento.

Hoje, devido à composição mineralógica e granulométrica do minério de ferro utilizado como *pellet feed*, o processo de aglomeração demanda uma proporção de água de 9,5% a 10,5% em massa, inatingível através de métodos por diferença de densidade convencionais.

Para atingir os níveis de umidade são necessários filtros – desidratação mecânica – método de separação sólido-líquido que demanda uma quantidade de energia intermediária entre a sedimentação e secagem.

### 3.5.1 Espessamento

O espessamento é uma operação unitária de separação sólido-líquido baseada na velocidade de sedimentação das partículas em um meio aquoso pela ação da gravidade, com o objetivo principal de gerar uma polpa (*underflow*) mais densa.

Os espessadores constituem-se por uma parte cilíndrica e uma parte cônica no fundo. São alimentados pelo centro, onde as partículas mais densas sedimentam mais rapidamente e as menos densas, mais lentamente. As partículas sedimentadas são

recolhidas no ápice da parte cônica e são chamadas de “*underflow*”, enquanto o líquido clarificado é chamado de “*overflow*” (GUIMARÃES, 2010). Estes fluxos estão apresentados na Figura 3.9.

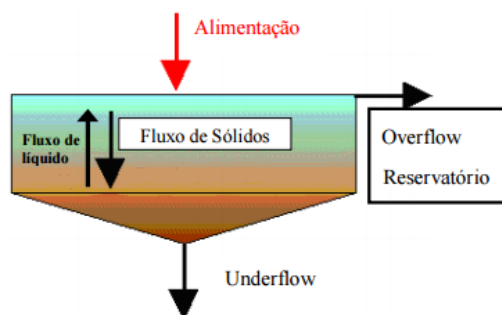


Figura 3.9: Fluxo Esquemático de Espessadores (GUIMARÃES, 2010).

Na indústria da mineração, os espessadores são largamente utilizados para as seguintes finalidades (FRANÇA *et al*, 2010):

- i. obtenção de polpas com concentrações adequadas a um determinado processo subsequente; exemplo: elevação da percentagem de sólidos de uma polpa de minério de ferro, de 45 para 70%, para ser bombeada através de um mineroduto;
- ii. espessamento de rejeitos com concentração de sólidos elevada, visando transporte e descarte mais eficazes. Aqui são chamados de espessadores de rejeito;
- iii. recuperação de água para reciclo industrial; atualmente, a maioria dos espessadores de concentrado e de rejeito é usada, também, com a finalidade de recuperar o fluxo de sobrenadante, como água de recirculação para o processo de beneficiamento de minérios. Essa aplicação, cada vez mais presente, decorre da aplicação dos conceitos de sustentabilidade;
- iv. recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizados em processos hidrometalúrgicos.

Segundo GUIMARÃES (2011), novas aplicações podem ser vislumbradas, como:

- v. maior adensamento das lamas (espessadores *High Density*) ou geração de pasta mineral (espessadores *Deep Cone*) para descarte;

- vi. espessamento de rejeitos de flotação, tendo em vista a eliminação das espumas (para melhorar a condição de bombeamento) ou
- vii. a adequação da concentração de sólidos para a filtragem do material (permitindo o seu descarte por empilhamento).

Os primeiros estudos teóricos sobre espessamento foram conduzidos por Coe e Clevenger em 1916. Estes estudos foram refinados por Kynch em 1952 e Talmadge e Fitch em 1955. Porém apenas em 1981 que Wilhelm e Naide conseguiram introduzir o mecanismo do *rake* nos procedimentos laboratoriais.

GUIMARÃES (2010) concluiu em seu trabalho que os fatores de segurança e *scale-up* utilizados nos métodos de Coe e Clevenger, Oltmann e Talmadge e Fitch para o dimensionamento de espessadores se ajustam bem para os modelos industriais. O autor descreve detalhadamente os principais métodos de dimensionamento de espessador em seu trabalho.

Comumente se usa o termo clarificação para se referir à operação onde a sedimentação das partículas é empregada com o objetivo principal de produzir um líquido clarificado (isento de sólidos). Por outro lado, espessamento tem como objetivo principal a geração de uma polpa adensada (GUIMARÃES, 2011).

Os tipos de equipamentos existentes para espessamento de polpas variam de acordo com a sua geometria. A escolha do espessador depende principalmente das características do material e do nível de adensamento desejado no *underflow* (GUIMARÃES, 2011).

Os tipos de espessadores normalmente aplicados na etapa de adensamento de polpas de minério de ferro são apresentados na Figura 3.10. Para as lamelas de minério de ferro, pode-se conseguir polpas mais adensadas ou mesmo pasta mineral, com a escolha de espessadores tipo *High Density* ou *Deep Cone*, respectivamente (GUIMARÃES, 2011).

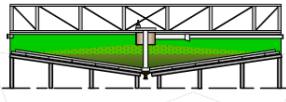
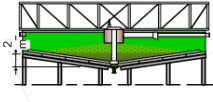
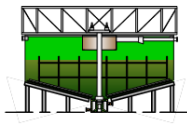

TIPOS	FORMAS	CARACTERÍSTICAS
CONVENCIONAL		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ação ineficiente do floculante;</li> <li>- Grande área;</li> <li>- Baixa densidade no underflow.</li> </ul>
HIGH RATE		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adição de floculante via feed-well (ação eficiente);</li> <li>- Área menor que o Hi Rate</li> <li>- Densidade no underflow similar ao espessador convencional</li> </ul>
HIGH DENSITY		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altura maior que o High Capacity</li> <li>- Redução da área em relação ao High Capacity;</li> <li>- Máxima densidade da polpa no underflow.</li> </ul>
DEEP CONE		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento da altura em relação ao High Density;</li> <li>- Maior redução de área</li> <li>- Produção de pasta mineral.</li> </ul>

Figura 3.10: Tecnologias de espessamento atuais (adaptado de DORR OLIVER EIMCO, 2004).

### 3.5.2 Filtragem

A filtragem ou filtração é definida como a separação de sólidos contidos em uma suspensão através de um meio filtrante – meio poroso - que retém os sólidos e que permite a percolação da fase líquida.

Para que ocorra a separação entre as fases líquida e sólida é necessária a ação de uma força que promova o deslocamento da suspensão até o meio filtrante que fará a separação. No estado tecnológico atual, são utilizadas as seguintes soluções na prática:

- promove-se uma diferença de pressão da atmosfera entre a superfície da suspensão a ser filtrada e o da parte interna do meio filtrante. O sistema desequilibrado fará com que o ar busque a região de menor pressão (região interna), deslocando com ele a suspensão que está no caminho desta trajetória;
- promove-se uma diferença de pressão na própria suspensão, suficiente para movimentá-la em direção à barreira física (meio filtrante).

### 3.5.2.1 Filtros a Vácuo

Os filtros a vácuo de tambor, disco ou correia operam sob o mesmo princípio físico. De acordo com este princípio, a diferença de pressão entre o tanque de polpa e a superfície do meio filtrante é instituída por meio de um sistema de vácuo, permitindo a passagem do líquido através do meio filtrante, enquanto as partículas são retidas nesse meio, formando a torta de filtração (FRANÇA *et al*, 2010).

A operação do filtro rotativo a vácuo caracteriza-se por produzir tortas secas de pequena espessura (inferior a 1 cm) e operar continuamente e sob queda de pressão reduzida (inferior a 0,8 atm). A filtração é realizada sobre o meio filtrante que recobre a superfície cilíndrica do equipamento, que pode ser um tambor ou discos (FRANÇA *et al*, 2010).

Os filtros horizontais de correia caracterizam-se pela alimentação direta da polpa sobre o elemento filtrante (alimentação por cima) e pelo vácuo aplicado na sua parte inferior (no mesmo sentido da força gravitacional). O aspecto visual é de um transportador de correia, sendo que o tapete de correia serve de suporte para a instalação do elemento filtrante conforme apresentado na Figura 3.11. A polpa é alimentada numa extremidade do transportador e, no percurso até o ponto de descarga, é desaguada (GUIMARÃES, 2011).

Se necessário, pode ser utilizado um ou mais estágios de lavagem da torta (raramente aplicada na mineração) ao longo do comprimento da correia. Uma série de *sprays* de água é instalada na parte inferior da correia com o objetivo de limpar o meio filtrante (GUIMARÃES, 2011).

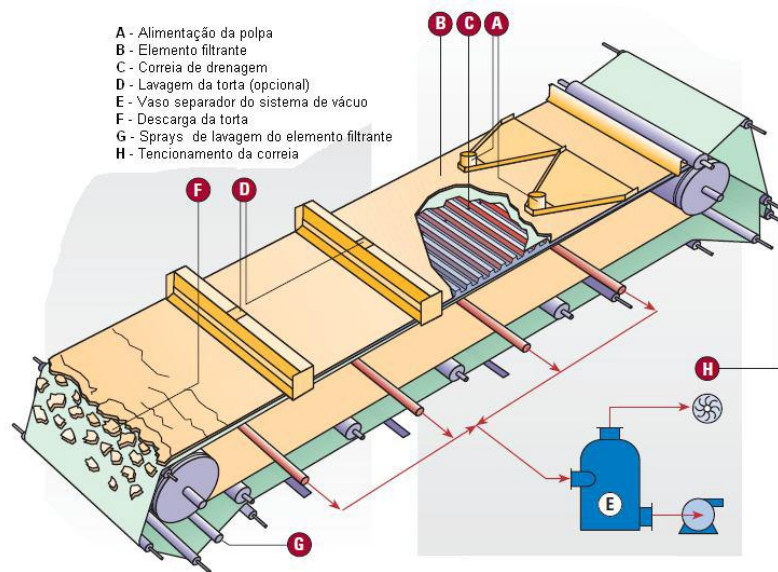


Figura 3.11: Principais partes do filtro tipo esteira (FLSMIDTH MINERALS, 2008 apud GUIMARÃES, 2011).

A correia é desenhada com ranhuras e furos que permitem a ação do vácuo que atua abaixo da correia. O filtrado atravessa a correia e é conduzido por tubulações para o vaso separador, que está interligado à bomba de vácuo e ao tanque de filtrado (GUIMARÃES, 2011).

O equipamento é mais apropriado para polpas com minérios de granulometria mais grosseira. É o caso da filtragem do produto *sinter feed*, no beneficiamento do minério de ferro (GUIMARÃES, 2011).

### 3.5.2.2 Filtros a Pressão

Nos filtros a pressão é gerado um aumento da pressão da suspensão situada inicialmente na região externa da barreira física através de uma bomba e de uma prensagem mecânica. Na busca por equilíbrio, a suspensão tenderá a atravessar a barreira física. Além dessa ação, promove-se um aumento da pressão do ar na região externa à barreira e que, pelo mesmo motivo, tenderá a atravessar a barreira física juntamente com a suspensão.

Esta diferença de pressão tem um impacto na produtividade do filtro. A equação 3.1, derivada da equação de Darcy, mostra a relação entre produtividade (Y) de um filtro e este diferencial de pressão:

$$Y = \left[ \frac{2 \Delta p f c}{\alpha \mu t_c} \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

Onde:

$\Delta p$  é a diferença de pressão

$c$  é a concentração de sólidos

$\alpha$  é a resistência específica da torta

$\mu$  é a viscosidade do líquido

$Y$  é a produtividade em  $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$

$f$  é a taxa de filtração para o tempo de ciclo e  $t_c$  é o tempo de ciclo.

