



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



AURELIANO CEZARINO DA ROCHA FILHO

**ALTERNATIVAS PARA DESAGUAMENTO E DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DO
COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA**

OURO PRETO

2021

AURELIANO CEZARINO DA ROCHA FILHO

**ALTERNATIVAS PARA DESAGUAMENTO E DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS
DO COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia de
Minas da Universidade Federal de Ouro
Preto, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. WALDYR
LOPES DE OLIVEIRA FILHO

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R672a Rocha Filho, Aureliano Cezarino da.
Alternativas para desaguamento e disposição dos rejeitos do
Complexo Mineral de Tapira. [manuscrito] / Aureliano Cezarino da Rocha
Filho. - 2021.
69 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Geotecnia. 2. Rejeitos (Mineração). 3. Barragens de rejeitos. 4.
Fosfatos. I. Oliveira Filho, Waldyr Lopes de. II. Universidade Federal de
Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.136(815.1)

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos treze dias do mês de abril de 2021, às 13h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Aureliano Cezarino da Rocha Filho**, matrícula 13.2.1872, intitulado: **ALTERNATIVAS PARA DESAGUAMENTO E DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DO COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho, Prof^{ra}. Dr^a. Otávia Martins Silva Rodrigues, e Prof. Dr. José Fernando Miranda. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Prof^{ra}. Dr^a. Otávia Martins Silva Rodrigues; segundo, o Prof. Dr. José Fernando Miranda e em último, o Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 8 (oito), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pelo presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores.

Ouro Preto, 13 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho

Membro: Prof^{ra}. Dr^a. Otávia Martins Silva Rodrigues

Membro: Prof. Dr. José Fernando Miranda

Discente: Aureliano Cezarino da Rocha Filho

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o seu cuidado para comigo.

Ao meu professor orientador Waldyr por todos os conhecimentos e experiências repassadas.

À UFOP, à Escola de Minas e ao Departamento de Engenharia de Minas juntamente com os seus professores pela educação de qualidade.

À minha família por sempre me apoiarem nos meus sonhos.

À Pauliana, por me ouvir todas as noites.

À Mosaic Fertilizantes, pela oportunidade de estágio, pelo desenvolvimento pessoal e profissional e por disponibilizar os dados técnicos para este trabalho. Especialmente, agradeço ao Ricardo Telles, ao Fábio e a equipe de Geotecnia.

Ao Ministério Universidades Renovadas por me sustentar e por me ensinar a acreditar no “Sonho de Amor para o Mundo”.

Aos meus amigos de Ouro Preto e colegas da engenharia de minas, por todos os bons momentos.

À Aline, Mylla, Maicon e Priscila por toda ajuda e amizade neste tempo em Araxá.

Muito obrigado a todos!

RESUMO

Em consequência dos recentes acidentes nas barragens de Fundão e Brumadinho, o setor de mineração vem procurando alternativas de disposição de rejeitos às convencionais barragens de rejeitos, que sejam mais seguras e com melhor aceitação da população e órgãos de fiscalização. Para esse fim, surgem soluções como as pilhas de rejeitos desaguados e a disposição de rejeitos em pastas. O presente trabalho apresenta os resultados de ensaios preliminares de desaguamento realizados nos rejeitos de flotação e de lamas gerados na mina de fosfato em Tapira-MG para modelar possíveis alternativas de disposição de rejeitos para esse empreendimento. Foram realizados testes para espessadores, hidrociclones, filtros à vácuo e à pressão, além de ensaios de compactação. Foi possível o desaguamento dos rejeitos de flotação através de hidrociclonagem e filtragem por filtro de disco, gerando material em condições adequadas para o empilhamento em pilha de rejeito drenado. Por outro lado, as lamas não apresentaram bons desempenhos nas técnicas de desaguamento estudadas, com produtos com altos teores de umidade, dificultando a sua disposição.

Palavras-chave: Geotecnia, Rejeitos (Mineração), Barragens de Rejeito, Fosfato.

ABSTRACT

As a result, for the recent Fundão and Brumadinho dam's failures, the mining sector has been searching for new alternatives to the conventional tailing dams that be safer and more acceptable by society and regulatory agencies. Therefore, there are solutions like dry stack tailings and paste tailings disposal. This study presents the results of preliminary dewatering tests for flotation tailings and slimes, generated in Tapira phosphate mine for modeling possible alternatives of tailings disposal in that site. Tests were carried out for thickeners, hydrocyclones, vacuum and pressure filters, and compactation tests. It was possible to dewater the flotation tailing through hydrocycloning and filtering by disc filter, generating material in conditions suitable for stacking in a dry stack tailing. On the other hand, the slimes did not perform well in the studied dewatering techniques, with products with high moisture content, making it difficult to dispose.

Key-words: Geotechnics, Tailings (Mining), Tailings Dams, Phosphate.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Custo da operação unitária para desaguamento em função do tamanho.	16
Figura 2 - Técnicas de desaguamento em função da granulometria.	17
Figura 3 - Tipos de equipamento de desaguamento em função do tamanho de partícula	17
Figura 4 - Desenho esquemático de um espessador convencional	19
Figura 5 - Representação Esquemática de um hidrociclone convencional	21
Figura 6 – Desenho Esquemático de um filtro tipo mesa	24
Figura 7 – Desenho esquemático de filtro tipo correia	25
Figura 8 – Desenho esquemático de um filtro tipo tambor	25
Figura 9 – Filtro de Disco Convencional Modelo VSF 120/10 - Andritz.....	26
Figura 10 – Filtro Prensa modelo FLOWPRESS 1500 - GRABE.....	27
Figura 11 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara	28
Figura 12 – Exemplo de peneira DSM.....	29
Figura 13 – Representação esquemática da peneira desaguadora (a); exemplo de peneira desaguadora industrial.....	30
Figura 14 - Stacking com a torre central	32
Figura 15 - Slump Test.....	32
Figura 16 - Geometria Típica de um Empilhamento	35
Figura 17 - Projeto de Pilha de Rejeito Filtrado com os diques de contenção de sedimentos.....	37
Figura 18 – Exemplo de output de análise de estabilidade representando a superfície de ruptura com menor FS.....	38
Figura 19 - Representação do Zoneamento de Pilhas de Rejeito	39
Figura 20 - Pilha de Rejeito Filtrado em Operação da Mina de Cerro Lindo (Peru) ...	40
Figura 21 - Complexo Mineral de Tapira com indicação de estruturas notáveis.....	42

Figura 22 - Fluxograma simplificado dos processos de tratamento de minérios do CMT	43
Figura 23 - Leaf Test	48
Figura 24 - Representação do Slump Test	50
Figura 25 - Curva Granulométrica dos rejeitos	53
Figura 26 - Ensaio de Sedimentação para o Rejeito Granulado.....	54
Figura 27 - Ensaio de Sedimentação para o Rejeito Friável Fino.....	54
Figura 28 - Ensaio de Sedimentação para a Lama	55
Figura 29 - Produto das Lamas no Filtro Prensa.....	61
Figura 30 - Slump Test com underflow de hidrociclonagem de rejeito de flotação	63
Figura 31 - Curvas dos Ensaios de Compactação Procto-Normal para os Rejeitos da Flotação	64
Figura 32 - Rota de processo para empilhamento de rejeitos de flotação.....	65
Figura 33 - Rota de processo para empilhamento das lamas	66
Figura 34 - Rota de processo para a geração e disposição de pastas de lamas	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Pilhas de Rejeito projetadas ou em operação no Brasil.....	33
Tabela 2 - Análise química dos rejeitos	51
Tabela 3 - Análise Granulométrica dos Rejeitos.....	52
Tabela 4 - Dimensionamento de Filtros Plano ou de Mesa	56
Tabela 5 - Dimensionamento de Filtros de Disco	57
Tabela 6 - Dimensionamento dos Filtros de Tambor	58
Tabela 7 - Ensaios de Filtragem para as Lamas	59
Tabela 8 - Dimensionamento Filtro Plano – Lamas.....	60
Tabela 9 - Dimensionamento Filtro a Disco – Lamas CMT	60
Tabela 10 – Dimensionamento Filtro de Tambor – Lamas.....	61
Tabela 11 - Simulação de Aberturas para Hidrociclones	62
Tabela 12 - Resumo dos resultados de desaguamento	65

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 DESAGUAMENTO DE REJEITOS	15
2.1.1 Espessamento	18
2.1.2 Hidrociclonagem	20
2.1.3 Filtragem	22
2.1.4 Peneira Desaguadora	28
2.2 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	30
2.2.1 Disposição de Rejeito em Pasta	31
2.2.2 Disposição de Rejeitos Desaguados em Pilhas	33
2.3 O COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA	41
3. METODOLOGIA	46
3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS .	46
3.2 ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	47
3.3 TESTE DE FILTRAGEM (<i>LEAF TEST</i>).....	47
3.4 SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONAGEM E <i>SLUMP TEST</i>	49
3.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1 CARATERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS	51
4.2 ESPESAMENTO	53
4.3 FILTRAGEM	55
4.3.1 Filtragem dos Rejeitos de Flotação.....	56

4.3.2 Filtragem das Lamas	59
4.4 HIDROCICLONAGEM PARA OS REJEITOS	62
4.5 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO	63
4.6 COMPILAÇÃO DOS DADOS	64
5. CONCLUSÕES	68
BIBLIOGRAFIA	69

1. INTRODUÇÃO

A disposição de rejeitos no Brasil se tornou tema de grande discussão nos últimos anos devido aos recentes acidentes que geraram grandes danos ambientais e perda de vidas, os mais relevantes foram o rompimento da barragem de Fundão em Mariana de 2015 e o rompimento da Barragem B1 em Brumadinho em 2019. Por consequência, o poder público editou uma série de normativas disciplinando a questão no território nacional. De forma especial em Minas Gerais, estado de tradição em mineração e que foi palco dos últimos grandes acidentes também editou normas sobre o tema.

A lei federal nº 12334 de 2010 (BRASIL, 2010) é um marco na normatização de barragens no Brasil, na medida em que ela cria a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Esta diretiva foi recentemente alterada pela lei nº 14066 de 2020 (BRASIL, 2020). A PNSB se aplica as barragens que possuem ou menos uma das seguintes características:

- I. altura do maciço maior ou igual a 15m;
- II. capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³.
- III. reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- IV. categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas;
- V. categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

Essa lei abrange todos os tipos de barragens, para fim de geração de energia, para armazenamento de água, para armazenamento de resíduos industriais e para armazenamentos de rejeitos de mineração.

Como complemento à lei de 2010, o então DNPM publica portaria nº 70389 em 2017 (DNPM, 2017) depois do acidente de Mariana trazendo novas obrigações, das quais, se destaca a criação da obrigatoriedade de apresentação do Plano de Segurança de Barragem - PSB acrescido do Plano de Ação e Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM para o caso de barragens classificadas com Dano Potencial Associado de

Médio a Alto, a obrigação da emissão semestral da Declaração de Condição de Estabilidade – DCE e as Inspeções Quinzenais.

Outro marco normativo foi a promulgação da Resolução nº 13 de 2019 (ANM, 2019) que estabeleceu a proibição definitiva das barragens de alteamento à montante determinando prazos para descaracterização das barragens já existentes além de proibir a existência de instalações como escritórios e refeitórios na Zona de Autossalvamento – ZAS além da obrigação da automatização do monitoramento das barragens cujo Dano Potencial Associado - DPA é classificado como alto. A resolução foi assim elaborada como resposta da Agência ao acidente de Mariana.

Ainda no ano de 2019 é promulgada no estado de Minas Gerais a lei estadual nº 23291 (MINAS GERAIS, 2019) que proíbe também a construção de barragens pelo método à montante assim como determina a descaracterização das existentes.

Minas Gerais foi um pouco mais além do que o resto do país nesta questão, pois condiciona ainda o licenciamento ambiental para a construção de novas barragens de disposição de rejeitos, bem como alteamento e expansão daquelas já existentes, mediante comprovação por parte do empreendedor, de que não há alternativas viáveis pelo ponto de vista técnico e econômico que não seja a disposição convencional de barragens e ainda deixa explícito que se deve priorizar as alternativas que promovam o desaguamento de rejeitos (MINAS GERAIS, 2019).

Todas essas regulações, condições e impedimentos por parte do poder público, acrescido da depreciação da imagem pública de mineradoras que detém barragens de rejeito, aos riscos financeiros, de impactos ambientais e principalmente de perda de vidas humanas em um possível colapso de barragem fazem com que a disposição convencional de rejeitos em polpas seja inviabilizada em muitos casos.

A alternativa que se mostra mais promissora para essa questão é a aplicação de métodos que visam a diminuição da umidade dos rejeitos de forma que possibilite o seu posterior empilhamento diminuindo assim os impactos ambientais, risco e danos potenciais em casos de desestabilização das pilhas, mesmo que a aplicação desses métodos implica em custos adicionais de CAPEX e OPEX.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é propor alternativas para a disposição de rejeitos de Tapira com base nos resultados dos ensaios preliminares de desaguamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- I. Estudar as tecnologias de desaguamento de rejeitos;
- II. Estudar as tecnologias de disposição não convencional de rejeitos;
- III. Estudar a geração dos diferentes tipos de rejeitos no Complexo Mineral de Tapira;
- IV. Analisar os resultados obtidos em ensaios preliminares de desaguamentos de rejeitos fosfáticos da mina de Tapira;
- V. Propor soluções para a disposição dos rejeitos gerados em Tapira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESAGUAMENTO DE REJEITOS

Quando começamos a pensar na possibilidade de empilhamento de rejeitos em substituição ao método convencional de barragens, o primeiro desafio é diminuir a quantidade de água presente nas polpas de rejeitos que na sua maioria proveem de processos em meios aquosos nas usinas. Desta forma, a primeira parte do estudo se prende a mapear as possíveis operações unitárias de separação sólido-líquido e suas respectivas viabilidades técnico-científicas de forma que se consiga condicionar um rejeito que tenha características geotécnicas que possibilitem o seu posterior empilhamento.