Baseado nesta equação e adotando como premissa que todos os fatores ficariam constantes, um aumento de quatro vezes do diferencial de pressão implicaria em uma redução de metade da área de filtração (SVAROVSKY, 2000).

Vale ressaltar a importância da avaliação da relação do aumento da resistência específica da torta com o aumento da pressão. Em materiais em que esta variação é considerável, um aumento de pressão pode acarretar uma diminuição do desempenho do equipamento (SVAROVSKY, 2000).

Sabe-se também que existe um limite de desaguamento por filtro, conforme a Figura 3.8. A água retida nos canais entre as partículas (porosidade interpartículas) e no interior dos poros na superfície (porosidade intrapartículas), geralmente não é separada da fase sólida com a aplicação de pressões dos filtros atuais. Isto se deve à grande força capilar que a retém. Esta água deve ser vaporizada para separá-la da fase sólida.

Esta dificuldade de separação da água contida nos poros está relacionada com o nível de empacotamento das partículas sólidas que ficam retidas no meio filtrante. Se a

distribuição granulométrica favorecer um maior empacotamento das partículas, isso exigirá um maior esforço do filtro para que a fase líquida percole o leito de partículas mais empacotado.

O filtro prensa é considerado como o equipamento de filtração mais universal e facilmente adaptável para as mais diversas aplicações. Esta consideração reflete em inúmeras aplicações deste equipamento, especialmente na indústria, estando disponível para a indústria há mais de cem anos.

O aumento de escala de produção das indústrias, na metade do século XX, incentivou os detentores desta tecnologia a desenvolver filtros prensa com uma operação mais automatizada, especialmente no Japão. O primeiro filtro prensa totalmente automatizado foi da japonesa Kurita em 1959, aplicado na indústria no ano seguinte.

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. Já o tempo mecânico, período não produtivo do filtro, vem sendo minimizado com o passar dos anos, através de automatizações do filtro. Dependendo da aplicação, este tempo mecânico pode chegar a 50% do tempo total do ciclo.

O filtro prensa dito convencional é constituído por um conjunto de placas quadradas ou retangulares perfuradas, montadas em paralelo e no sentido vertical sobre um suporte. As placas são revestidas por um tecido.

As placas possuem uma concavidade na região central de tal forma que, quando estão juntas, formam uma câmara. O sistema de acionamento hidráulico faz com que as placas se afastem ou se aproximem. A Figura 3.12 apresenta as principais partes de um filtro prensa horizontal.

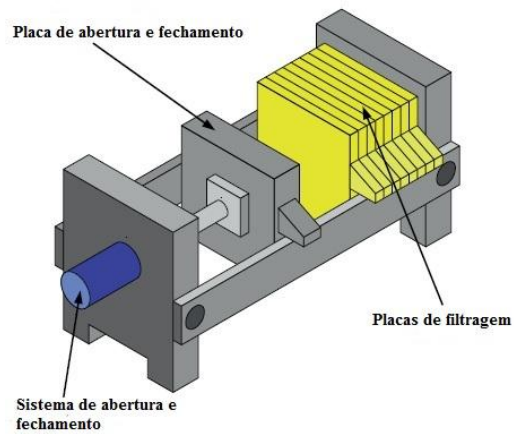


Figura 3.12: Principais partes de um filtro a pressão horizontal (SPARKS, 2012)

O início do ciclo se dá com o fechamento do conjunto de placas. A polpa é injetada a alta pressão através de furos da placa e enchem a câmara. Observa-se, nesta fase de enchimento, a retenção dos sólidos que ficam retidos pelo meio filtrante e a drenagem do filtrado por furos específicos na placa. O ciclo é representado na Figura 3.13.

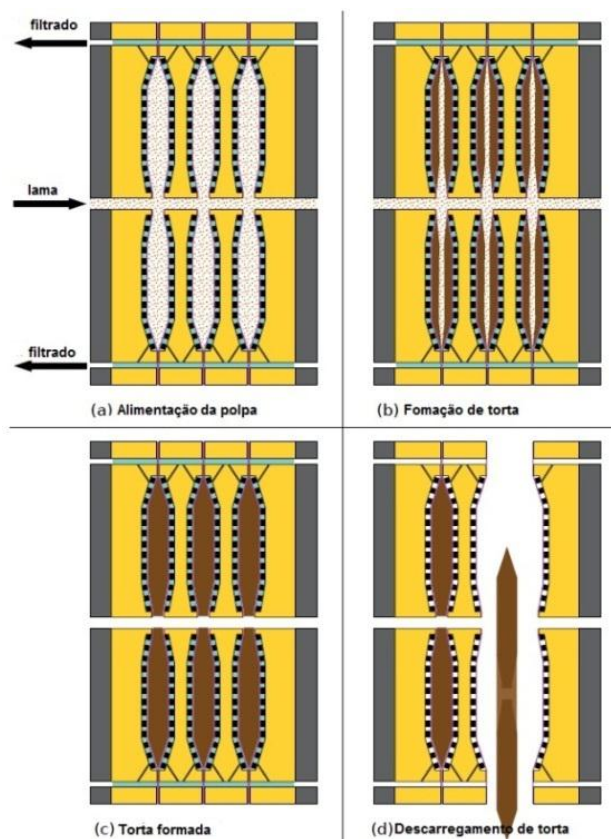


Figura 3.13: Etapas de um ciclo de filtragem em filtro prensa horizontal (SPARKS, 2012)

A pressão e a vazão de enchimento das câmaras devem ser suficientes para a deposição das partículas sólidas ultrafinas no tecido para formar o leito filtrante de partículas (Figura 3.14), garantir que não ocorra diferença de espessura da camada de sólidos formada (torta) e preencher todo o conjunto de câmaras rapidamente. Atualmente opera-se com uma pressão de 7 a 8 bar e a vazão depende do nível de abrasividade e do revestimento do tubo.

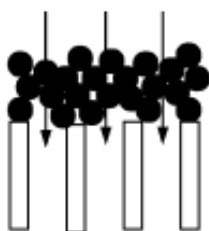


Figura 3.14 - Mecanismo de filtração quando as partículas são menores que os poros do meio filtrante (WAKEMAN, 2007)

Após a formação da torta, injeta-se ar comprimido dentro da câmara de filtração. O ar a alta pressão percolar a torta recém-formada e durante este trajeto ele arrastará líquidos que estavam retidos nos canais formados entre as partículas.

O tempo de cada etapa do ciclo é determinado através da medição da queda de vazão do filtrado. A etapa deve ser encerrada quando a taxa de vazão de filtrado em função do tempo estiver praticamente constante.

Nas versões mais recentes do filtro prensa, além das fases de enchimento e injeção de ar comprimido, o filtro tem um recurso para fazer a prensagem mecânica da torta. O conjunto de placas tem uma membrana entre a placa e o tecido que é inflada ao se injetar um fluido (água ou ar) entre ela e a placa conforme apresentado na Figura 3.15.

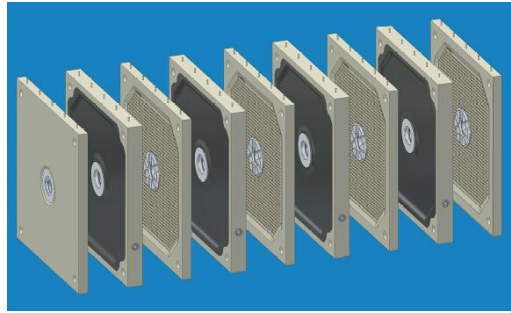


Figura 3.15 - Representação de placas com câmaras (JVK, 2014)

Este recurso diminui o consumo energético, possibilita o alcance de umidades residuais menores na torta e pode aumentar a produtividade ao reduzir o tempo de ciclo.

A Figura 3.16 mostra os benefícios de aplicação das membranas.

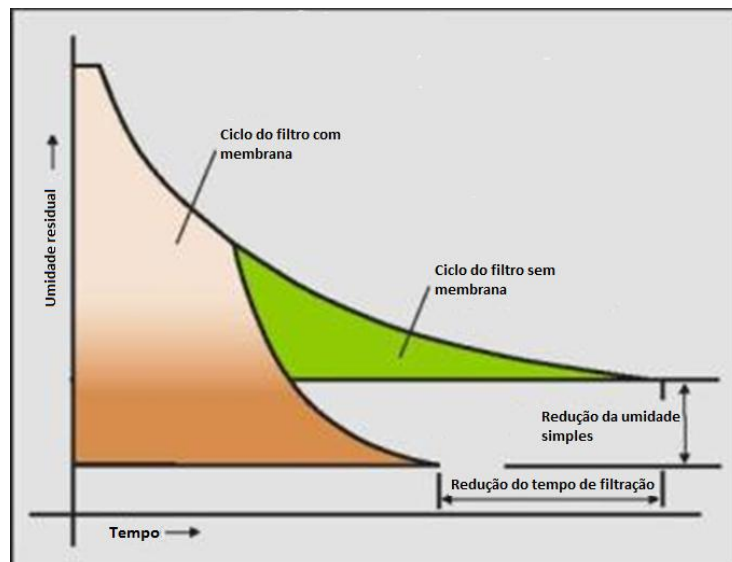


Figura 3.16: Relação entre umidade residual em tempo de ciclo para os dois tipos de filtros prensa (OUTOTEC, 2011)

Além de classificação pela presença ou não de membranas, os filtros prensa se dividem entre *side bar* e *overhead*. O *overhead* (Figura 3.17) foi desenvolvido para uma operação manual mais facilitada e prevê o movimento das placas ao longo de uma viga de suspensão através de rolos para prevenir o balanço das placas durante a movimentação na viga. Isso representa uma vantagem sobre o *side bar* (Figura 3.18), onde nos braços laterais ou alças das placas estão sobre barras laterais. Neste tipo de filtro, o aumento do contato entre o apoio das barras é maior, conseqüentemente o movimento manual fica mais difícil. Entretanto, com a aplicação do sistema de

deslocamento mecânico das placas, esta desvantagem do *side bar* é minimizada (CAPEY, 1997).

A não ser em poucas exceções, o mecanismo de fechamento é feito por um cilíndrico hidráulico que é movido por um sistema motorizado. O aumento da sofisticação se torna necessário à medida que o tamanho e números das placas do filtro aumentam, já que não se pode contar com a intervenção manual. Além disso, há um aumento de pressão para eliminar todas as operações manuais e para evoluir um filtro prensa totalmente automatizado (CAPEY, 1997).

Na prática, pode-se descrever o mais sofisticado filtro prensa como totalmente mecanizado ao invés de totalmente automatizado, já que raramente pode-se deixar o equipamento sem inspeção durante o descarregamento da torta (CAPEY, 1997).



Figura 3.17 - Filtro prensa tipo overhead (ANDRITZ, 2014)



Figura 3.18 - Filtro prensa tipo side bar (ANDRITZ, 2014)

É o meio filtrante que propicia a filtração propriamente dita. É nele que as partículas depositam e formam a barreira que vai permitir apenas a passagem da fase líquida. A escolha do meio filtrante depende do nível de turbidez e concentração de sólidos no

filtrado, produtividade do filtro, teor de umidade residual da torta e o seu custo (SILVA, 2006).

Tecido é constituído por uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume (conjunto de fios dispostos na direção transversal ou vertical) e outro conjunto de fios de trama (conjunto de fios dispostos na direção longitudinal), formando ângulo de 90° (SILVA, 2006).

Ele é caracterizado pela gramatura (peso do tecido por unidade de área), ou seja, quanto maior a gramatura ( $\text{g/m}^2$ ) ou o peso, maior é a resistência física do tecido, mas em compensação, é menor a sua flexibilidade e maior é sua propensão ao cegamento (SILVA, 2006).

Os tecidos sintéticos mais usados na indústria mineral são formados por fibras de polipropileno, poliéster e, principalmente, de poliamida, também conhecida comercialmente como Nylon (SILVA, 2006).

Os esforços mecânicos aos que um tecido está exposto diferem de tecnologia para tecnologia. Um exemplo é a diferença entre o filtro de disco a vácuo e o filtro prensa. Enquanto que no filtro de disco a vácuo o tecido movimenta em sentido contrário nos momentos da formação/secagem e de descarregamento, no filtro prensa ele movimenta apenas no sentido em que o filtrado está sendo drenado.

No caso do filtro prensa, como o descarregamento é feito apenas pela ação da gravidade, o tecido deve garantir um desprendimento da torta. Caso algum material fique retido no tecido, ao iniciar um novo ciclo pode ocorrer um mau fechamento das placas, empenamento e quebra.

### **3.6 Filtragem de rejeitos de minério de ferro**

Conforme CHAVES *et al* (2010) a flotação é a técnica de concentração mais aplicada para concentração de minério de ferro. Esta etapa gera basicamente dois tipos de rejeito. O primeiro rico em  $\text{SiO}_2$  que foi separado do óxido de ferro na própria flotação –

tecnicamente conhecido como rejeito arenoso - e o rejeito nomeado lama, separado antes da flotação.

Estes rejeitos apresentam características físicas, químicas e mineralógicas que impactam no desempenho das etapas de filtração. Uma delas é a granulometria que tem relação com a resistência específica da torta a ser formada.

GUIMARÃES (2011) fez a caracterização de vários rejeitos gerados nos processo de concentração da empresa Vale S/A, entre eles o rejeito rico em sílica e a lama, e determinou os níveis de umidade e produtividade alcançados em várias tecnologias de filtração.

Observa-se a partir da granulometria que a lama apresenta uma proporção de partículas de ultrafinos bem superior às amostras do rejeito arenoso. Tal comportamento, já esperado, é que caracteriza este tipo de rejeito.

Estas diferenças granulométricas implicarão em diferentes graus de empacotamento das partículas na torta. Quanto maior o empacotamento maior será a resistência oferecida à percolação do fluido – água ou ar - pela torta. Uma maior resistência exigirá a aplicação de maiores diferenças de pressão para se atingir os mesmos níveis de umidade e produtividade.

Uma medida indireta desta queda de permeabilidade é a medida da área superficial específica, através de permeabilímetros. No trabalho de GUIMARÃES (2011), as amostras de rejeito arenoso apresentaram uma área superficial específica média de  $500\text{cm}^2/\text{g}$  enquanto que as lamas apresentaram uma área superficial específica média de  $10000\text{cm}^2/\text{g}$ .

Para os rejeito arenosos, que apresentam propriedades que favorecem a filtração, é possível a aplicação de filtros que promovem a separação das fases pela a ação do vácuo. O filtro esteira, bastante aplicado para a filtração de rejeitos de mineração, pode ser uma possível solução.

A Figura 3.19 apresenta os resultados de umidade e produtividade dos rejeitos estudados por GUIMARÃES 2011.

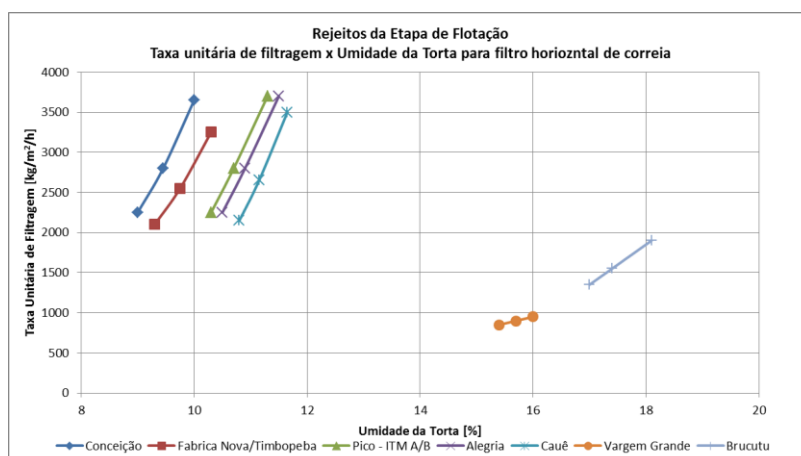


Figura 3.19: Umidade e produtividade - filtração do rejeito arenoso (adaptado de GUIMARÃES, 2011)

Para a lama, mais fina e de difícil filtração, é provável a exigência de aplicação de tecnologias a pressão. A Figura 3.20 apresenta os resultados de umidade e produtividade alcançados pelo filtro horizontal a pressão com os rejeitos tipo lama estudados por GUIMARÃES (2011).

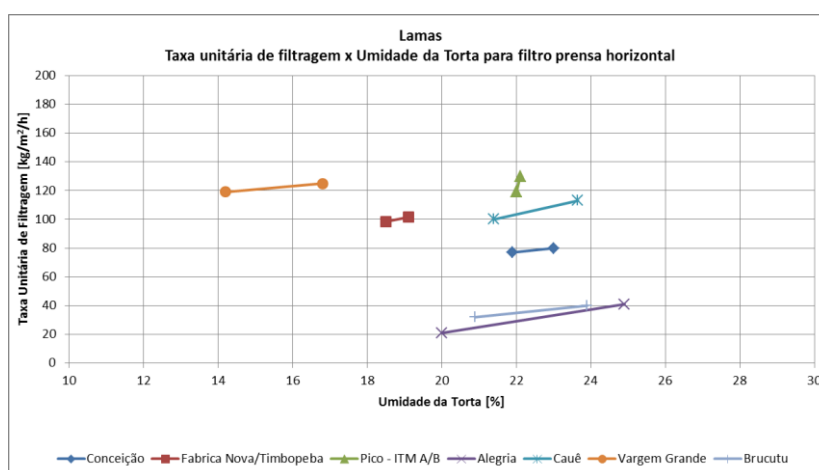


Figura 3.20 - Umidade e produtividade - filtração de lama (adaptado de GUIMARÃES, 2011)

Observe-se, no entanto, que antes da filtração é importante explorar a etapa de sedimentação que apresenta um custo energético muito mais baixo, conforme FRANÇA *et al* (2010).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Amostragem

Para estudo de desaguamento dos rejeitos gerados pela concentração de minério de ferro nos concentradores 1 e 2 da Samarco Mineração S.A., foram realizados testes com o rejeito rico em sílica nomeado arenoso e com rejeito com partículas ultrafinas nomeados de lama.

Os ensaios foram realizados em parceria com o Centro de Tecnologia da empresa FLSmidth do Brasil, localizado em Votorantim SP.

Nos dois concentradores existe uma etapa de espessamento para desaguar as lamas, mas para o rejeito arenoso apenas no concentrador 2 existe esta etapa de desaguamento.

A amostragem foi feita na unidade industrial de Germano localizada no município de Mariana (MG), conforme procedimento interno da empresa, nos pontos descritos a seguir:

- ponto de amostragem 1: alimentação do espessador de lamas do concentrador 1;
- ponto de amostragem 2: *underflow* do espessador de lamas do concentrador 1;
- ponto de amostragem 3: descarga do rejeito arenoso da usina 1;
- ponto de amostragem 4: alimentação do espessador de lamas do concentrador 2;
- ponto de amostragem 5: *underflow* do espessador de lamas do concentrador 2;
- ponto de amostragem 6: alimentação do espessador de rejeito arenoso do concentrador 2;
- ponto de amostragem 7: *underflow* do espessador de rejeito arenoso do concentrador 2.

A amostragem na alimentação e no *underflow* do espessamento possibilita a avaliação e comparação de desempenho das etapas de espessamento e filtração na condição atual e na nova configuração proposta.

## 4.2. Caracterização das Amostras

As amostras coletadas nos sete pontos mencionados anteriormente foram caracterizadas através da sequência de procedimentos descritos a seguir:

- determinação do pH da polpa através de um peagâmetro digital;
- determinação da densidade real do sólido através da relação da massa equivalente a 75% do volume da célula do picnômetro a hélio da marca Quantachrome determinada por uma balança analítica de bancada e o volume referente a esta massa determinada pelo picnômetro;
- determinação da porcentagem de sólidos da polpa através da pesagem em uma balança Marcy. A balança possui uma escala graduada que possibilita relacionar a concentração de sólidos com a massa de polpa quando é conhecida a densidade real do sólido e do líquido;
- determinação da área superficial específica dos sólidos via permeabilímetro de Blaine;
- determinação da curva de distribuição granulométrica dos sólidos através de um granulômetro a laser da marca Mastersizer Hydro 2000 MU de cada amostra;
- determinação da composição química do sólido através do espectrômetro de plasma da marca Rigaku Simultix 14.

## 4.3. Ensaio Tecnológicos

A vazão mássica adotada para os ensaios foi de 200t/h de lama e 600t/h de rejeito arenoso.

Com as amostras dos materiais que não haviam sido espessados, referentes aos pontos de amostragem 1, 3, 4 e 6, foram executados os seguintes procedimentos:

- ajuste do valor de pH da polpa para 10,5, com cal para a polpa de lama e NaOH (50%) para a polpa de rejeito arenoso;
- avaliação de desempenho de flocculantes na sedimentação via proveta de 1 litro, (apresentada na Figura 4.1) através da determinação da velocidade de

sedimentação e avaliação qualitativa da clarificação para diversas dosagens e tipos de floclulantes;

- determinação da concentração de sólidos ótima da polpa para o espessamento via proveta, através da determinação da taxa de sedimentação para diversas dosagens e tipos de floclulantes;
- determinação da máxima concentração de sólidos no *underflow* e determinação da capacidade de espessamento por área em relação a fase sólida (taxa unitária) e em relação a fase líquida (taxa de transbordo) . O dimensionamento foi feito seguindo a metodologia de Wilhelm e Naide, Talmage e Fitch, Coe e Clevenger. Foi considerado sempre o resultado mais conservador.



Figura 4.1– Kit para a avaliação da sedimentação estática.

A escolha da tecnologia de filtragem foi baseada nas propriedades de cada material, especialmente a granulometria, e em resultados obtidos em estudos anteriores. Para o rejeito arenoso, que tem uma tendência de apresentar partículas mais grosseiras na sua composição, foi escolhida a tecnologia de filtro esteira. Para a lama que é constituída por partículas mais finas, foi escolhida a tecnologia do filtro prensa horizontal.