As operações de separação sólido-líquido ou também chamadas de operações de desaguamento visam “reduzir a umidade dos produtos de operações unitárias de tratamentos de minérios para a sua utilização final” (CHAVES, 2004).

O teor de umidade (w) é obtida pela Equação 1.

Equação 1

$$w = \frac{M_w}{M_s + M_w} \times 100$$

Sendo,

M_w : Massa de água.

M_s : Massa de sólidos.

Atrelado ao conceito de teor umidade, temos também o Teor de Sólidos (P) definido pela *Equação 2*.

Equação 2

$$P = \frac{M_s}{V} \times 100$$

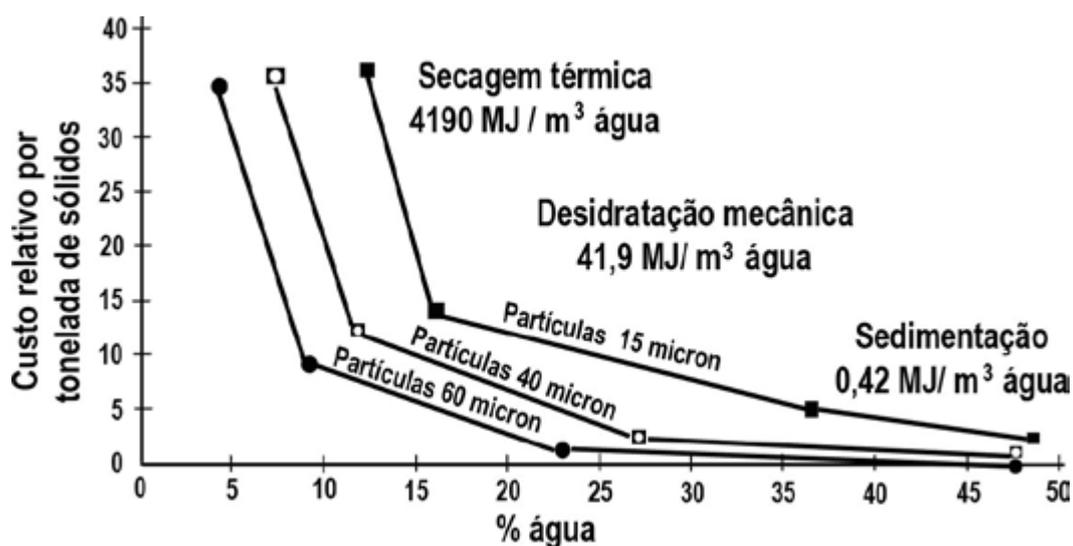
Sendo,

V: Volume Total.

Importante frisar que existem definições diferentes de teor de umidade e sólidos, a Equação 1 e Equação 2 tratam-se das definições usadas na mineração, entretanto, na geotecnia o teor de umidade é definido de outra forma. Neste trabalho, usaremos as definições da mineração, pois grande parte da bibliografia utilizada trabalha deste modo.

O método de desaguamento a ser escolhido é dependente de uma série de características do rejeito, a mais importante delas é a distribuição granulométrica dos rejeitos (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010). A Figura 1 mostra que quanto menor a granulometria do material, maiores serão os custos para o seu desaguamento, também é relacionado o teor de sólidos com o custo relativo.

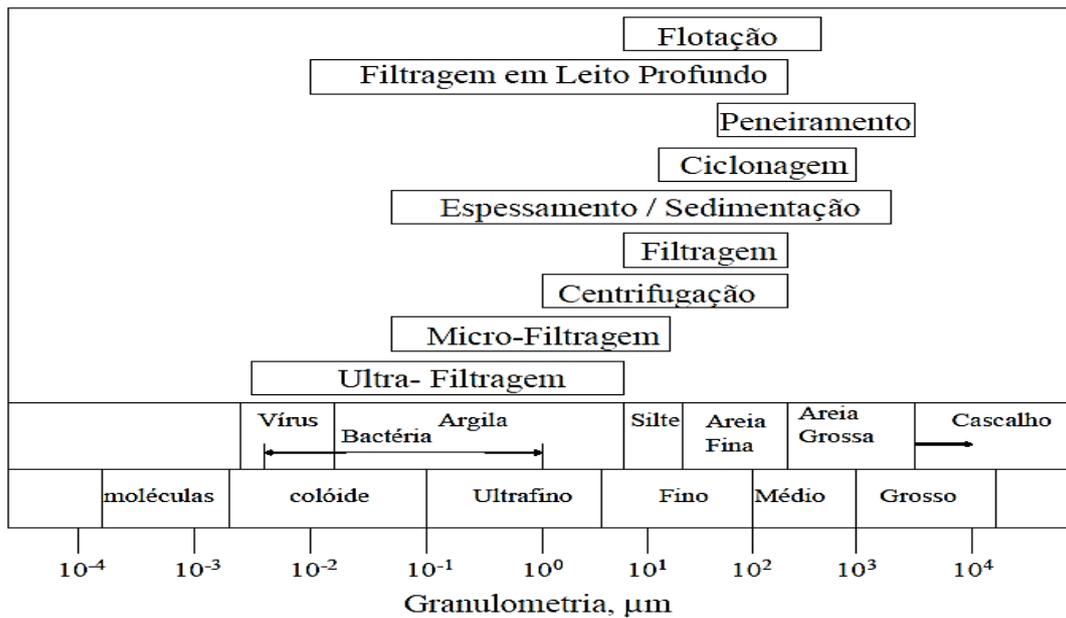
Figura 1- Custo da operação unitária para desaguamento em função do tamanho.



Fonte: (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010, p. 638)

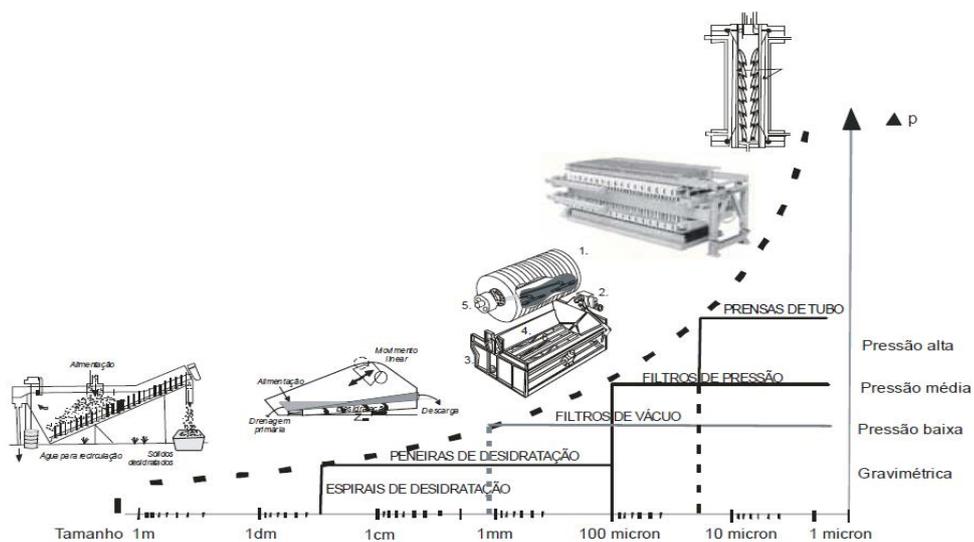
A granulometria interfere nas eficiências dos processos de diversos modos, na permeabilidade das tortas geradas, na velocidade de sedimentação, no entupimento dos meios filtrantes, no aumento de área superficial e etc. A Figura 2 e a Figura 3 fazem também relações com os diversos métodos e a granulometria do filtrado.

Figura 2 - Técnicas de desaguamento em função da granulometria.



Fonte: (VALADÃO, 2008)

Figura 3 - Tipos de equipamento de desaguamento em função do tamanho de partícula



Fonte: (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010)

Mas existem também outras características dos rejeitos que influenciam nos processos, como a forma dos grãos, o teor de sólidos e vazão da alimentação, a reologia da polpa.

As diferentes operações unitárias podem também ser aplicadas em conjunto, podendo também fazer uso de operações de classificação granulométricas para aplicar diferentes rotas de processo a determinadas faixas com o objetivo de otimizar o processo.

Quando se trata de filtragem de concentrado de minérios, existe já um domínio do assunto, a filtragem de rejeitos é algo ainda novo para a indústria, entretanto, como apresentado, há uma grande procura para se conhecer e aplicar esses processos.

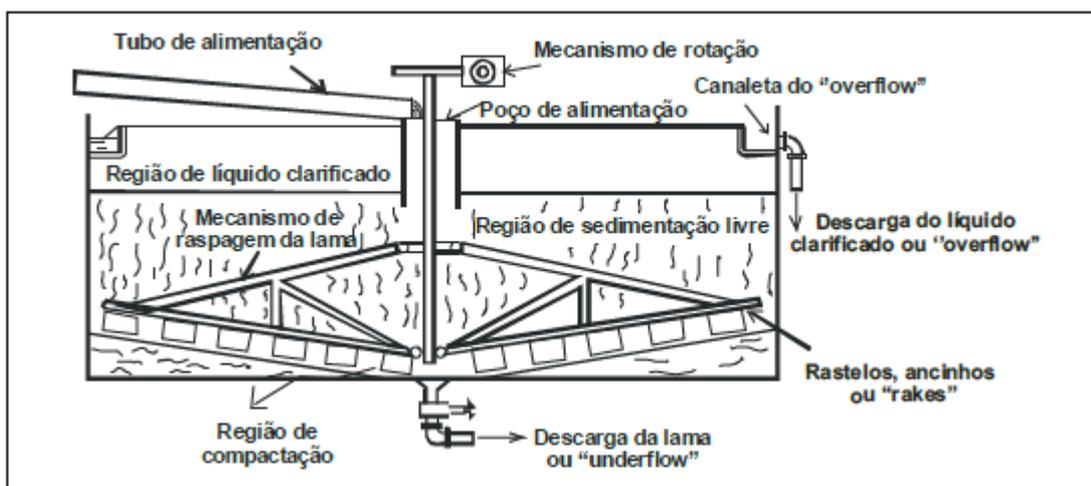
2.1.1 Espessamento

O Espessador usa o fenômeno de sedimentação para a obtenção de um produto com maior porcentagem de sólidos, chamado de *underflow* e água clarificado com a presença de poucas partículas sólidas, chama de *overflow*.

A sedimentação consiste no fenômeno em que partículas em suspensão em uma polpa tendem a se mover para baixo por ação da força gravitacional, a velocidade desse movimento é dependente da forma das partículas e principalmente do tamanho das partículas, observa-se que quanto maior o tamanho das partículas, mais rápidas elas tendem a se depositar no fundo do recipiente.

O espessador convencional (Figura 4) é um equipamento em forma de cilindro que recebe no centro a sua alimentação de polpa, possui nas bordas uma calha que coleta a água clarificada (*overflow*) e no fundo ao centro uma abertura de coleta da polpa espessada (*underflow*), nesta região há o adensamento da polpa promovido pelo peso das camadas superiores. Possui também um rastelo, chamado *Rake* que dentre várias funções, desempenha o papel de conduzir a polpa espessada para o centro e impedir que aconteça o aterramento do espessador (CHAVES, 2004), esse componente é acionado por motores ao centro. Os espessadores podem ser alimentados com polpas constituídas de 1 a 50% de teor de sólidos tendo como *underflow* polpas variando de 10 a 75% (REZENDE NETO, 2016).

Figura 4 - Desenho esquemático de um espessador convencional



Fonte: (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010, p. 656)

Para o dimensionamento desses equipamentos, é usado o teste de proveta (SAMPAIO, FRANÇA e BRAGA, 2007), que visa a obtenção da velocidade de sedimentação da polpa, essa velocidade sendo muito grande e aliada a uma alta vazão de alimentação resulta em espessadores com grandes diâmetros, o que despence um alto CAPEX além de ocupar um grande espaço na planta.

Para melhorar a eficiência desse equipamento, pode-se fazer uso de polímeros como agentes aglomerantes para aumentar a velocidade de sedimentação, porém acrescentando um custo ao processo.

Para o espessamento de rejeitos, o *Deep Cone* pode ser uma alternativa, de acordo Neto (2016) “Os espessadores *Deep Cone*, também chamados de espessadores de cones profundos, produzem um *underflow* com alta concentração de sólidos e pouca água, produto denominado pasta mineral”. O *Deep Cone* é constituído por um tanque de altura maior em relação ao diâmetro, é operado usando também a adição de aglomerantes. Possui uma operação complexa, para isso pode ser automatizado instalando na saída do *overflow* um gravímetro de medição instantânea fornecendo a densidade da polpa, dosadores de reagentes e atuando em sintonia com as bombas de alimentação. O *Deep Cone* tem a vantagem de requerer menor área para a instalação e produzir polpas mais espessas, Neto (2016) estudou a sua utilização para a produção de pastas de rejeitos fosfáticos.

A operação de espessamento comumente se apresenta como operação auxiliar nos desaguamentos de polpas, antecedendo assim outras operações. Entretanto, pode-se atingir a consistência de pasta viabilizando sua deposição direta (REZENDE NETO, 2016).