A seleção dos tecidos foi feita através da realização de um ensaio de filtragem do qual são fixados o tipo de material a ser filtrado, a concentração de sólidos e os parâmetros da tecnologia, como a pressão de alimentação e tempo de secagem para o filtro prensa e tempo de formação para o filtro a esteira, e é medido e comparado o desempenho de

cada tecido através da determinação da qualidade do filtrado, a espessura e umidade da torta e a facilidade de desprendimento da torta do tecido.

Com as amostras do rejeito arenoso, pontos de amostragem 3 e 7, foi realizado o teste de folha (*leaf test*) para a determinação da taxa unitária de filtração e da umidade

A taxa é determinada pela equação 4.1 a seguir:

$$Taxa\ Unitária\ de\ Filtração = \frac{Massa\ da\ Torta\ Seca \times Fator\ de\ Scale\ Up}{Tempo\ do\ Ciclo\ de\ Filtração \times Área\ de\ Filtração} \quad (4.1)$$

Nos testes foi adotado, neste caso, um fator de *scale up* de 0,8.

O aparato de teste, apresentado na Figura 4.2 é composto por:

- Bomba de vácuo a óleo;
- Setor de 6”;
- Kitassato de vidro de 2.000 ml;
- Fluxostato digital;
- Rotâmetro;
- Cronômetros;
- Paquímetro;
- Cilindros graduados de 500, 250 e 100 ml.

A umidade residual da torta foi determinada pela secagem em estufa a 105° C. A umidade é calculada pela equação 4.2 a seguir:

$$Umidade\ [%] = \frac{Peso\ Úmido - Peso\ Seco}{Peso\ Úmido} \quad (4.2)$$



Figura 4.2– Kit para a realização do teste de folha (*leaf test*).

Com as amostras da lama, pontos de amostragem 2 e 5, foram executados ensaios de filtração a pressão e determinação da umidade da torta.

A determinação do tempo de ciclo (enchimento e secagem) foi realizada através de ensaios em bancada de filtro a pressão, apresentado na Figura 4.3, composto por:

- bomba duplo diafragma e manifolds;
- câmara de inox com placas para filtração;
- fluxostato digital;
- manômetros de calibração e controle de pressão;
- tanque de alimentação em inox;
- cronômetros;
- cilindros graduados de 250 ml;
- balão volumétrico de 2.000 ml.

A determinação da umidade residual da torta via estufa, semelhante ao procedimento adotado no teste de folha.



Figura 4.3– Kit para a realização do teste de filtração a pressão.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização das amostras

#### 5.1.1. Análise Granulométrica

A Figura 5.1 apresenta a distribuição granulométrica da alimentação dos espessadores de lama do concentrador 1 e de lama e do rejeito arenoso do concentrador 2. Nota-se que as lamas dos concentradores são semelhantes em termos granulométricos, mas diferentes do rejeito arenoso.

Enquanto o rejeito arenoso é composto por uma maior proporção de partículas grosseiras, as lamas apresentam um  $d_{50}$  de  $5\mu\text{m}$  a  $6\mu\text{m}$  e uma proporção relativamente alta (de 10% a 15%) de partículas menores que  $1\mu\text{m}$ .

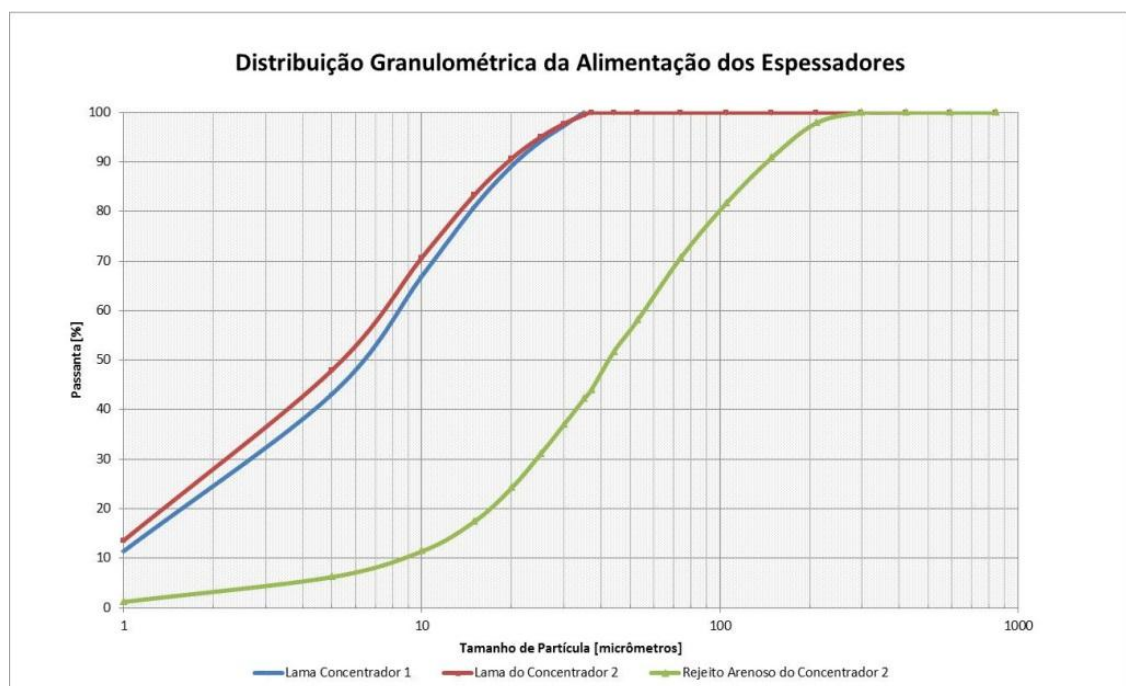


Figura 5.1: Distribuição granulométrica da alimentação do espessador de lama do concentrador 1 e 2 e do rejeito arenoso do concentrador 2.

A Figura 5.2 apresenta a distribuição granulométrica do *underflow* do espessador de lama do concentrador 1 e de lama e rejeito arenoso do concentrador 2. Observa-se a mesma tendência de distribuição granulométrica da alimentação, porém com uma menor presença de ultrafinos especialmente no rejeito arenoso, que pode ser justificado pela tendência de saída destas partículas mais finas pelo *overflow* do espessador.

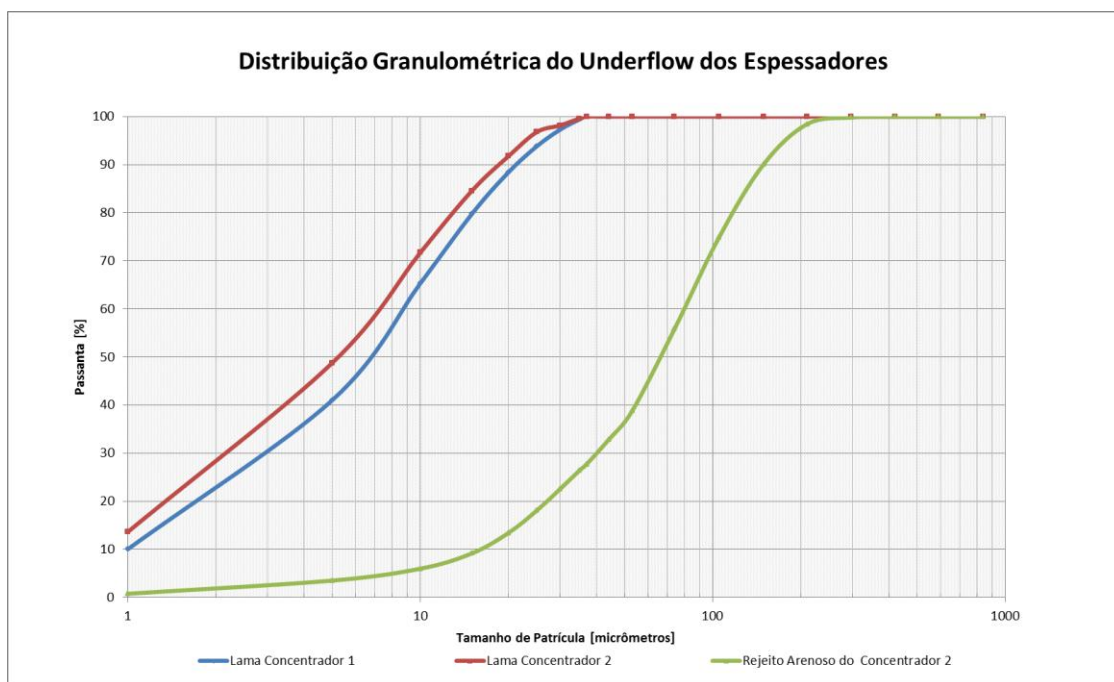


Figura 5.2: Distribuição granulométrica do underflow do espessador de lama do concentrador 1 e 2 e do rejeito arenoso do concentrador 2.

A Figura 5.3 mostra a distribuição granulométrica do rejeito arenoso do concentrador 1. Neste concentrador não há uma etapa de espessamento para o rejeito arenoso. Nota-se uma semelhança com a distribuição granulométrica do rejeito arenoso do concentrador 2.

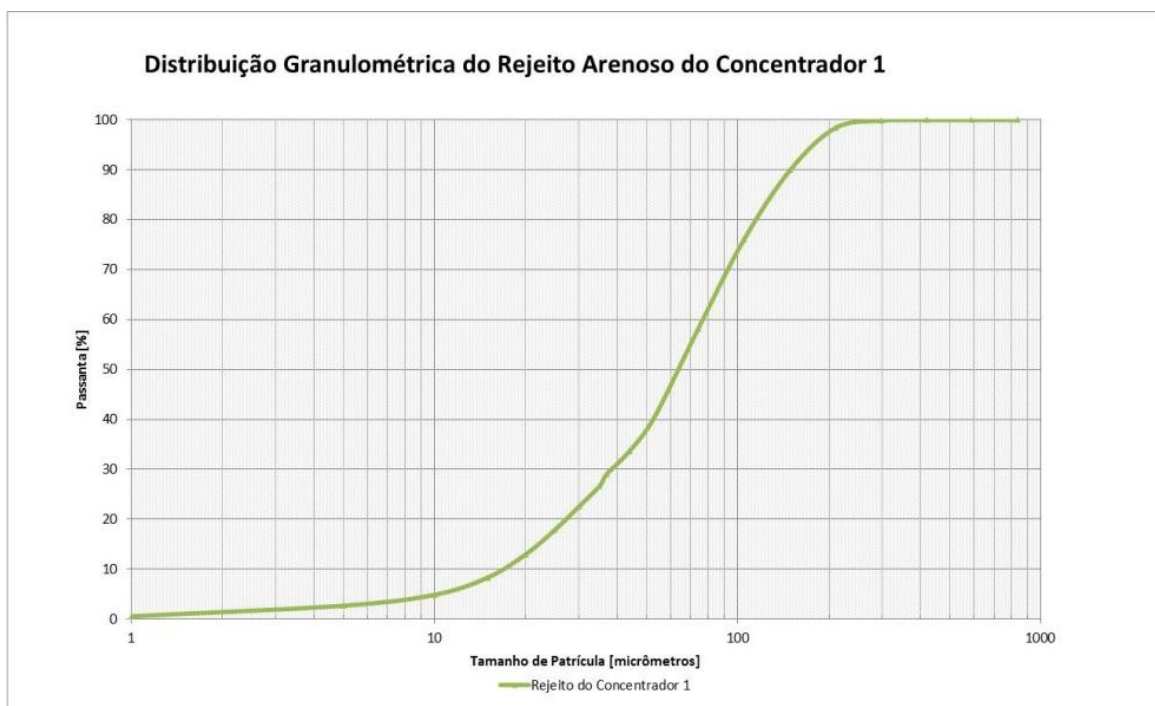


Figura 5.3: Distribuição granulométrica do rejeito arenoso do concentrador 1.

### 5.1.2. Composição Química

A Tabela 5.1 apresenta as composições químicas das lamas.

Tabela 5.1: Análise química da lama do concentrador 1 e do concentrador 2

Material		Unid	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	PPC
Alimentação do espessador	Concentrador 1	[%]	46,67	22,42	4,74	0,092	5,64
	Concentrador 2	[%]	52,17	14,65	3,65	0,092	6,76
Underflow espessador	Concentrador 1	[%]	47,14	21,95	4,53	0,092	5,65
	Concentrador 2	[%]	53,06	12,97	3,96	0,092	6,82

Observa-se que a lama possui um alto teor de ferro presentes nos óxidos e oxido-hidróxido que constituem as fases minerais destes materiais, mas que não pode ser recuperado pelas tecnologias de flotação atualmente utilizadas..

A Tabela 5.2 apresenta as composições químicas do rejeito arenoso. Neste caso, a fase química proporcionalmente dominante é a sílica, que foi flotada nas etapas de flotação mecânica e de coluna.

Tabela 5.2: Análise química do rejeito arenoso do concentrador 1 e concentrador 2

Material		Unid.	Fe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	PPC
Rejeito Arenoso do Concentrador 1		[%]	7,72	88,31	0,25	0,007	0,38
Rejeito Arenoso Concentrador 2	Alimentação Espessador	[%]	17,33	71,71	1,94	0,015	1,52
	Underflow Espessador	[%]	12,8	80,22	0,20	0,010	0,65

### 5.1.3. Área Superficial Específica

A determinação da área superficial específica foi feita através da medida de permeabilidade utilizando-se um permeabilímetro Blaine. Existe uma relação entre a permeabilidade do material e o desempenho na filtragem. Materiais que apresentam uma baixa permeabilidade, o que implica em uma alta área superficial específica, tendem a apresentar uma pior filtrabilidade, se todas as outras condições forem mantidas constantes.

A Tabela 5.3 apresenta as áreas superficiais específicas dos materiais avaliados neste trabalho.

Tabela 5.3: Área superficial específica da lama e do rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2

Material		Unid.	Área Superficial Específica
Concentrador 1	Alimentação do Espessador de Lama	[cm <sup>2</sup> /g]	9933
	Underflow do Espessador de Lama	[cm <sup>2</sup> /g]	10202
	Rejeito Arenoso	[cm <sup>2</sup> /g]	731
Concentrador 2	Alimentação do Espessador de Lama	[cm <sup>2</sup> /g]	11291
	Underflow do Espessador de Lama	[cm <sup>2</sup> /g]	11195
	Alimentação do Espessador de Rejeito	[cm <sup>2</sup> /g]	1176
	Underflow do Espessador de Rejeito	[cm <sup>2</sup> /g]	700

A lama apresenta uma área superficial específica muito maior do que a do rejeito arenoso devido a maior proporção de partículas finas. Por isso, a tendência é que a lama demande uma tecnologia de filtragem adequada às suas características.

## 5.2. Ensaio Tecnológicos

### 5.2.1. Ensaio de Espessamento de Lama

#### 5.2.1.1. Seleção de Floculantes para a Lama

Foram avaliados e selecionados floculantes iônicos e não iônicos com alto e baixo peso molecular para a lama e para o rejeito arenoso buscando uma otimização na dosagem para maximizar a velocidade de sedimentação.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam as variações da velocidade de sedimentação da lama com diversas dosagens de floculantes para a concentração de sólido de 4,7% em massa para a lama do concentrador 1 e 4,5% para a lama do concentrador 2.

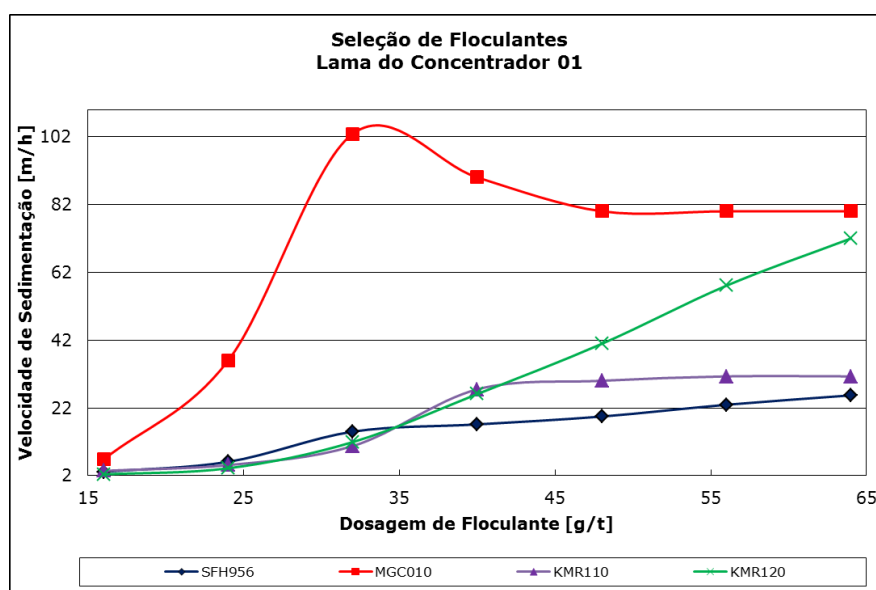


Figura 5.4: Avaliação de floculantes para a lama do concentrador 1.

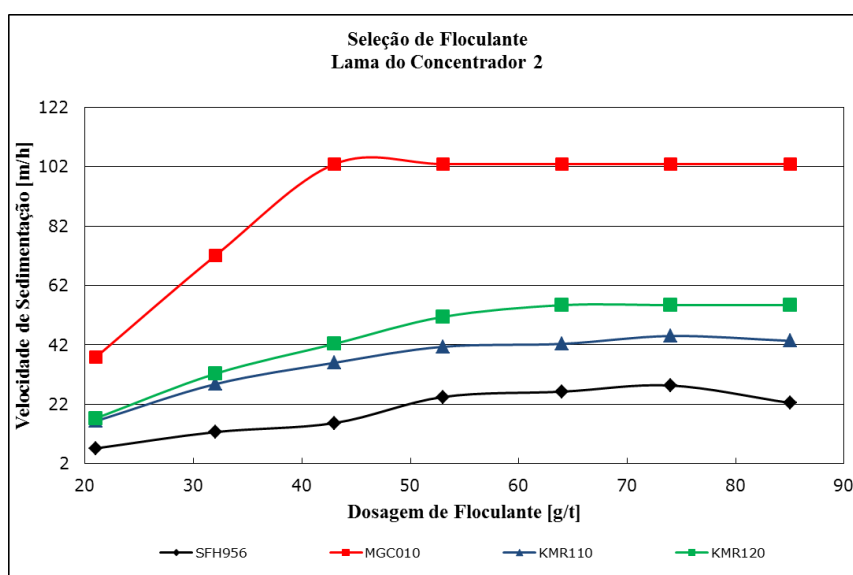


Figura 5.5: Avaliação de floculantes para a lama do concentrador 2.

Os resultados apontam um valor ótimo de dosagem de 40g/t do floculante MGC10 para atingir a maior velocidade de sedimentação para a lama do concentrador 1 e para a lama do concentrador 2. Vale ressaltar que, se existir mais de um ponto onde a velocidade de sedimentação é maximizada, será escolhido o de menor dosagem para diminuir o custo de operação.

### 5.2.1.2. Diluição ideal para a Lama

É importante a determinação da concentração de sólido ótima para que a etapa de espessamento tenha o desempenho maximizado. Para cada material haverá uma concentração de sólido em que a interação das partículas com o floculante será o suficiente para a formação dos flóculos, mas sem que uma partícula atrapalhe a sedimentação da outra.

A Figura 5.6 e 5.7 mostram que esta concentração de sólido ótima está próxima de 10% para a lama dos concentradores 1 e 2.

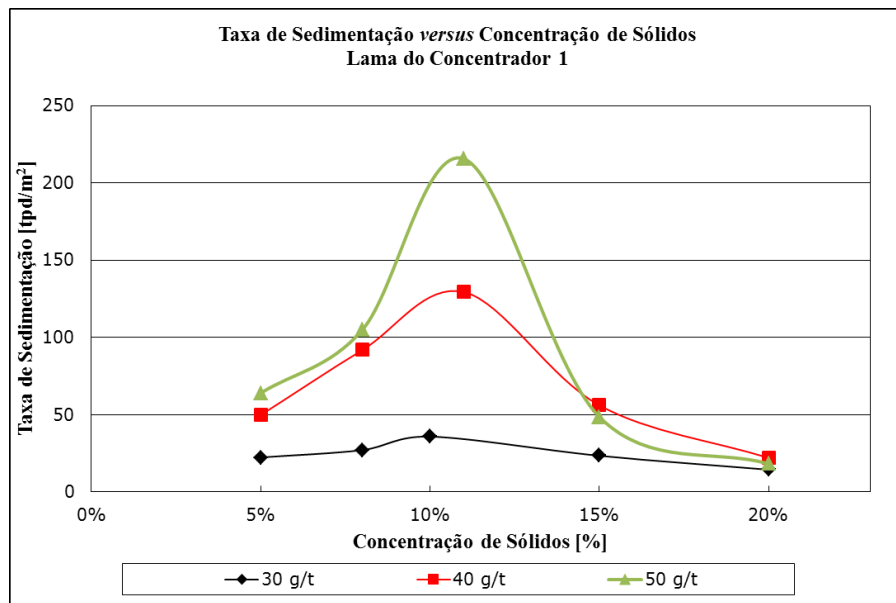


Figura 5.6: Determinação da diluição ideal para o espessamento da lama do concentrador 1.