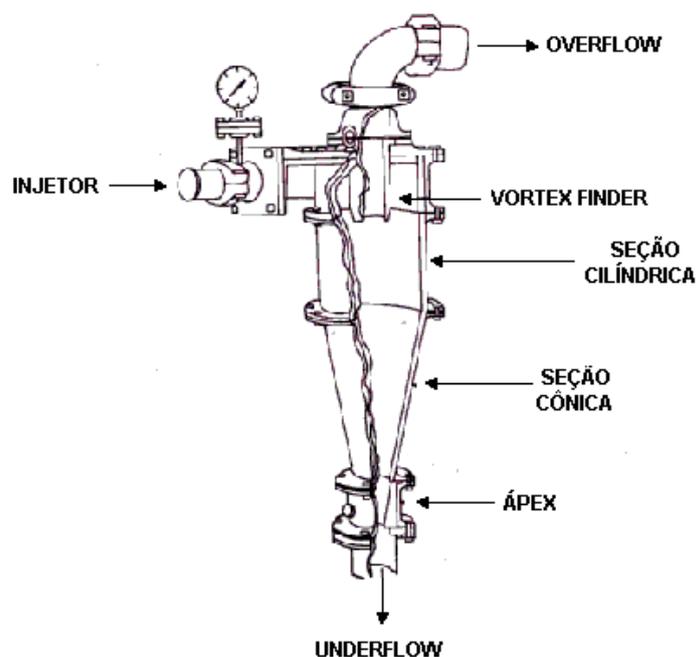
Importante salientar que o espessamento de rejeitos já é utilizado pelas empresas que depositam a polpa em barragens e tem o objetivo de recuperação parcial de água que pode ser recirculada no processo, além de diminuir o volume de polpa a ser enviada a barragem.

2.1.2 Hidrociclonação

A ciclonação é uma operação de classificação que pode ser adaptado de modo satisfatório para o desaguamento de polpas, em tratamento de minérios é feita sempre em meio úmido, por isso é chamada também de hidrociclonação (CHAVES, 2002) sendo o equipamento conhecido como hidrociclone. A Figura 5 esquematiza um hidrociclone, ele consiste em um cilindro acoplado em um cone que possui 3 aberturas, o injetor que recebe a polpa de alimentação, a saída do *underflow* (*ápex*) e a saída do *overflow* (*vortex*).

A polpa é injetada no equipamento e movimentada de forma tangencial no cilindro formando um redemoinho no interior. As partículas mais grosseiras e densas tendem a ser aproximadas da parede e para baixo as partículas mais finas e menos densas e grande parte da fase líquida tendem a ir para o centro e para cima (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010), desta forma o *overflow* se apresenta numa polpa mais diluída e fina e o *underflow* se apresenta em uma polpa mais densa e concentrada.

Figura 5 - Representação Esquemática de um hidrociclone convencional



Fonte: (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010, p. 268)

O hidrociclone é um equipamento muito versátil pois alterando a sua geometria pode-se conseguir diferentes desempenhos. Para adapta-lo à operação de desaguamento se varia o diâmetro do *ápex*, quanto menor, a tendência é que mais partículas sólidas saíam por ele obrigando a água a sair pelo *vortex* (CHAVES, 2004).

É geralmente utilizado como baterias de hidrociclones operando em paralelo, seus custos de aquisição e operação são relativamente baixos, ocupam pequenos espaços e podem ser alocados ao ar livre. São sensíveis a mudanças de pressão e porcentagem de sólidos na polpa, por isso demanda controle fino tendo como possível solução a automatização da operação. Soma-se a isso a presença de lamas que interferem na viscosidade da polpa reverberando na hidrodinâmica interna.

A hidrociclonagem pode ser uma operação auxiliar no desaguamento de polpas, preparando o material para operações subsequentes. Na indústria, tem-se o uso, por exemplo, nos desaguamentos de polpas adequando-as para o transporte por mineroduto, caso de Tapira-MG (CHAVES, 2004).

Já para rejeitos, é largamente usado para recuperar água e depositar menor volume nas barragens, além de ser usado com intuito de classificação de polpa para depositá-la de

forma estratégica em uma barragem, conduzindo o *underflow* mais grosseiro para se depositar mais perto do maciço e o *overflow* mais fino se depositar mais longe do maciço da barragem, tendo assim um maior controle da permeabilidade da estrutura.

2.1.3 Filtragem

Pode-se definir a filtragem como uma “operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido” (GUIMARÃES, 2011).

No caso da indústria mineral o produto desejado são as partículas que ficarão retidas no meio filtrante formando uma “torta” ao fim da operação, o líquido que passa através da torta é denominado de filtrado. Esse meio filtrante pode ser de tecidos ou telas metálicas e é a barreira física que fica em contato com a polpa.

O processo pode se dar pela ação da gravidade ou mesmo através de uma diferença de pressão entre os meios (ΔP), se diferenciando os dois tipos de filtragem:

- a) à vácuo: quando é criada uma pressão negativa do lado oposto ao da polpa, puxando o fluído;
- b) à pressão: quando é criado uma pressão positiva na polpa, forçando o fluído a se deslocar para o outro lado do meio filtrante.

Como ponto de partida para estudar a teoria que o envolve a filtragem, devemos começar com a Lei de Darcy (Equação 3) adaptada por Guimarães (2011).

Equação 3

$$Q = \frac{K \cdot \Delta P \cdot A}{\mu \cdot L} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R}$$

Sendo,

Q= Fluxo do filtrado

K = Permeabilidade do leito

ΔP = Diferencial de Pressão através da torta e do meio filtrante

A = Área filtrante

μ = viscosidade do filtrado

L = espessura do meio filtrante + torta

$R = L/K$ = resistência oferecida ao leito de filtrado

Da Equação 3 pode-se observar que a filtração é influenciada pelo K , a permeabilidade do leito. De modo análogo a ao tratado em Geotecnia, quanto mais fina a granulometria das partículas menor será a permeabilidade, pois a tendência é que as partículas tenham espaços menores entre si dificultem a passagem dos fluídos. Isso implica que quanto mais fino o material a ser filtrado, maiores deverão ser o ΔP e a área de filtros requeridos, aumentando assim os custos de capital e operação de uma planta de filtração. Esses parâmetros variam ao longo do processo, pois a torta vai aumentando de tamanho ao decorrer, de forma que de início o meio filtrante tem papel protagonista, mas depois a torta em formação tem maior influência (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Um dos principais problemas do processo é a colmatação do meio filtrante, ou cegamento do filtro, ou seja, as partículas finas incrustam os espaços das telas, esse fenômeno se agrava com o aumento da presença de material fino na polpa. Para a remediação é adotado uma operação adicional de limpeza dos filtros.

A filtração é etapa final do processo de desaguamento de polpa, segundo Chaves (2004). É usual a alimentação conter em torno de 60% de sólidos o que demanda geralmente processos anteriores como o espessamento ou hidrociclonagem já mencionados. O seu produto tem por volta de 15% de teor umidade, valor que possibilita a expedição do minério, no caso de filtração de concentrado ou a disposição em pilhas, no caso de filtração de rejeitos, tema deste trabalho.

É recomendado que se ΔP requerido seja menor que 1 Bar no caso filtrações à vácuo, se maior, recomenda-se o uso de filtro prensa (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

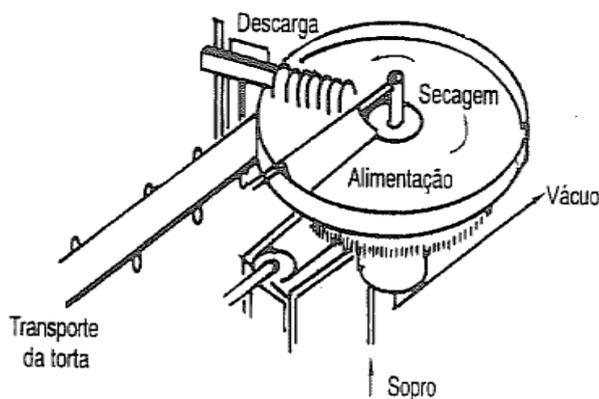
Mais à frente se detalhará os principais métodos de filtração usados na indústria mineral.

2.1.3.1 Filtração à Vácuo

São quatro os principais tipos de equipamentos usados na indústria mineral: mesa, correia, disco e tambor. Todos eles trabalham de forma contínua. Segundo Chaves (2004), podem ser elencados quatro estágios no processo de filtração: formação da torta, drenagem, descarga da torta e lavagem do filtro, este último mais usado em polpas com presença de finos que “cegam” o meio filtrante.

O filtro mesa é esquematizado na Figura 6, ele é constituído por uma superfície circular onde a polpa é depositada por meio da gravidade sobre o meio filtrante. A mesa gira em torno de um eixo vertical, com a polpa sofrendo sucção enquanto está sobre as câmaras de vácuo e depois passa por sopros que desgrudam a torta que é coletada por espirais no fim da volta. Este processo tem bom desempenho com polpas grosseiras apenas, pois este equipamento inviabiliza a lavagem do filtro o que limita o uso para polpas com muitos finos.

Figura 6 – Desenho Esquemático de um filtro tipo mesa

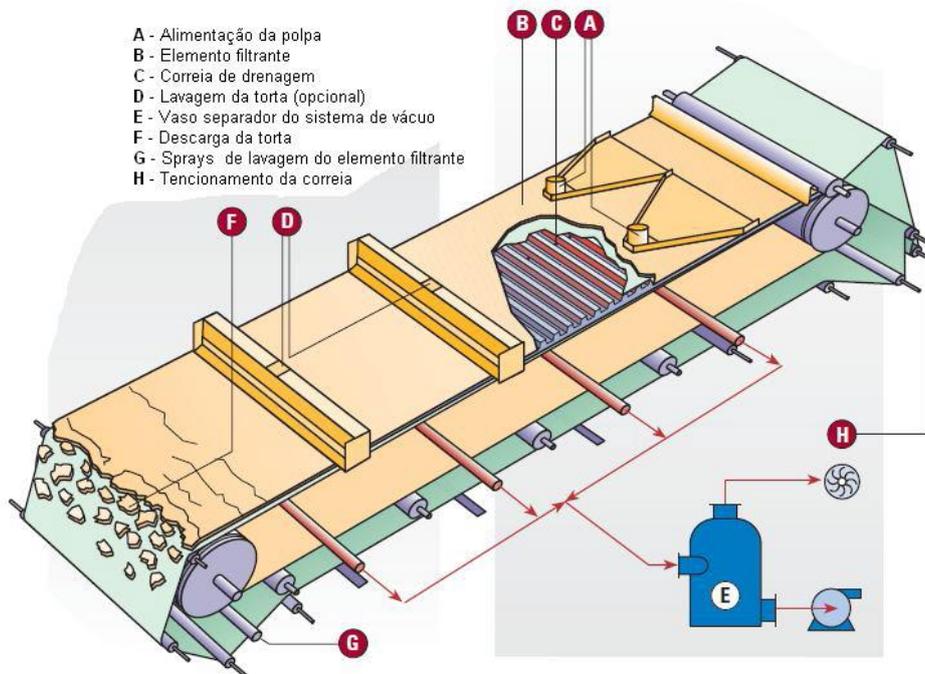


Fonte: (CHAVES, 2004, p. 131)

Os filtros horizontais de correia, esquematizado na Figura 7 são alimentados com a polpa na sua extremidade e assim como no filtro de mesa a polpa é transportada para

uma zona de sucção e no fim é descartada. Logo depois, pode também haver uma etapa de desobstrução da manta com jatos pressurizados.

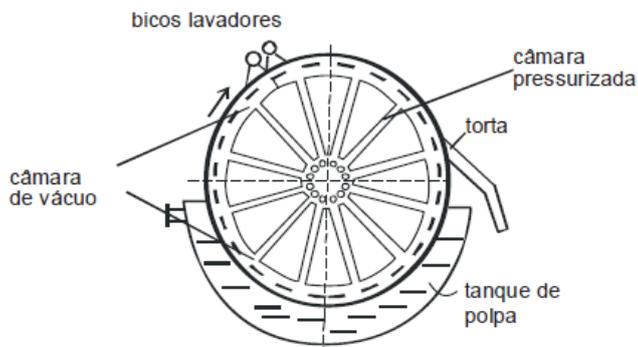
Figura 7 – Desenho esquemático de filtro tipo correia



Fonte: (GUIMARÃES, 2011, p. 33)

O filtro de tambor (Figura 8) é composto por um cilindro girando em torno do próprio eixo que está parcialmente mergulhado no tanque de polpa, esta região é submetida ao vácuo, succionando a água e aderindo a torta na sua parede, conforme o cilindro gira ele eleva a torta até um ponto onde há injeção de ar de dentro para fora levando ao deslocamento dos sólidos com posterior lavagem.

Figura 8 – Desenho esquemático de um filtro tipo tambor



Fonte: (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010, p. 666)

O filtro de disco (Figura 9) é um cilindro que tem incrustado uma série de discos perpendiculares ao eixo que tem funcionamento muito parecido com o filtro do tipo tambor, o polpa fica no tanque abaixo, ela é succionada e a torta é posteriormente coletada, mas com a vantagem de ter uma grande capacidade de filtragem ocupando uma pequena área do chão de fábrica. Nos dois tipos, tanto tambor como discos, é por vezes preciso o funcionamento de agitadores mecânicos no tanque para manter os sólidos em suspensão. Tipicamente, para a filtragem de *pellet feed* nas mineradoras de ferro, a alimentação é com o teor de sólidos na ordem de 63% produzindo uma torta de teor de umidade de 9 a 13% (GUIMARÃES, 2011). Para prevenir o entupimento do meio filtrante segundo Chaves (2004) podem ser usadas telas tipo finlandesas que são flexíveis, expandido as aberturas quando são sopradas, liberando assim as partículas incrustadas.