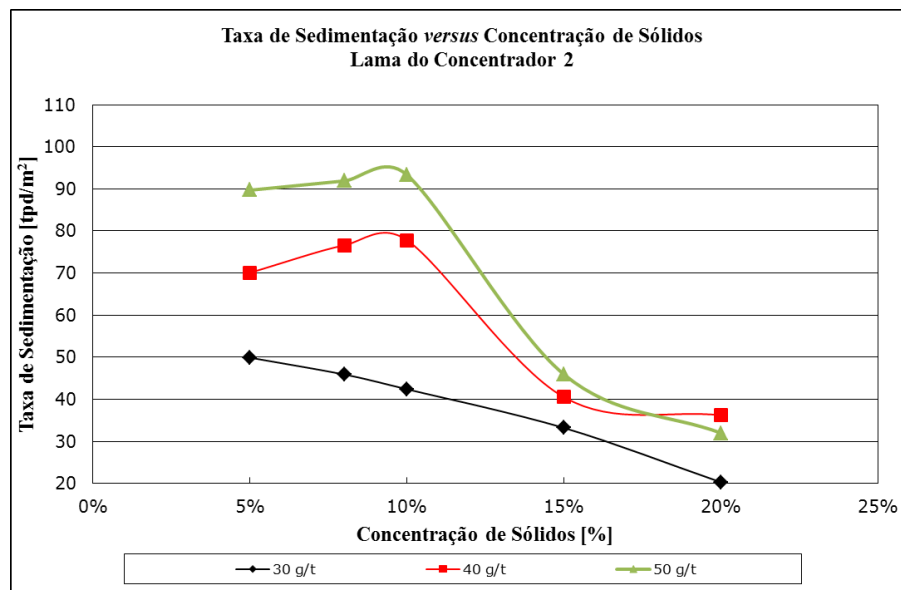


Figura 5.7: Determinação da diluição ideal para o espessamento da lama do concentrador 2.

Como a concentração dos sólidos da lama após os hidrociclones deslamadores é de 4% a 5%, então para que se atinja o valor ótimo da concentração de sólido será necessária a recirculação de uma parte do fluxo de espessado.

Com a recirculação de uma parte do fluxo de espessado em escala industrial, o circuito tenderá a entrar em regime de maneira adequada com um sistema de controle integrado, sem a necessidade de elevados investimentos e consumo energético.

### 5.2.1.3. Ensaio de Sedimentação com a Lama

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam a variação da altura da interface da fase clarificada com a não clarificada com o tempo para a lama dos concentradores 1 e 2, respectivamente. Esta variação que define os parâmetros para o dimensionamento do espessador.

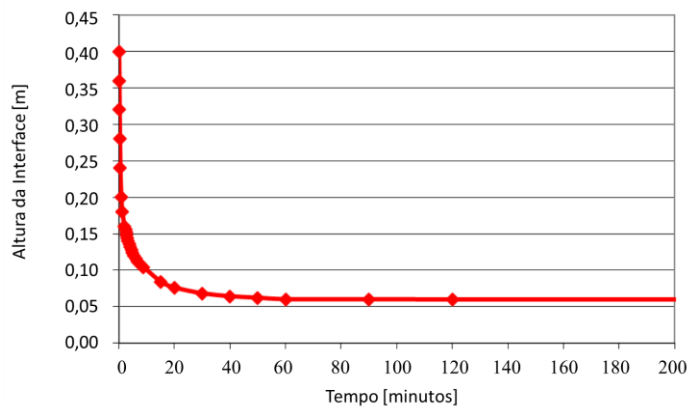


Figura 5.8: Curva de sedimentação da lama do concentrador 1.

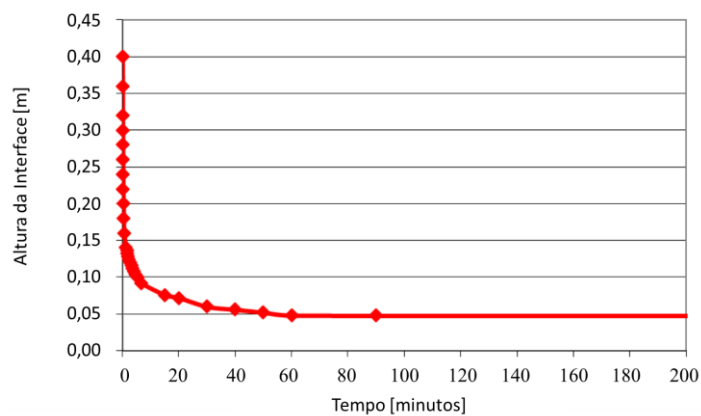


Figura 5.9: Curva de sedimentação da lama do concentrador 2.

A Tabela 5.4 apresenta a taxa de transbordo e área unitária para a lama dos concentradores 1 e 2.

Tabela 5.4: Taxa de transbordo e área unitária no espessamento da lama do concentrador 1 e 2.

Material	Sólidos na Alimentação [%]	Dosagem de Floculante [g/t]	Taxa de Transbordo [m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ]	Área Unitária [m <sup>2</sup> /tpd]
Lama do Concentrador 1	10	40	4,3	0,12
Lama do Concentrador 2	10	40	10,1	0,23

É notória a diferença no desempenho do espessamento entre a lama dos concentradores 1 e 2. A capacidade de espessamento de lama do concentrador 1 é aproximadamente 50% da capacidade do concentrador 2.

O espessador adequado para a lama dos dois concentradores é o *high density*.

#### 5.2.1.4. Concentração de Sólido no *Underflow* do Espessador de Lama

As Figuras 5.10 e 5.11 a seguir apresentam a concentração de sólido atingidas no fluxo de espessado para as lamas do Concentrador 1 e Concentrador 2:

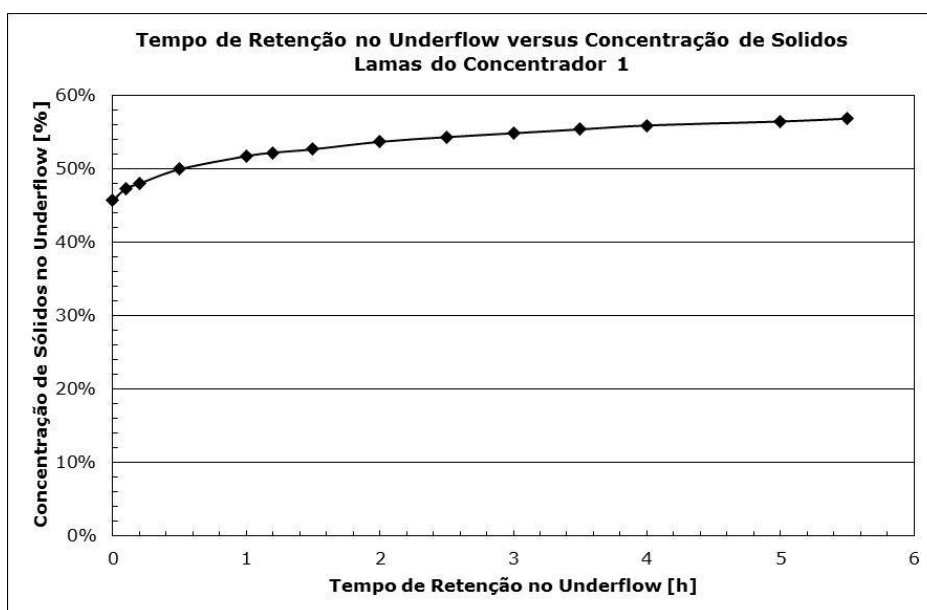


Figura 5.10: Relação entre o tempo de retenção e a concentração de sólidos no underflow para a lama do Concentrador 1.

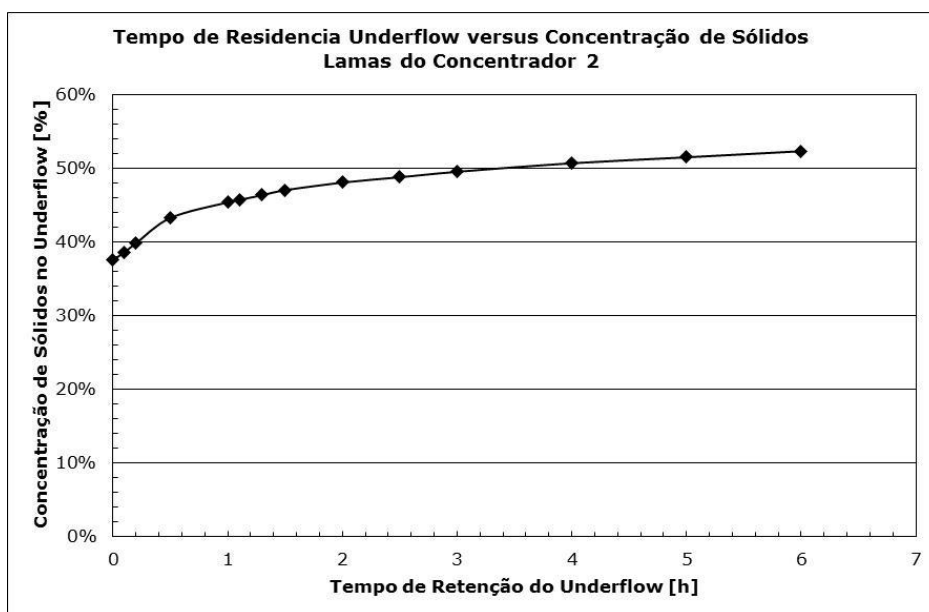


Figura 5.11: Relação entre o tempo de residência e a concentração de sólidos no underflow para a lama do Concentrador 2.

Nota-se a possibilidade de atingir entre 50% a 55% de sólidos no fluxo de espessado. Atualmente os espessadores de lama atingem em média 35% de sólido no fluxo de espessado. Para uma aplicação em escala industrial, deverá ser considerada a vazão nominal para o dimensionamento do espessador já que os espessadores existentes foram dimensionados para outras condições operacionais.

## 5.2.2. Ensaios de Filtragem da Lama

### 5.2.2.1. Seleção de Tecido

Os resultados da avaliação dos tecidos nos ensaios com o filtro prensa estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Resultados da avaliação de tecidos para filtragem de lama.

<b>Parâmetros</b>	<b>CFL6150</b>	<b>CFL5985</b>	<b>ADX015</b>
Umidade [%]	18,6	19,9	18,4
Espessura da torta [mm]	25	23,5	24
Característica da descarga	Boa	Ruim	Boa
Sólido no Filtrado [%]	0,32	0,12	0,70

O tecido CFL6150 foi selecionado por ter apresentado uma combinação satisfatória de qualidade no filtrado e desprendimento da torta para esta aplicação, quando comparado com os outros tecidos.

#### 5.2.2.2. Ensaio com Filtro Prensa

A Tabela 5.6 apresenta os resultados dos ensaios em filtro prensa obtidos com a lama do Concentrador 1 e Concentrador 2, com uma concentração de sólidos na alimentação de 50%:

Tabela 5.6: Resultados dos ensaios de filtragem de lama.

	<b>Lama</b>		<b>Lama</b>	
	<b>Concentrador 1</b>		<b>Concentrador 2</b>	
Pressão de Alimentação [psi]	140	225	140	225
Umidade [%]	18,5	19,5	18,1	19,4
Espessura Final Torta [mm]	32		32	
Tempo de Pressurização [min]	22		22	
Tempo de Secagem [min]	3		3	

Os resultados mostram a viabilidade de atingir até 18,5% e 18,1% de umidade na torta desaguada em filtros prensa.

Uma etapa de espessamento que garanta uma concentração de sólidos mais alta no *underflow* fará com que a etapa de filtragem tenha um melhor desempenho. Se a alimentação do filtro estivesse com a concentração de sólidos típica do processo (35%)

os tempos de ciclo seriam de 44 e 37 minutos para a lama dos concentradores 1 e 2, respectivamente, mantendo todos os outros parâmetros constantes.

### 5.2.3. Ensaios de Espessamento de Rejeito Arenoso

#### 5.2.3.1. Seleção de Floculantes para o Rejeito Arenoso

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam as variações da velocidade de sedimentação do rejeito arenoso com diversas dosagens de floculantes em para a concentração de sólido de 51% em massa para o rejeito do concentrador 1 e 50% para o rejeito do Concentrador 2.

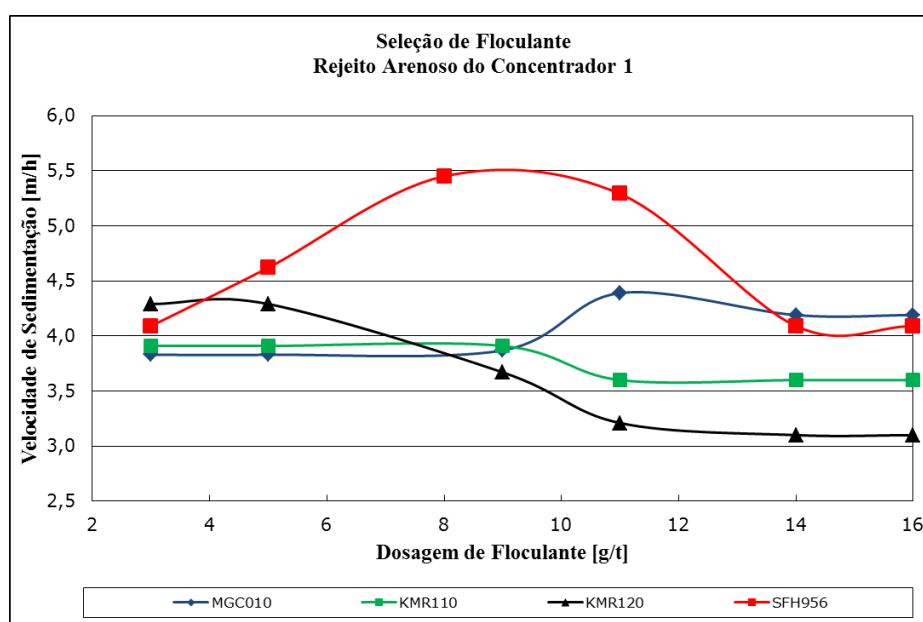


Figura 5.12: Avaliação de floculantes para o rejeito arenoso do concentrador 1.

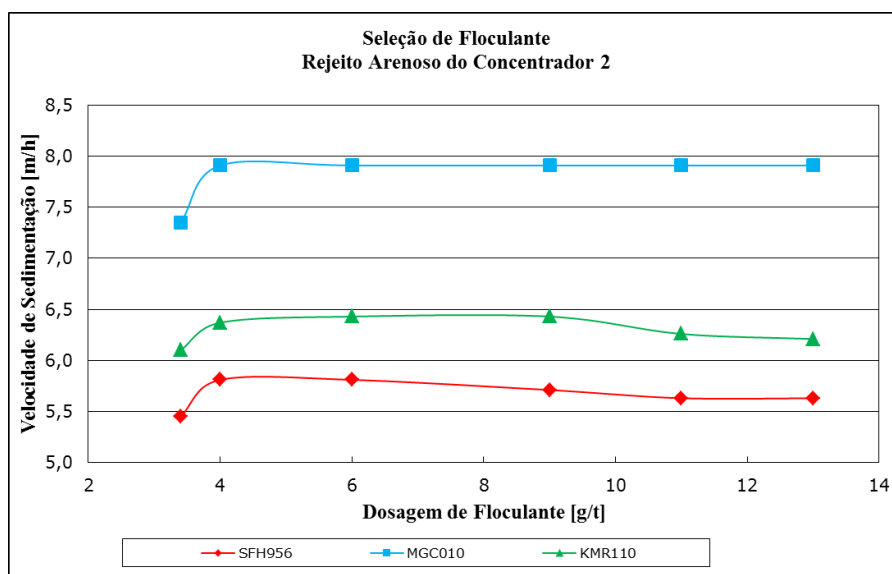


Figura 5.13: Avaliação de floculantes para o rejeito arenoso do concentrador 2.

Os resultados apontam um valor ótimo de dosagem de 8g/t do floculante SFH956 para atingir a maior velocidade de sedimentação para o rejeito arenoso do concentrador 1 e 4g/t do floculante MGC010 para o rejeito arenoso do concentrador 2.

### 5.2.3.2. Diluição ideal para o Rejeito Arenoso

A Figuras 5.14 e 5.15 mostram que para o rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2 a concentração de sólido ótima está próxima de 18% e de 30%, respectivamente.

Como a concentração dos sólidos do rejeito arenoso após as etapas de flotação é de 40%, então para que se atinja o valor ótimo da concentração de sólido será necessária a recirculação de uma parte do *overflow*.

Alguns espessadores em escala industrial já possuem um sistema para a recirculação do *overflow* no poço de alimentação.

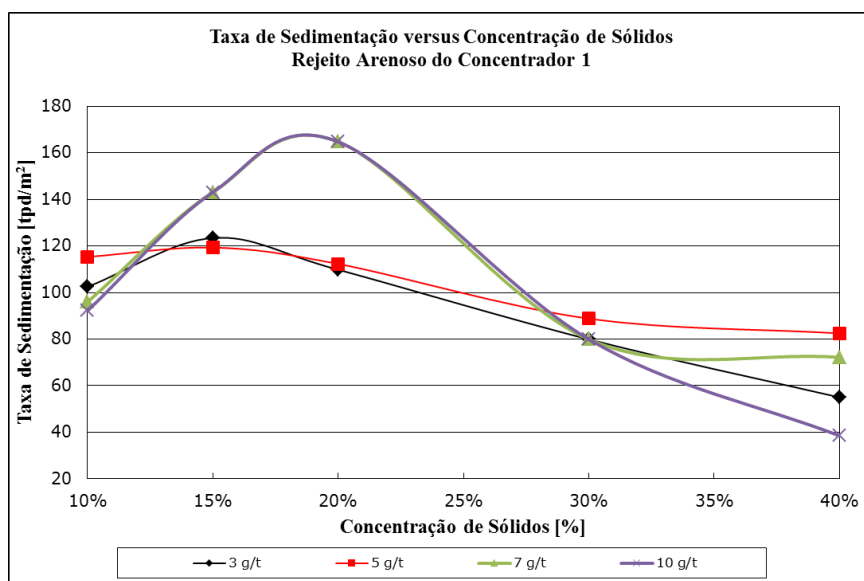


Figura 5.14: Determinação da diluição ideal para o espessamento do rejeito arenoso do concentrador 1.

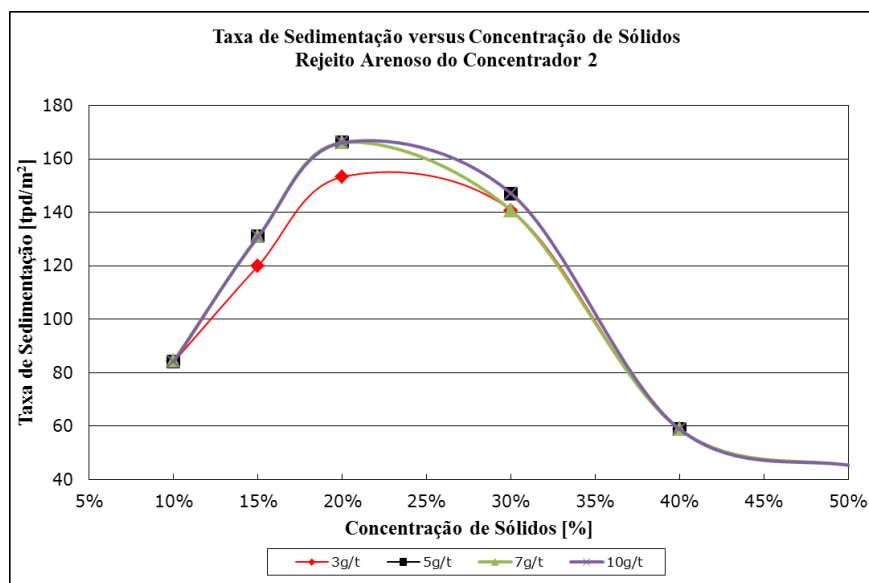


Figura 5.15: Determinação da diluição ideal para o espessamento do rejeito arenoso do concentrador 2.

### 5.2.3.3. Ensaio de Sedimentação com o Rejeito Arenoso

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam a variação da altura da interface da fase clarificada com a não clarificada com o tempo.

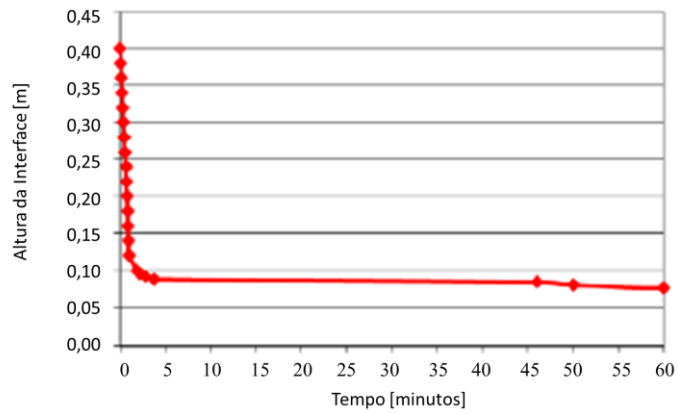


Figura 5.16: Curva de sedimentação do rejeito arenoso do concentrador 1.

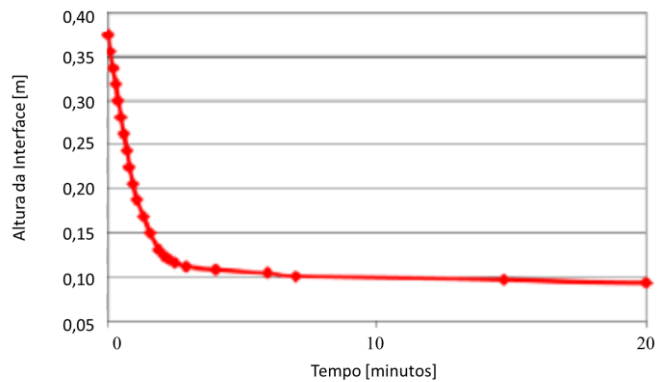


Figura 5.17: Curva de sedimentação do rejeito arenoso do concentrador 2.

A Tabela 5.7 apresenta a taxa de transbordo e área unitária para o rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2.

Tabela 5.7: Taxa de transbordo e área unitária no espessamento do rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2.

Material	Sólidos na Alimentação [%]	Dosagem de Floculante [g/t]	Taxa de Transbordo [m <sup>3</sup> /h*m <sup>2</sup> ]	Área Unitária [m <sup>2</sup> /tpd]
Rejeito Arenoso do Concentrador 1	18	7	8,2	0,04
Rejeito Arenoso do Concentrador 2	30	7	5,6	0,06

A concentração de sólidos no *underflow* para o rejeito arenoso dos concentradores 1 e 2 foi de 60% a 70% de sólidos. Atualmente os espessadores de rejeito arenoso atingem em média 50% a 55% de sólido no fluxo de espessado.

A tecnologia de espessamento mais adequada para o rejeito arenoso é o *high rate*.