Figura 9 – Filtro de Disco Convencional Modelo VSF 120/10 - Andritz



Fonte: (GUIMARÃES, 2011, p. 33)

2.1.3.2 Filtragem à Pressão – Filtro Prensa

A filtragem a pressão se difere da filtragem a vácuo em dois aspectos principais: usar a diferença de pressão positiva sobre a polpa e operar de forma descontínua, em batelada. O equipamento usado é chamado de Filtro Prensa (Figura 10). Ele tem aplicação para

polpas contendo material muito fino (Figura 3). Segundo Silva (2016) o filtro prensa opera com polpas de 0 a 10 μm , sendo aplicado no desaguamento de lamas muito finas e diluídas.

Sua operação pode ser dividida em 3 etapas básicas esquematizados na Figura 11 :

- 1°. Enchimento: Momento em que há o bombeamento de polpa para o preenchimento da câmara do filtro, e é feito por bomba centrífuga;
- 2°. Filtragem sob pressão máxima: A pressão de alimentação é mantida por um tempo sem a injeção de polpa, podendo ser usado uma bomba de pistão para aumentar ainda mais a pressão. O filtrado é expulso pelas ranhuras das placas.
- 3°. Descarga da torta: Por fim, as placas se separam e é injetado uma rajada de ar para favorecer o deslocamento da torta que cai por baixo do equipamento.

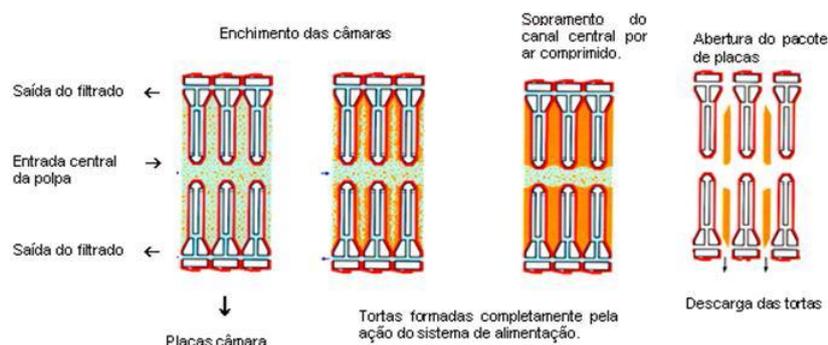
Pode haver uma etapa adicional de lavagem para a desobstrução das ranhuras através de jatos de água.

Figura 10 – Filtro Prensa modelo FLOWPRESS 1500 - GRABE



Fonte: (GRABE - EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS, 2003)

Figura 11 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara



Fonte: (GUIMARÃES, 2011, p. 36)

As pressões usadas chegam a 8 bar na 1ª etapa e a 16 bar na etapa na 2ª etapa (GUIMARÃES, 2011). Devido a essas pressões altas, a operação desses equipamentos é bastante complexa e cara, há muito abrasão do material de condução e das placas filtrantes, além dos custos de energia elétrica do bombeamento. Por outro lado, o material retido é muito bem compactado e com pouca umidade, características boas para o manuseio e a disposição, além do filtrado apresentar poucas impurezas (SILVA, 2016).

2.1.4 Peneira Desaguadora

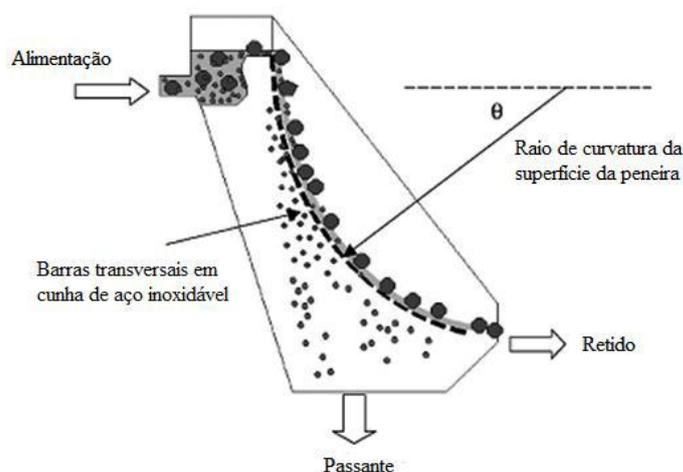
O peneiramento convencional é usado para a separação de partículas em tamanhos e é largamente usado nas plantas de tratamento de minérios. Os equipamentos utilizados são as grelhas e peneiras que podem ter mecanismos de movimento ou não, basicamente são formados por uma superfície com aberturas no tamanho em que se deseja a separação, de forma que partículas maiores ficam retidas (*oversize*) e partículas menores passam pelas aberturas (*undersize*). Entretanto, pode se adaptar esse sistema para a separação não apenas de partículas, mas também da fase líquida da polpa, encontrando aqui seu uso como peneiras desaguadoras.

Segundo Milhomem (2013), dois são os equipamentos comumente usados no processo de desaguamento na indústria mineral, são as peneiras DSM (*Dutch State Mines* –

empresa holandesa desenvolvedora) e as peneiras vibratórias com inclinação ascendente, isto é, no sentido da descarga.

As peneiras DSM são peneiras fixas e curvas como esquematizado na Figura 12. A alimentação de polpa é por cima e no passar da polpa pela superfície de barras transversais as fases são separadas. Para o caso de desaguamento, necessita-se que o tamanho da abertura entre as barras seja menor que as menores partículas presentes na polpa.

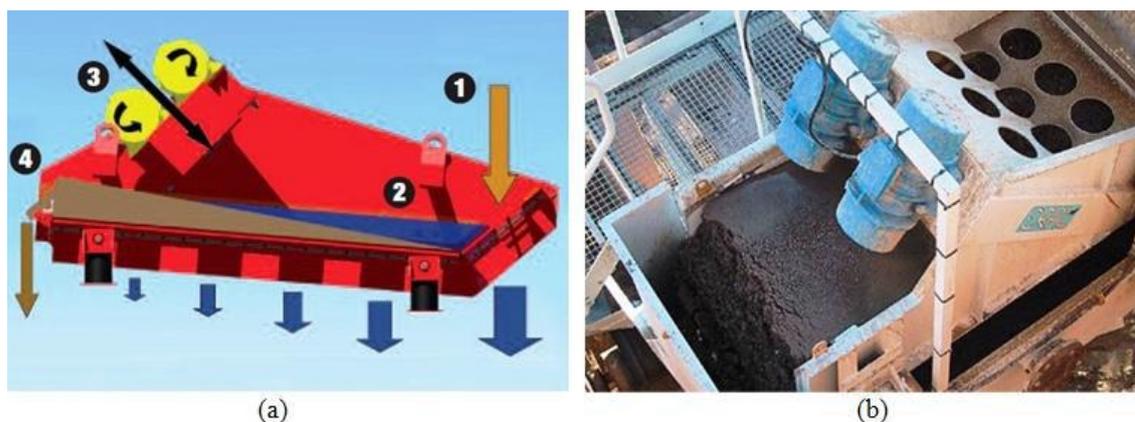
Figura 12 – Exemplo de peneira DSM



Fonte: (MILHOMEM, 2013, p. 38)

Segundo Chaves (2004), as peneiras vibratórias para polpas na faixa de tamanho de partículas de 6,35 cm a 0,3mm e 43 a 60% de teor de umidade, nesta faixa de umidade, é possível a retenção de partículas maiores que a abertura da peneira, uma vantagem para o desaguamento, com um resultado de material com teor de umidade na faixa de 10 a 15% chegando até 7 % (MILHOMEM, 2013). Na Figura 13 tem-se a representação esquemática do equipamento, alimentação é feita na parte inferior (1), a água passa sobre a tela e fica ao fundo (2), o movimento da polpa sobre a tela filtrante é gerada pelo motor que pulsa em direção a descarga (3), há uma inclinação ascendente que ajuda no desaguamento (4).

Figura 13 – Representação esquemática da peneira desaguadora (a); exemplo de peneira desaguadora industrial



Fonte: (MILHOMEM, 2013, p. 45)

O peneiramento tem a vantagem de ser uma operação muito econômica se comparado aos outros métodos de separação sólido-líquido estudados, pois os custos com a aquisição de equipamento e a operação é barato devido a simplicidade, além da excelente eficiência. Entretanto, a faixa de aplicação é limitada quanto ao tamanho de partículas das polpas de alimentação, pois problemas como a incrustação das aberturas da tela e a baixa permeabilidade da torta impossibilita o uso para polpas com presença de material fino.

2.2 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Podemos definir 4 modos principais de disposição de rejeitos: disposição em barragens convencionais, disposição em cava subterrânea (métodos como o “corte e enchimento”), disposição em pasta e disposição de rejeitos desaguados em pilhas. Por fim, há ainda a possibilidade de reaproveitamento do rejeito na produção de novos bens.

A disposição de barragens, em uma análise simplória, é o método mais barato e simples e por anos foi o modo como a grande maioria das mineradoras do Brasil dispuseram os seus rejeitos. Entretanto com os recentes acidentes, maior regulação do poder público, e imagem pública abalada as grandes empresas estão buscando alternativas.

A disposição de rejeito em cavas subterrâneas já é uma prática largamente usada na mineração *underground*. O rejeito é usado para preenchimento de cavidades exauridas e serve também de preenchimento e suporte para as operações mineiras em alguns métodos de lavra como *cutt and fill* e *bench stoping*. Nesta aplicação a polpa é chamada de *backfill*, por vezes a polpa recebe aditivos que as conferem capacidade de suporte. Mas, obviamente, esta solução se apresenta apenas nos *sites* onde há exploração subterrânea.

O reaproveitamento de rejeitos para a produção de novos produtos vem recebendo particular atenção nos últimos anos, como uso na fabricação de pré-moldados usados na construção civil (VALE, 2020) ou na pavimentação de estradas. Todavia, essa alternativa tem algumas limitações. Os pré-moldados produzidos usando os rejeitos tendem a ter pior performance que os pré-moldados feitos a partir de areia e brita extraídas para esse fim, além do que, o volume produzido anualmente torna impossível que todos os rejeitos gerados no Brasil tenham uma reutilização. Entretanto, a alternativa pode ser viável em casos especiais e ajuda a diminuir o montante de material a ser disposto, além de melhorar a imagem pública das empresas.

2.2.1 Disposição de Rejeito em Pasta

Quanto à disposição de rejeitos em pasta (*stacking*) a céu aberto, é uma alternativa promissora principalmente para rejeitos com alta porcentagem de finos que apresentam dificuldades técnicas para o desaguamento. O rejeito passa pelo processo de espessamento usando equipamentos especiais como o *Deep Cone* e com uso de floclantes para aumentar a aglomeração das partículas e produzir uma pasta mais espessa. Rezende Neto (2016) fez um largo estudo com rejeitos fosfáticos para a produção de pastas.

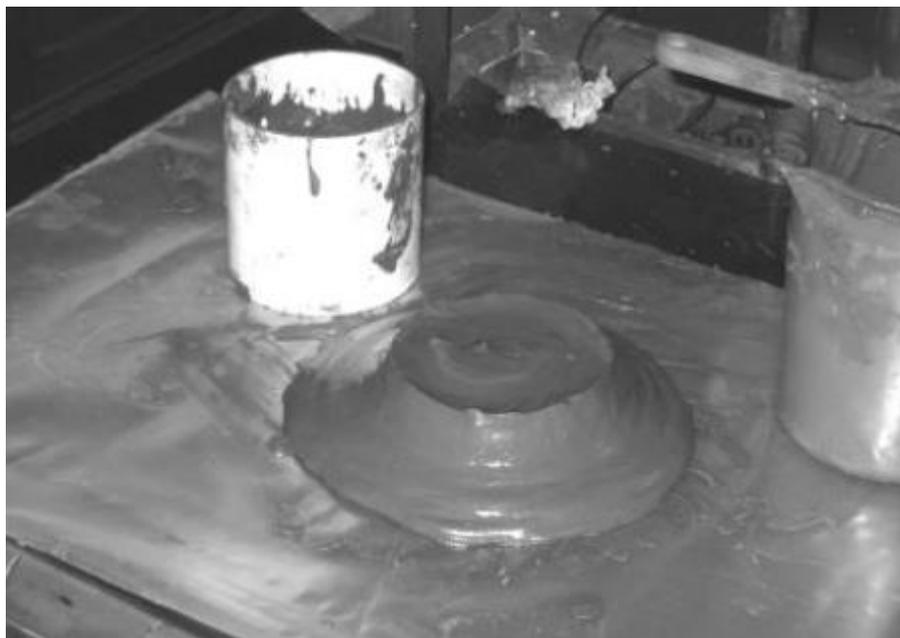
Neste método, o rejeito já espessado é bombeado até o local de disposição e dispensado por uma torre central (Figura 14) ou sistema de canhões. Neste método o rejeito não se sedimenta nem segrega, liberando pouca água.

Figura 14 - *Stacking* com a torre central

Fonte: (REZENDE NETO, 2016, p. 31)

Para a caracterização das pastas é necessário o levantamento de dois parâmetros, o teste de abatimento ou *slump test* (Figura 15) que quantifica o abatimento do material logo após a disposição, e o teste de tensão de escoamento que quantifica qual a tensão necessária a ser aplicada pelas bombas para bombear a pasta na tubulação.

Figura 15 - Slump Test



Fonte: (REZENDE NETO, 2016, p. 57)

Em testes realizados, conseguiu-se um bom desempenho de pastas com 71,98% de teor de sólidos que apresentavam quase nenhum abatimento, com tensão de escoamento na ordem de 250 Pa requerendo o uso de bombas de deslocamento positivo no transporte de material (REZENDE NETO, 2016).