## 5.2.4. Ensaios de Filtragem de Rejeito Arenoso

### 5.2.4.1. Seleção de Tecido

Os resultados da avaliação dos tecidos estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultados da avaliação de tecidos para filtragem de rejeito arenoso.

Parâmetros	SDT100	SDT150	CFL5863	TFTPK	CFL5860
Umidade [%]	11,0	10,8	11,5	11,7	11,4
Tempo de Formação [segundos]	2,3	2	1,9	2	1,7
Espessura da torta [mm]	19	20	20	20	20
Característica da descarga	Boa	Boa	Boa	Ruim	Boa
Sólido no Filtrado [%]	1,8	1,5	3,7	4,0	1,9

Pela a avaliação combinada de todos os resultados, o tecido SDT150 foi o que apresentou o melhor desempenho.

#### 5.2.4.1. Teste de Folha (*Leaf Test*)

A Tabela 5.9 apresenta os resultados dos ensaios em filtro a vácuo obtidos com o rejeito arenoso do concentrador 1 e concentrador 2, com uma concentração de sólidos na alimentação de 60%:

Tabela 5.9: Resultados dos ensaios de filtração de rejeito arenoso.

<b>Parâmetros</b>	<b>Rejeito Concentrador 1</b>	<b>Rejeito Concentrador 2</b>
Umidade [%]	12	14
Espessura Final Torta [mm]	20	20
Tempo de Ciclo [min]	0,5	0,82
Taxa Unitária de Filtração [ $t/m^2 \cdot h$ ]	2,7	1,8

Os resultados mostram a viabilidade de atingir até 12% de umidade na torta desaguada em filtros a vácuo. Como a concentração de sólidos influencia no desempenho da filtração, se a concentração de sólidos na alimentação do filtro fosse a típica do processo (50% a 55%) os resultados seriam piores que o encontrado.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível concluir:

- Tecnologias de espessamento e filtração podem ser aplicadas em sequência no desaguamento da lama e do rejeito arenoso de forma a atingir níveis de umidade que os caracterizem como torta e com consistência que deve favorecer a subsequente disposição destes rejeitos ;
- É possível otimizar a etapa de espessamento através do ajuste da concentração de sólidos na alimentação do espessador, seja por diluição ou adensamento do material. A concentração de sólidos ideal para maximizar o desempenho do espessamento da lama é de 10% e de 18% a 30% para o rejeito arenoso;
- O melhor desempenho da etapa de espessamento repercutirá em um melhor desempenho da etapa posterior de filtração para a lama e para o rejeito arenoso;
- Este estudo comprova a viabilidade técnica de desaguamento da lama, composta em sua grande maioria por partículas ultrafinas, através de tecnologias de filtração a pressão;

A filtração do rejeito arenoso, por sua vez constituído por partículas mais grosseiras que as da lama, pode ser viabilizada tecnicamente por tecnologias de filtração a vácuo como, por exemplo, o filtro esteira.

## **7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Baseado nos resultados alcançados, os seguintes trabalhos futuros são sugeridos:

1. Estudo do espessamento e filtração para a mistura de lama e rejeito arenoso da Samarco Mineração S/A em diferentes proporções;
2. Estudo do espessamento e filtração para os rejeitos gerados em cada etapa da flotação, separadamente;
3. Estudo de desaguamento dos rejeitos através hidrociclones e com o auxílio de floculantes;
4. Estudo da viabilidade técnica em termos geotécnicos do empilhamento dos rejeitos filtrados na região de Mariana (MG) e Ouro Preto (MG).

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LUZ, A.B. LINS, F.A.F. Introdução ao Tratamento de Minério. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5. Ed. Rio de Janeiro: MCT CETEM, 2010. p. 3-20.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: 2006.

ANDRITZ. Filter press, side-bar and overhead design. Graz: 2014. Disponível em: <<http://www.andritz.com/products-and-services/pf-detail.htm?productid=5439>>.

Acesso em: 2014, junho 12.

ARAÚJO, A.C. *Influência de íons de alumínio e caolinita na flotação catiônica reversa de quartzo e hematita*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1982. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BARREDA, R.H.O. *Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral para aproveitamento dos rejeitos das lamas calcárias e diminuição do impacto ambiental*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BERALDO, J.L. Concentração por flotação, Apostila, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1983.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia -*Plano Nacional de Mineração 2030* - Brasília, 2011.

CAPEY, M.F. The filter press: work horse of the filtration world. *Filtration&separation.*, v.34, p.826-828, 1997.

CHAVES, A.P., LEAL FILHO, L.S., BRAGA, P.F.A. Flotação. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5. Ed. Rio de Janeiro: MCT CETEM, 2010. p. 465-513.

CHEMALE JUNIOR, F., TAKEHARA, L. Minério de Ferro: Geologia e Geometalurgia. 1.ed. Rio de Janeiro: EDGRAD BLUCHER, 2013. p.23.

DAVIES, M. Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 14, 2011, Vancouver

DORR-OLIVER EIMCO. Review of Dewatering Technology. mar. 2004. 54 dispositivos.

FERREIRA, E. E. *Lamas de minério de ferro: agregação/dispersão e reologia*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

FILIPPOV, L.O., SEVEROV, V.V., FILLIPPOVA, I.V. An overview of the beneficiation of iron ores via reverse cationic flotation. International Journal of Mineral Processing., v.127, n.3, p.62-69, 2014.

FITTON, T.G., ROSHDIEH, A. Filtered tailings vs thickened slurry: Four case studies. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 16, 2013, Belo Horizonte. P.275-288

FLSMIDTH MINERALS. Einco Extractor Horizontal Belt Vacuum Filter. mai. 2008. 6 p. folder.

FRANÇA, S.C.A., MASSARINI, G. Separação Sólido-Líquido. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. Tratamento de Minérios. 5. Ed. Rio de Janeiro: MCT CETEM, 2010. p. 637-680.

GÖRRES, G., PALMER, J. Water recovery – a challenge for modern dewatering technology. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON PASTE AND THICKENED TAILINGS, 16, 2013, Belo Horizonte. P.623-633

GUIMARÃES, N.C. *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2011. 114p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GUIMARÃES, F.A.V. *Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. 221p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

GUNSON, A.J., KLEIN, B., VEIGA, M. DUNBAR, S. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production.*, v.21, n.3, p.71-82, 2012.

HORE, C., LUPPNOW, D. Karara Iron Ore TSF – design considerations for a unique large scale dry stack facility. In: *Tailings and Mine Waste Conference, 2014, Keystone*.

JESUS, C.A.G. Ferro. In: *Sumário Mineral 2014*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2014, p. 72-73.

JVK FILTRATION SYSTEMS. Design of the Membrane Plates. Georgensgmünd: 2014. Disponível em: <<http://www.jvk.de/english/filterelemente/membran.shtml>>. Acesso em: 2014, junho 12.

LIMA, N.P. *Comportamento de minérios itabiríticos dos complexos Alegria e Fábrica Nova frente aos processos de deslamagem e flotação*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2001. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

LOPES, G.M. *Flotação direta de minério de ferro*. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2009. 93p (Dissertação, Pós-Graduação em Engenharia de Minas).

LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. *Tratamento de Minérios*. 5.ed. Rio de Janeiro: MCT CETEM, 2010.

MAPA, P.S. *Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 172p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

MARIA, R.C., LUZ, J.A.M. Aspectos da avaliação técnico-econômica de circuitos de flotação. *Revista Escola de Minas*. Ouro Preto, v.63, n.4, 2010.

MARTINS, M., LIMA, N.P., LEAL FILHO, L.S. Depressão de minerais de ferro: influência da mineralogia, morfologia e pH de condicionamento. *Revista Escola de Minas*. Ouro Preto, v.65, n.3, p.393-400, 2012.

METSO MINERALS. Conceitos Básicos em Processamento de Minerais – Manual do Produto. 2006.

NASCIMENTO, H.N. *Caracterização tecnológica de materiais estéreis com elevado teor de PPC e P da Mina de Alegria da SAMARCO MINERAÇÃO S.A.* Belo Horizonte: Escola Engenharia da UFMG, 2014. 93p (Dissertação, Engenharia Metalúrgica e de Minas).

OLIVEIRA, M. L. M., AQUINO, J. A. Aspectos relevantes das colunas de flotação. In: ENTMME, 21. Natal: CETEM, novembro/2005. p. 243-250.

OLIVEIRA, P.S. *Rotas para recuperação de ferro fino contido no underflow do espessador de lama da usina de Conceição.* Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2006. 113p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

OUTOTEC. (2011). Outotec Larox Fast Filter Press – FFP. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

PEIXOTO, C.L.P. *Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa.* Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2012. 93p (Dissertação, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica).

PERES, A. E. C., COELHO, E. M., de ARAUJO, A. C. Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva. In: COELHO, E.M. Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia Recife, 1980. p.205-286.

PORTES, A.M.C. *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta.* Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. (Dissertação, Mestrado em Geotecnia e Transportes).

ROCHA, J. M. P. *Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das Minas de Alegria da Samarco Mineração S.A. – Minas Gerais* Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 358p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

ROESER, H.M.P., ROESER, P.A. O Quadrilátero Ferrífero – MG, Brasil: Aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. Revista Geonomos. Belo Horizonte, v.18, n.1, 2010.

ROSA, A.C. *Desempenho dos circuitos de moagem direto e inverso da Samarco*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2013. 132p (Dissertação, Mestrado em Engenharia).

SAMARCO, M. Relatório Anual de Sustentabilidade 2013. Belo Horizonte: 2014.

SANTOS, L. D., BRANDÃO, P. R. G. Variações mineralógicas, morfológicas e microestruturais em minérios de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG, e suas implicações no processamento mineral. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 4, 2003. p.674-682.

SILVA, A.M. *Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral*. Ouro Preto: Engenharia de Materiais da REDEMAT 2006. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).

SILVA, G.M.A. *Estudos sobre o estado de agregação de suspensões de um minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SOFRÁ, F., BOGER, D. V. Environmental Rheology for Waste Minimisation in the Minerals Industry. *Chemical Engineering Journal*, Melbourne – Australia, No. 86, p. 319-330, 2002.

SOUZA JÚNIOR, M. *Caracterização mineralógica e tecnológica do minério de ferro itabirítico anfíbolítico da jazida de Alegria, Mariana, MG*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

SPARKS, T. Understanding filter press and belt filters. *Filtration&separation.*, v.49, p.20-24, 2012

SVAROVSKY, L. *Solid-Liquid Separation*. 4.ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. p.1-392.

TURRER, H. D. G. *Polímeros depressores na flotação de minério de ferro*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

VALE. GADMF. *Visitas Técnicas a Empresas de Mineração do Chile*. Jan.2009

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration..Separation and Purification Technology., v.58, p.234-241, 2007.

YELLISHETTY, M. , MUDD, G. M. Substance flow analysis of steel and long term sustainability of iron ore resources in Australia, Brazil, China and India. Journal of Cleaner Production, Melbourne, p 1-11, fev.2014

YELLISHETTY, M., RANJITH, P.G., THARUMARAJAH, A. Iron ore and steel production trends and material flow in the world: Is this really sustainable? Resources, Conservation and Recycling., v.54, p.1084-1094, 2010.