2.2.2 Disposição de Rejeitos Desaguados em Pilhas

As Pilhas de Disposição de Rejeito Desaguado são assim chamadas, pois são formadas por rejeitos que passaram por operações de desaguamento possibilitando a disposição. Nomes alternativos são: pilhas de rejeito não saturado ou também pilha de rejeito filtrado.

No Brasil, sua aplicação é recente, mas este método já é largamente usado no mundo, em países como Chile, Austrália, Estados Unidos e Canadá (SILVA, 2016), principalmente em locais de clima árido com precipitação muita espaçada e rara. Sendo que, o clima tropical brasileiro com altas médias de precipitação é um dos maiores desafios para pilhas de rejeitos desaguados.

Alves (2020) catalogou as pilhas de rejeito em operação no Brasil, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Pilhas de Rejeito projetadas ou em operação no Brasil

Empreendimento	Local	Tipo de Minério	Empresa
Mina de Cuiabá	Sabará-MG	Ouro	AngloGold
Mina Corrêgo do Sítio	Santa Barbara-MG	Ouro	AngloGold
Planta de Queiroz	Nova Lima-MG	Ouro	AngloGold
Mina de Mirai	Mirai-MG	Bauxita (beneficiamento)	CBA
Minas de Roça Grande	Caeté-MG	Ouro	Jaguar
Mina de Itabirito	Itabirito-MG	Ferro	Herculano
Planta de Ouro Preto	Ouro Preto-MG	Bauxita/alumina	Hindalco
Complexo de Germano	Mariana-MG	Ferro	Samarco
Minas Casa de Pedra	Congonhas-MG	Ferro	CSN
Projeto Aripuanã	Aripuanã-MT	Zinco, Cobre e Chumbo	Nexa
Unidade Vazante	Vazante-MG	Cobre e Zinco	Nexa
Mina Pau Branco	Brumadinho-MG	Ferro	Vallourec

Fonte: Adaptado (ALVES, 2020)

Notadamente, a maioria das pilhas se encontra na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, região dos últimos acidentes com barragens (Mariana e Brumadinho). Um caso interessante é o Projeto Aripuanã da Nexa Resources que está em fase de implantação. Alves (2020) relata que inicialmente se previa a disposição dos rejeitos em barragens, mas para seguir a tendência do setor, o plano diretor foi reformulado para dispor o rejeito gerado em pilhas com uma pequena parte destinada para o enchimento de galerias subterrâneas.

Como vantagens a disposição de rejeitos em pilhas Boccamino (2017) elenca o aumento da capacidade de aporte de rejeitos, maior aproveitamento da água do processo, aumento da segurança, maiores facilidades para o fechamento das estruturas além de menores riscos de contaminação ambiental.

2.2.2.1 Fundação

O material da fundação deve oferecer condições geotécnicas adequadas para receber todo o peso adicional das pilhas, por isso, as a fundação das áreas candidatas a receber as pilhas devem ser minuciosamente estudadas para evitar problemas futuros. Sobre a importância da fundação na estabilidade da pilha temos que “a fundação da pilha é o fator mais importante com relação à estabilidade global da mesma, já que uma fundação inconsolidada proverá uma estrutura altamente deformável e possivelmente instável” (SANTOS, 2021).

Leão (2021) elenca uma série de parâmetros a serem investigados na fundação, como sua litologia, estratigrafia, geologia estrutural, condição do nível d'água e condutividade hidráulica, características geomecânicas, entre outros.

Para essa investigação são inúmeros os métodos que podem ser usados, tanto diretos como indiretos, como sondagens para coleta de amostras indeformadas ou não, SPT, CPTu e os métodos geofísicos somado também os ensaios laboratoriais das amostras coletadas. A definição dos ensaios, execução e interpretação dos resultados é de suma importância para aumentar a confiabilidade da estrutura a ser construída.

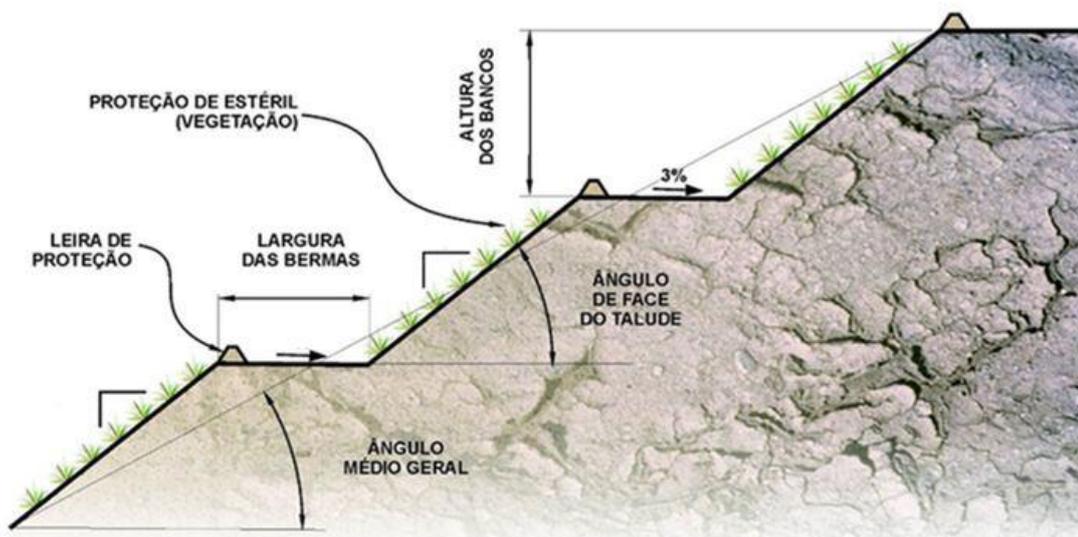
Com o conhecimento da fundação em mãos, pode ser preciso alguma medida de tratamento desta, como retirada de material inconsolidado, tratamento com impermeabilizantes químicos ou a instalação de geomembranas.

2.2.2.2 Geometria das Pilhas

As pilhas de rejeitos têm geometria muito semelhante às pilhas de estéril amplamente usadas pelas mineradoras. Entretanto, é importante frisar que são estruturas completamente diferentes no seu comportamento geotécnico.

Na Figura 16 temos esquematizado em seção a geometria típica de um empilhamento, os valores de altura dos bancos (h), a quantidade de bancos (n), ângulo da face do talude (α) e a largura das leiras (l) estão relacionados e a interação desses resulta no ângulo médio geral (β) (Equação 4).

Figura 16 - Geometria Típica de um Empilhamento



Fonte: (BOCCAMINO, 2017, p. 84)

Outros aspectos importantes são a área da base da pilha e a área do topo da pilha (função dos equipamentos de operação). De posse de todos esses parâmetros torna possível o cálculo do volume final (V_{final}) a ser depositado, que por sua vez, sabendo a taxa de produção de rejeitos (Q), saberemos a vida útil da pilha (T) (Equação 5).

Equação 4

$$\beta = \tan^{-1} \frac{nh}{n - 1(l + \frac{h}{\tan \alpha})}$$

Equação 5

$$T = \frac{V_{final}}{Q}$$

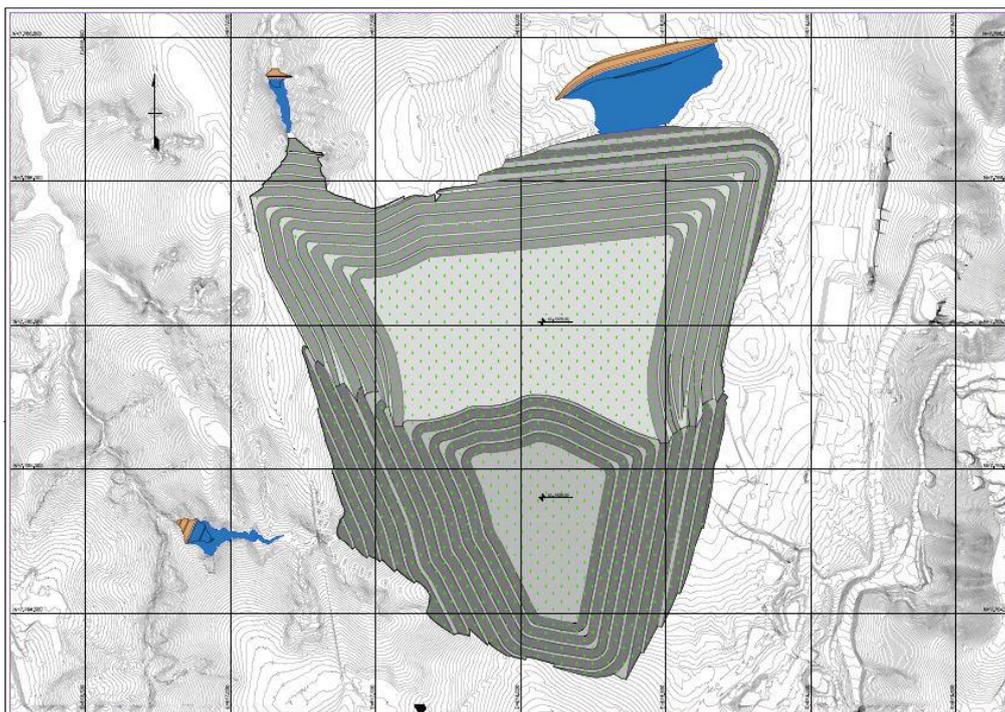
As bermas devem ter uma leve inclinação longitudinal e transversal de ângulo em torno de 1° ou 2° para que o fluxo de água pluvial seja conduzido até as calhas e não cause erosão nas estruturas. Têm-se também as leiras de proteção que servem não somente para a proteção dos equipamentos e pessoas, mas também para servir como barreira de eventuais fluxos de materiais que podem ocorrer nas bermas superiores.

2.2.2.3 Contenção de Sedimentos

Um importante aspecto a se considerar são os sedimentos gerados por essas pilhas que podem causar impactos ambientais na vizinhança da estrutura. Segundo Santos (2021) a taxa de produção de sedimentos pode chegar a 1000 m³/ha/dia.

Esses sedimentos podem ser carreados através das águas pluviais por um processo de erosão laminar. Para remediar há uma importante estrutura auxiliar nas pilhas de rejeitos filtrados que são os diques de contenção de sedimentos. Esses diques tem a função de impedir que os sedimentos carreados saiam dos limites do projeto. A Figura 17 mostra um exemplo de projeto da pilha. Observa-se que se prevê três diques, um em cada vale que compreende a pilha. Os diques são dimensionados de acordo o histórico de chuvas da região e da área de drenagem compreendidas. De tempos em tempos é preciso a escavação do lago do dique para a remoção do material depositado.

Figura 17 - Projeto de Pilha de Rejeito Filtrado com os diques de contenção de sedimentos



Fonte: (BOCCAMINO, 2017, p. 75)

Outra forma de transporte importante de material particulado é através dos ventos. Isto requer um estudo das correntes de ventos existentes na área e o planejamento de formas de mitigação como a instalação de barreiras artificiais ou vegetais. Aliado a isso, pode ser implementada uma cobertura vegetal na superfície das pilhas e durante a operação aspergir com água para diminuir a poeira.

2.2.2.4 Estabilidade

Um aspecto central em projetos de pilhas de rejeito é determinar a estabilidade da futura estrutura, pois ela deve oferecer segurança aos operadores da pilha, para o complexo mineral em que está inserida, e para a vizinhança. Quando se fala em estabilidade geotécnica da pilha, se quer saber da probabilidade de haver movimentos de massa que causem danos econômicos, ambientais ou de vidas humanas.

Esse grau de estabilidade é comumente quantificado no Fator de Segurança (FS) definido pela Equação 6. O cálculo dessas forças tem uma série de metodologias

diferentes e é feita comumente com o uso dos softwares como o *Slide* da *Rocscience* e o *GeoStudio* da *Geoslope* usando diferentes metodologias como a de Morgenstern-Price e Spencer. Faz-se o cálculo do FS para uma série de superfícies de ruptura possíveis considerando também alguns de cenários, sendo que o menor FS encontrado é o Fator de Segurança da estrutura. Este é o método determinístico.

Equação 6

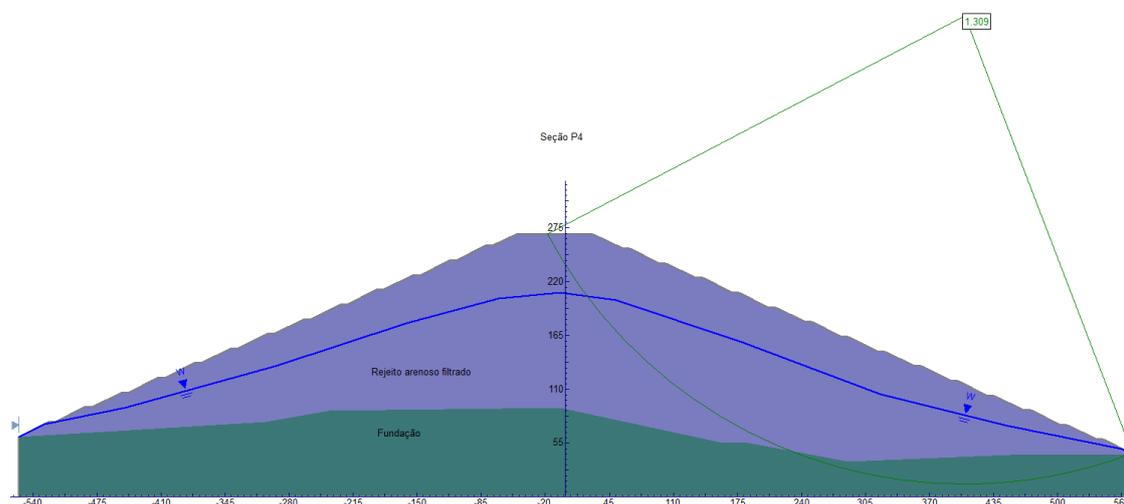
$$FS = \frac{\text{Forças Resistivas}}{\text{Forças de Distúrbio}}$$

Fonte: (SANTOS, 2021)

A Figura 18 é um exemplo de *output* de uma análise de estabilidade determinística, é representado a superfície de ruptura com o menor valor de fator de segurança calculado.

Como não há ainda norma específica para pilhas de rejeito desaguado, como boa prática Santos (2021) recomenda a adoção dos Fatores de segurança mínimos determinados pela norma NBR – 13.028 (ABNT, 2017b) usada para barragens de rejeito de mineração.

Figura 18 – Exemplo de output de análise de estabilidade representando a superfície de ruptura com menor FS



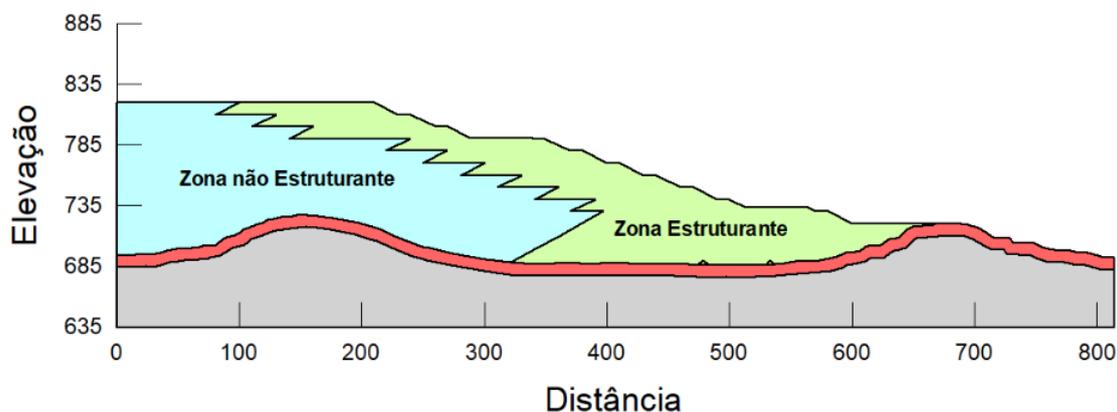
Fonte: (BOCCAMINO, 2017, p. 96)

Entretanto, os parâmetros geotécnicos que são os *inputs* para as análises de estabilidade não são uniformes em toda a extensão da pilha, da fundação e tão pouco por todo o tempo de construção, pois as operações unitárias envolvidas no rejeito são variáveis, desde a lavra, a cominuição, a concentração e a filtragem, o clima no período de

disposição e mudança nas práticas de operação das pilhas. Essas operações se alteram gerando por consequência uma grande variabilidade do material depositado. Para se tratar disso, existem técnicas de análises de estabilidade probabilísticas que incorporam no seus cálculos as variações dos *inputs*, gerando não somente um número de Fator de Segurança, mas sim um conjunto de probabilidades de ocorrência de rupturas, Silva (2016) estudou o emprego dessas técnicas na avaliação de estabilidade de pilhas de rejeitos de alumina.

Uma estratégia para aumentar a segurança das pilhas, diminuir a interferência dessas variações da estabilidade e otimizar a operação da estrutura é a divisão da pilhas em duas zonas (Figura 19). Uma delas é chamada de estruturante, e localizada nas extremidades, dispondo de materiais com melhor desempenho geotécnico. Exemplo desses materiais citem-se os rejeitos dispostos em tempo seco, rejeitos arenosos e estéril. A outra é identificada como não estruturante, e composta de rejeitos dispostos em tempo chuvoso ou que não se conseguiu chegar as condições ideais para a disposição. As zonas são separadas de forma que a superfície de ruptura passe apenas na região estruturante, de modo que apenas ela seja responsável pela estabilidade da estrutura.

Figura 19 - Representação do Zoneamento de Pilhas de Rejeito



Fonte: (LEÃO, 2021)

Um outro fator de grande interferência na estabilidade das pilhas é a presença de água no seu interior, pois a poro pressão age de forma a diminuir a resistência efetiva dos grãos. Para isso, recomenda-se a instalação de um sistema de drenos no interior da estrutura para drenar a água interna e diminuir a poro pressão no maciço.

2.2.2.5 Operação e Monitoramento

A construção aliada ao monitoramento é parte essencial em um bom projeto de pilha. O transporte do material da planta de filtragem para a local de disposição somado à compactação representa o maior custo na disposição dos rejeitos. Na Mina Casa de Pedra esse custo equivale por volta de 60 a 67% do custo total (ALVES, 2020). Por isso a importância de alocar a planta e pilha em locais próximos.

A Figura 20 é uma imagem de uma pilha em operação no Peru. Observa-se os pequenos depósitos onde os caminhões bascularam o rejeito, mais a fundo se vê uma máquina espalhando e compactando o material.

Figura 20 - Pilha de Rejeito Filtrado em Operação da Mina de Cerro Lindo (Peru)



Fonte: (ALVES, 2020, p. 38)

Existem dois parâmetros críticos para a compactação dos rejeitos. O primeiro é a espessura das camadas compactadas, que quanto mais finas, melhor será a uniformidade da compactação e garantia de que a camada terá as características geotécnicas ideais. Entretanto, nesta medida o problema é o custo de operação, que pode até inviabilizar o

projeto. Outro fator é a umidade do material compactado, quanto mais próxima do teor de umidade ótima, melhor será a compactação, mas como já mencionado no item anterior, fatores climáticos e de processo dão ao rejeito grande variabilidade. Deste modo, recomenda-se a implementação de uma pilha teste, ou pilha piloto, de menores dimensões para que se possa estudar quais são as umidades e profundidade de camadas limites, além de poder avaliar como é o comportamento do rejeito empilhado. Isso pode ser realizado através de investigação geotécnica como SPT, CPTu e coletas de amostras indeformadas para ensaios laboratoriais (LEÃO, 2021).

Além disso, é importante o monitoramento contínuo da estrutura no período de construção e depois de construído. É importante instalar instrumentos de monitoramento da água interna como os medidores de nível d'água (INA) e medidores de poro-pressão (PZ), e medidores de vazão nas saídas dos drenos.

Para o monitoramento de deformações é útil a instalação de marcos superficiais e inclinômetros, juntamente com inspeções de campo a fim de identificar anomalias como surgências, recalques anormais e trincas. Completam estas medidas, levantamentos topográficos recorrentes para conferência se as dimensões de projeto estão sendo obedecidas.

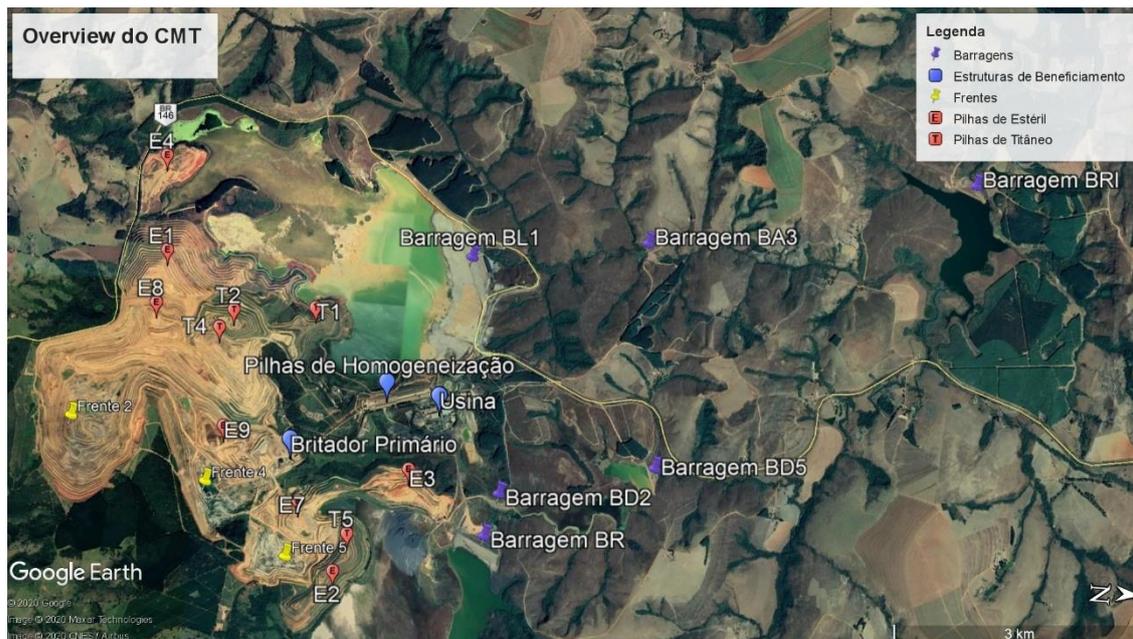
2.3 O COMPLEXO MINERAL DE TAPIRA

O Complexo Mineral de Tapira - CMT se localiza no município de Tapira-MG no vale do Alto Paranaíba, compreende a maior mina de fosfato da América Latina, além de uma planta de tratamento de minérios e 6 barragens.

Segundo Santos, Sobral et al (2002), a jazida de fosfato se encontra no complexo alcalino de Tapira. É uma chaminé ultramáfica-carbonatítica formando uma elipse de eixos de 6,5 e 5,5 km. Para se ter acesso ao minério rico em Fosfato (P_2O_5) são necessários os decapeamentos de 2 camadas. De forma geral, uma primeira camada de estéril flanco composta por solo amarelo-avermelhado que é retirada e deposta em pilhas de estéril, uma segunda camada rica em Titânio que é retirada e depositada em pilhas separadas daquelas de estéril sendo que atualmente o Titânio (TiO_2) não é aproveitado.

Por ano são extraídos por volta de 16 Mton de ROM (*Run of Mine*) contendo em média 8% de P_2O_5 . A lavra se dá por escavação mecânica ou pelo uso de explosivos, a depender do grau de intemperismo da frente que está sendo lavrada. Posteriormente o minério é carregado e transportado até o britador primário por caminhões fora de estrada. Na Figura 21 é apresentada uma imagem de satélite com a identificação dos principais pontos do complexo.

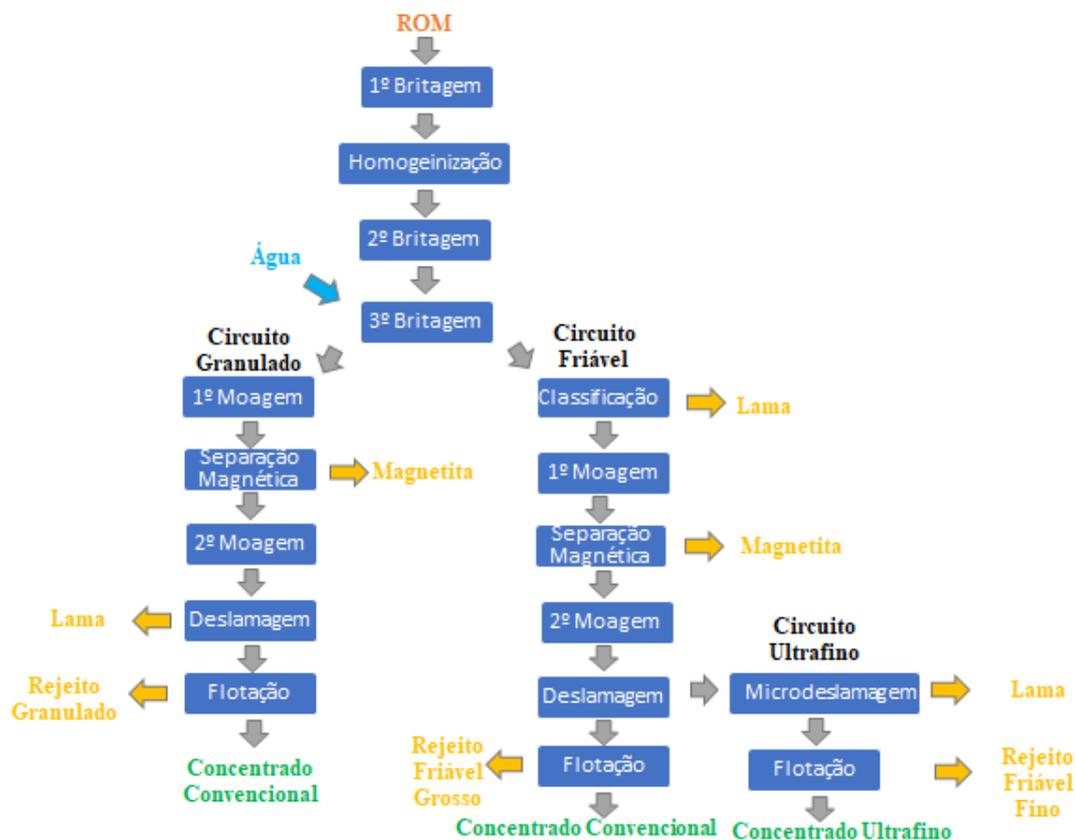
Figura 21 - Complexo Mineral de Tapira com indicação de estruturas notáveis



Fonte: Google Earth

Na Figura 22 apresenta um diagrama simplificado das operações de tratamento de minérios realizadas no CMT com ênfase nas etapas onde são gerados cada tipo de rejeito.

Figura 22 - Fluxograma simplificado dos processos de tratamento de minérios do CMT



O ROM é carregado por caminhões fora de estrada na frente de lavra e descarregado no britador giratório, que constitui a britagem primária. Através de correias o minério é transportado e disposto nas pilhas de homogeneização para posteriormente ser retomado e britado em britador cônico em circuito fechado com peneiras. Logo em seguida o minério passa pela britagem terciária que já é feita por via úmida. Neste ponto o minério é classificado em peneiras com o *oversize* (7,1 a 28 mm) seguindo o circuito do minério granulado já o *undersize* (<7,1 mm) alimenta o circuito do minério friável (SANTOS, SOBRAL, *et al.*, 2002).

Seguindo pelo circuito de minério granulado, há a moagem primária realizada por moinhos de barras. Em seguida tem-se a separação magnética por tambor de baixo campo magnético para a separação da magnetita, um tipo de rejeito. Seguindo, há a moagem secundária desta vez em moinhos de bolas com posterior operação de deslamagem feita com hidrociclones ajustados para retirar a lama do material, outro tipo de rejeito. Por fim, há a operação de concentração por flotação. Após condicionamento com amido de milho gelatinizado, o material flotado é o rico em fósforo e o afundado é o rejeito granulado.

No circuito de minério friável, o material é classificado por hidrociclone para que seja retirada do circuito a porção lama. O *underflow* é posteriormente moído em moinhos de bolas e em sequência é enviado para tambores de baixo campo magnético para a retirada da magnetita e o concentrado é novamente moído. O material depois de passar pela moagem secundária passa por uma nova operação de deslamagem. O *underflow* é flotado gerando o concentrado e o rejeito friável grosso, o *overflow* da deslamagem segue para o circuito de ultrafinos onde há a operação de flotação gerando como produtos o concentrado ultrafino e o rejeito friável fino.

Os concentrados finais dos circuitos de granulado e grosso friável são misturados, remoídos, hidrociclonados e espessados a fim de diminuir o teor de umidade. O concentrado convencional é por fim bombeado através de mineroduto por 120 km para a planta química em Uberaba e o concentrado produto do circuito ultrafino é expedido por caminhões rodoviários. São produzidos por dia na ordem de 1800 toneladas de concentrado convencional a 35% de P_2O_5 somado a 400 ton/dia de concentrado ultrafino.

Quanto aos rejeitos gerados, pode-se definir 5 categorias distintas:

- a) magnetita: Rejeito gerado nas operações de separação magnética. Tem boas características geotécnicas com a boa permeabilidade e resistência o que possibilita o seu empilhamento, atualmente é depositado no lago da barragem BR mas é largamente usado na pavimentação das estradas do complexo e como material construtivo nos maciços das barragens. Sua produção diária é de 5500 ton/dia na base seca;
- b) lamas: Gerado nas operações de deslamagem é um material bastante fino sendo que 50% é passante em 10 μm . São espessadas em um espessador com 100m de diâmetro com alimentação e produto 6,2% e 10% de teor de sólidos, respectivamente. Depois o espessado é bombeado até um canal aberto que percorre 5,5km por gravidade até a extremidade à montante do lago da barragem BL1. Sua produção diária de 12300 ton/dia na base seca;
- c) rejeito de flotação granulado: É gerado na operação de flotação na rota de granulado. Sua produção diária é de 9600 ton/dia na base seca;
- d) rejeito de flotação friável grosso: É o *underflow* resultante na operação de flotação na rota de minério friável. Sua produção diária é de 3300 ton/dia na base seca;

e) rejeito de flotação friável fino: É gerado na flotação das lamas na rota de produção do concentrado ultrafino. Sua produção diária de 1900 ton/dia na base seca;

Os rejeitos de flotação apresentam-se com 30% de sólidos e são todos depositados na barragem BR, mas também são ciclizados e o *undeflow* é usado nos alteamentos das barragens.

3. METODOLOGIA

Em março de 2018 houve uma campanha de estudo para caracterizar e ensaiar a desempenho dos rejeitos dos 3 tipos de circuitos operacionais de flotação e a lama, a fim de se levantar possibilidades para uma nova forma de disposição alternativa a barragens. Foi realizado um breve delineamento dos principais ensaios realizados para a avaliação dos rejeitos e lamas do Complexo Mineral de Tapira.

Importante salientar que não se tem informação de modo detalhado de quais foram as metodologias usadas para os ensaios, pois estes foram feitos ainda de forma preliminar e sem o rigor acadêmico.

3.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS

Afim de caracterizar tecnologicamente os rejeitos de Tapira, foram coletadas amostras das descargas de rejeito da flotação e das deslamagem, sendo 4 tipos de amostras, lama, rejeito grosso, rejeito granulado e rejeito friável fino. Cada rejeito de flotação provém de um circuito diferente como já demonstrado. Essas amostras foram enviadas para a empresa Gaustec, empresa especialista em soluções de filtragem. Foram feitos testes de peneiramento, cálculo de teor de sólidos das polpas, densidade dos sólidos e análises químicas.

O ensaio de peneiramento é um ensaio muito usado na mineração e visa caracterizar a amostra quanto a distribuição dos tamanhos dos grãos. Ele pode ser feito à seco, à úmido e seco/úmido. A amostra é posta em uma série de peneiras organizadas da maior abertura para a menor, sendo comumente usada a série Tyler. As peneiras são nomeadas de acordo com o tamanho da abertura dada em milímetros, ou pela quantidade de aberturas por polegada quadrada. A mostra é vibrada e por fim são coletadas as massas retidas em cada uma das peneiras e pesadas.

As amostras de rejeitos de flotação e lamas foram peneiradas, na oportunidade também se determinou o teor de sólidos presentes na polpa e densidades dos sólidos, bem como os teores dos principais compostos minerais presentes nas amostras.

3.2 ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

O Ensaio de Sedimentação é um ensaio relativamente simples que visa determinar qual é a velocidade que partículas em suspensão em uma polpa demoram para decantar.

As amostras de Rejeito Granulado, Rejeito Friável Fino e Lama foram submetidas a ensaios de sedimentação em triplicata em provetas de 1000 ml.

Foi estudado o espessamento de lamas em espessadores convencionais. Atualmente, tem-se em operação um espessador em operação de 100 m de diâmetros com alimentação a 6,2% e produto a 10% de teor de sólidos.

Para dimensionar o espessador foi adotado para os cálculos a metodologia de Coe e Clevenger (1917). Com o objetivo de entregar um espessado a 40% de sólidos para a alimentação de uma possível planta de filtração. Sendo que foi adotada a vazão da polpa com 11570 t/h, já considerando fator de segurança de 1,2, a 6,25% de sólidos, massa específica de 3,1 ton/m³, sendo o Fator de Projeto de 1,33 e usando os valores de velocidades de sedimentações encontrados no ensaio de sedimentação. Nestes testes, não foram considerados a adição de flocculantes para melhorar a eficiência dos espessadores, além de considerar apenas o espessador tipo convencional.

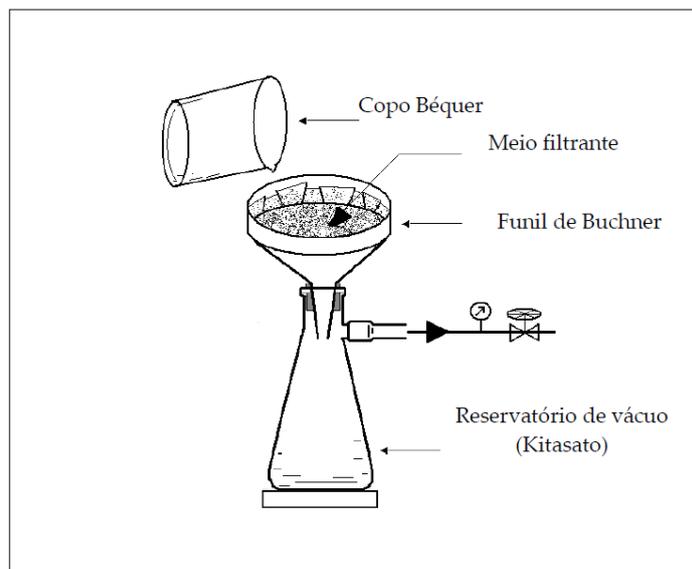
Não houve a necessidade de realizar os dimensionamentos de espessadores para os rejeitos de flotação, pois a hidrociclonação já consegue bons resultados para o desaguamento neste caso.

3.3 TESTE DE FILTRAGEM (*LEAF TEST*)

O teste para se determinar o desempenho do material na operação de filtração industrial é o *Leaf Test*, ou Teste de Folha. Ele consiste em um meio filtrante (filtro de papel por exemplo) sobre um funil sobre um Kitasato que tem em uma das aberturas uma bomba

de vácuo (Figura 23). Deste modo se testa uma série de cenários variando o teor de sólidos da polpa, flocculantes e auxiliares de filtragem, intensidade do vácuo. São coletados os resultados das tortas que se formaram e o dos filtrados, como a velocidade da formação da torta, teor de umidade e limpidez do filtrado. Esses resultados são subsídios para o dimensionamento dos filtros tipo Plano ou Mesa, Disco e Tambor.

Figura 23 - Leaf Test



Fonte: (SAMPAIO, FRANÇA e BRAGA, 2007, p. 417)

Tanto os rejeitos de flotação (os 3 tipos misturados de acordo com a partição de produção), como as lamas foram submetidas aos ensaios de filtragem. As lamas em especial foram submetidas também à testes diretos em filtros prensas.

Foram feitos teste de filtragem de Filtros Planos ou de Mesa, Filtros de Discos e Filtros de Tambor variando o flocculante e auxiliar de filtragem bem como o teor de sólidos da alimentação. Para os ensaios e dimensionamento dos filtros, foi usado a metodologia de Chaves (2002).

Para os rejeitos de flotação, a vazão total considerada foi de 780 ton/h, com fator de correção de 80% para a taxa de filtragem. As amostras de rejeito de flotação usada forma misturadas de acordo a proporção de produção de rejeitos da usina, isto é, contendo 64% de rejeito friável grosso, 23% de rejeito granulado e 13% de rejeito friável fino.

Para dimensionamentos dos filtros tipo plano ou mesa, foram considerados filtros com diâmetro de 7,31 m (24 ft) e área efetiva de 444 m². Para os filtros de disco, foram considerados conjuntos contendo 20 discos, sendo cada disco com diâmetro de 3,81 m (12'6''), cuja área nominal total do conjunto é 408,8 m² (4400 ft²). Para filtros de tambor, foram considerados equipamentos com 1,11 m (12 ft) de diâmetro, 1,86 m (20 ft) de largura, sendo cada filtro com área nominal para a filtração de 70m².

Nos cenários de testes, variou-se os flocculantes, auxiliar de flocculante e a teor de sólidos na alimentação, totalizando 27 cenários para cada tipo de filtro.

Para as lamas, os cenários variaram entre 2 tipos de flocculantes e 2 tipos de auxiliares de filtração, variando também a dosagem dos flocculantes e auxiliares de 25, 50 e 75 g/ton, mas desta vez o teor de sólidos não se variou, sempre igual a 20%.

Especialmente para as lamas, foi feito também ensaios de filtração usando o filtro prensa na empresa Andritz, fornecedora de filtros. Foram feitos testes com teor de sólidos de alimentação nos cenários de 25% e 35%.

3.4 SIMULAÇÃO DE HIDROCICLONAGEM E *SLUMP TEST*

A operação hidrociclonagem é conhecida pela sua alta dependência a vários parâmetros construtivos e do material.

Já é prática da empresa a hidrociclonagem do rejeito para o uso no alteamento das barragens usando uma bateria de hidrociclones fixa com 10 hidrociclones de 25,4 cm (10'') e uma bateria móvel com 30 hidrociclones de 15,24 cm (6''). O aproveitamento dos rejeitos é da ordem de 90% com alimentação com 30% de teor de sólidos. O rejeito ciclonado aguarda 5 dias para perder umidade e ser usado logo após no alteamento.

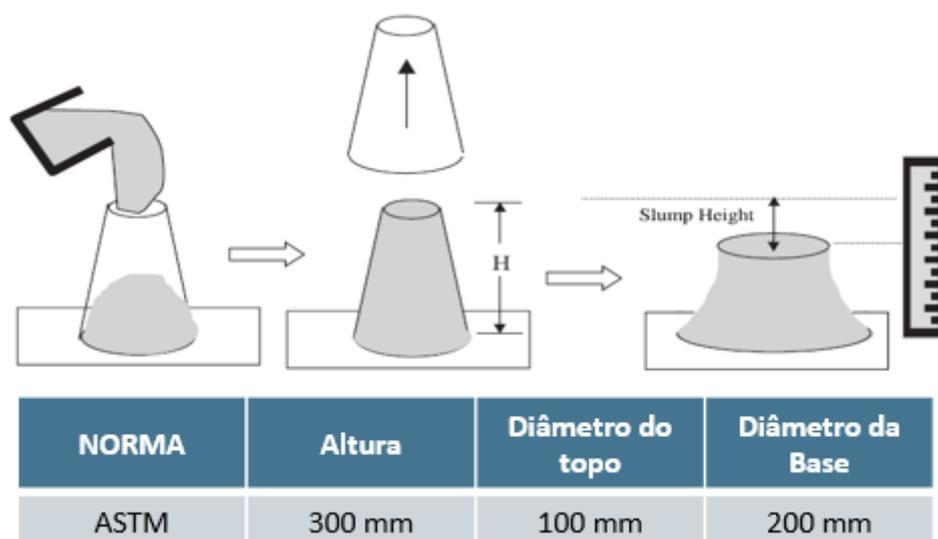
O *JKSimMet* é um *software* desenvolvido pela *JKTech* voltado para a simulação de processos minerais. É possível simular o desempenho de hidrociclones, podendo variar diversos parâmetros do equipamento e prever como se comportaram os produtos da operação (*Underflow e Overflow*) como o teor de sólido e distribuição de tamanho de partículas em cada produto e eficiência na partição.

Os rejeitos de flotação foram simulados no *JKTech* em 8 cenários variando-se as aberturas do *Apex* e *Opex*. Como a lama é um material muito fino, portanto não adequado para ser desaguado por hidrociclones, não foi realizado simulações considerando as lamas.

Adicionalmente, amostras de rejeito de flotação hidrocicloneadas foram submetidas ao ensaio de *Slump Test* ou teste de abatimento.

O *Slump Test* serve para medir a consistência e plasticidade de um material e tem largo uso na construção civil (REZENDE NETO, 2016). A metodologia adotada foi a da *American Society for Testing and Materials* – ASTM. Um cone de 100 mm de topo, 200 mm de base e 300 mm de altura é preenchido de material em todo o seu volume, em seguida o cone preenchido é colocado sobre uma superfície plana e o reservatório é retirado por cima, deixando o material sobre a superfície. Em intervalos de tempos determinados é medido o quanto o cone formado se abateu, essa medida é altura de abatimento (*slump height*), a Figura 24 é uma representação do teste.

Figura 24 - Representação do *Slump Test*



Foi coletado uma amostra de *underflow* proveniente das baterias de hidrociclone, já em operação na unidade, logo após a hidrocicloneagem, de acordo a metodologia apresentada, a pilha cônica foi disposta em uma folha de papel por 5 dias, sendo que no final foi medido os valores de abatimento.

3.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O Ensaio de Compactação Proctor Normal serve para prevê o comportamento do solo quando compactado em diferentes umidades. Consiste em um cilindro de 1000cm³ que recebe o choque de uma soquete de 2,5 kg que cai 26 vezes a uma altura de 30cm, é coletado ao final de cada teste uma amostra para a determinação da massa específica seca e o teor de umidade. Ao final, se plota o gráfico de massa específica seca (ρ_d) versus o teor de umidade (w) com os resultados, e onde há a inflexão da curva, isto é, onde se atinge a maior massa específica seca é o ponto de teor de umidade ótima.

Os valores de teores umidade ótima determinados nos ensaios de compactação de um material nos dão um ótimo referencial para a avaliação dos produtos dos ensaios de desaguamentos, pois valores em torno da umidade ótima indicam que teremos a possibilidade de compactação eficiente das pilhas de rejeitos.

Foram feitos ensaios em duplicata de compactação usando amostras de rejeitos de flotação na empresa Tecnogeo para avaliar os desempenhos do material na compactação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARATERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS REJEITOS

A Tabela 2 apresenta os teores em porcentagem dos principais compostos presentes em cada tipo de rejeito.

Tabela 2 - Análise química dos rejeitos

Análise Química tal-qual	Canal de Lamas	Rejeito Grosso	Rejeito Granulado	Rejeito Fino Friável
--------------------------	----------------	----------------	-------------------	----------------------

P₂O₅	7,17	8,1*	5,47	1,96
Fe₂O₃	19,89	35,01	31,1	26,16
MgO	6,84	4,78	5,03	10,54
CaO	12,61	16,18	17,49	5,66
Al₂O₃	5,15	1,75	1,03	5
SiO₂	23,81	13,31	20,09	29,09
TiO₂	7,63	10,15	8,16	10,99
BaO	0,25	0,2	0,17	0,26
SrO	0,3	0,25	0,28	0,08
MnO	0,43	0,55	0,46	0,54
Nb₂O₅	0,28	0,35	0,18	0,38

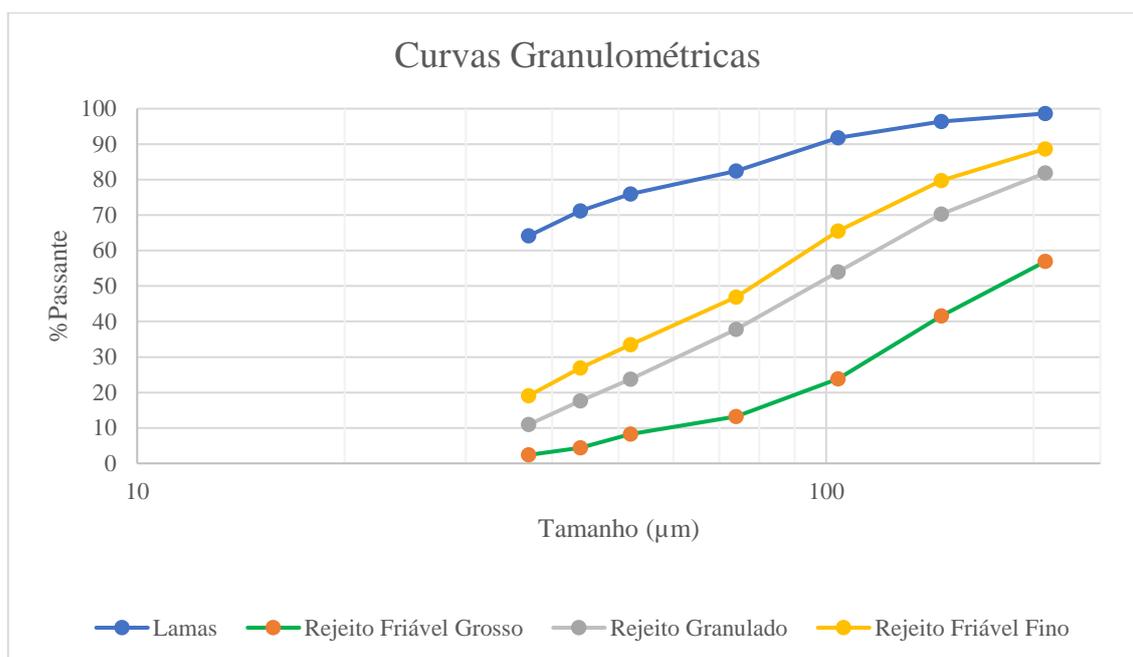
O valor de P₂O₅ marcado com * é atípico, pois normalmente este valor se apresenta entre 2,5 a 3,5%.

Na Tabela 3 tem-se os resultados de análise granulométrica por peneiramento a úmido dos rejeitos e lama realizada pela Gaustec. Têm-se também as densidades dos sólidos, a % dos sólidos da amostra e a estratificação do rejeito total, isto é, percentualmente, quanto é produzido de cada tipo na usina. Juntamente, foi plotado na Figura 25 o gráfico da distribuição granulométrica.

Tabela 3 - Análise Granulométrica dos Rejeitos

Faixa Granulométrica			% Passante		
#	µm	Lamas	Rejeito Friável Grosso	Rejeito Granulado	Rejeito Friável Fino
65	208	98,64	56,93	81,87	88,67
100	147	96,39	41,58	70,24	79,75
150	104	91,81	23,83	54	65,47
200	74	82,42	13,24	37,75	46,85
270	52	75,92	8,25	23,75	33,5
325	44	71,17	4,43	17,65	26,87
400	37	64,13	2,39	10,94	19,09
% de sólidos		6,2	30	30	30
Densidade dos sólidos (kg/m³)		3,2	3,2	3,2	3,2
Estratificação do rejeito total - Massa		47%	34%	12%	7%

Figura 25 - Curva Granulométrica dos rejeitos



Nota-se que a lama é um material muito fino, sendo que mais de 60% do material é passante na peneira de #400, limitando-se muito as operações possíveis de desaguamento. Os rejeitos são mais grosseiros se comparados com as lamas, sendo o Rejeito Friável Fino mais fino seguido pelo Rejeito Granulado e Rejeito Friável Grosso. Para os ensaios subsequentes de separação sólido-líquido os rejeitos de flotação foram ensaiados em conjunto, isto é, cada amostra tinha em sua composição os 3 tipos de rejeitos que foram misturados na mesma proporção com que são gerados cada tipo de rejeito na usina.

4.2 ESPESAMENTO

Foram realizados 3 ensaios de sedimentação em triplicata de acordo a metodologia descrita anteriormente.

Figura 26 - Ensaio de Sedimentação para o Rejeito Granulado

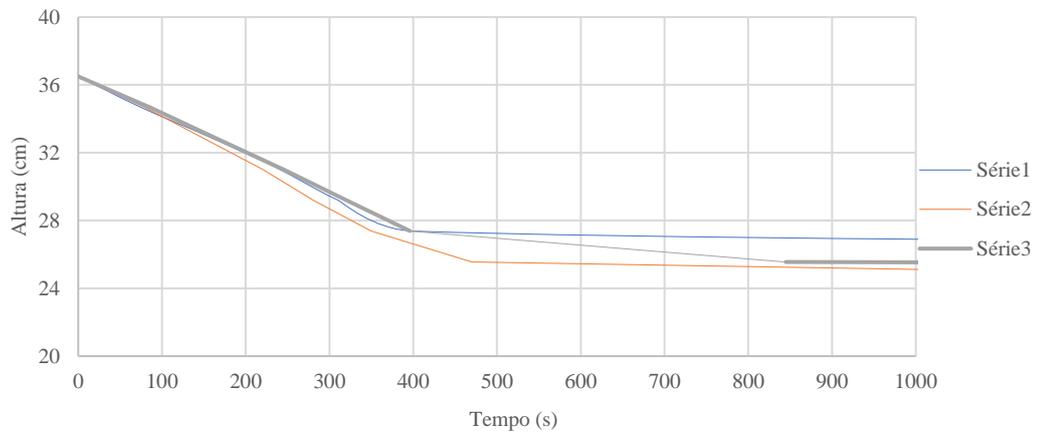
Curva Sedimentação - Rejeito Granulado

Figura 27 - Ensaio de Sedimentação para o Rejeito Friável Fino

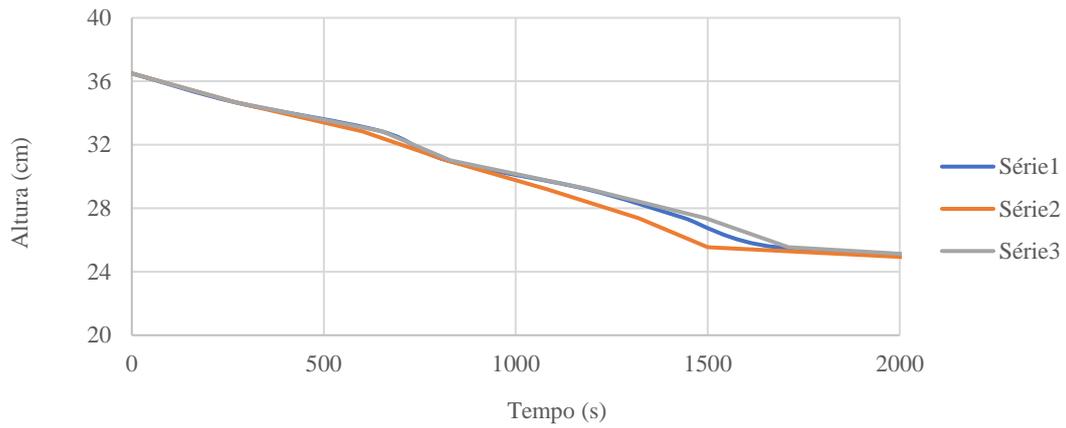
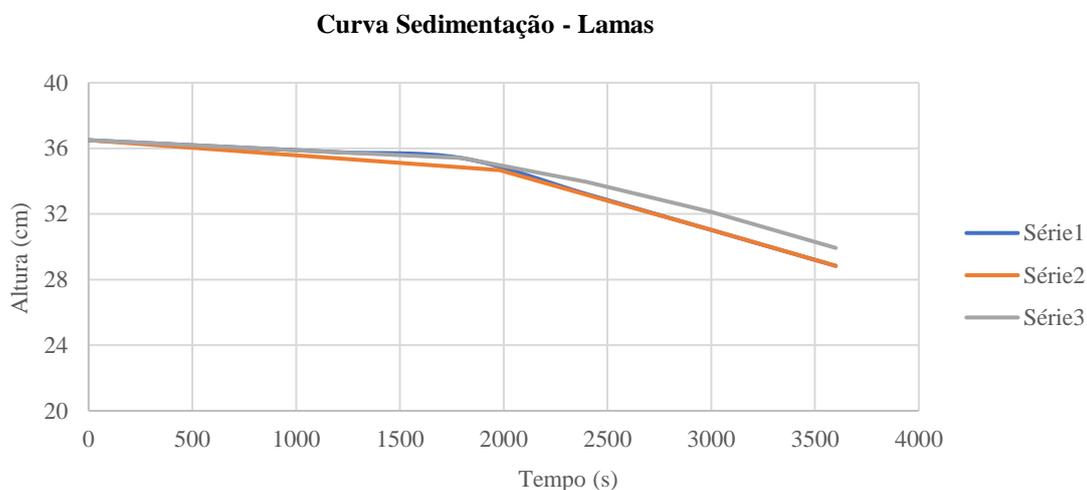
Curva de Sedimentação - Rejeito Friável Fino

Figura 28 - Ensaio de Sedimentação para a Lama



As velocidades médias encontradas foram 0,868 m/h para o Rejeito Granulado, 0,231 m/h para o Rejeito Friável Fino e 0,073 m/h para as Lamas.

Com os critérios de projeto apresentados na seção de metodologia, o diâmetro de espessador seria de 500 m ou utilizando o espessador já existente, poderia se construir mais 4 equipamentos de 100 m cada para entregar um espessado com teor de sólidos a 40% para a alimentação de uma possível planta de filtragem de lamas. Estas grandes dimensões dos espessadores se deve a pequena velocidade de sedimentação encontrada nas lamas, consequência da grande quantidade de material fino presente. Importante salientar que o dimensionamento considerou o espessador tipo convencional e sem adição de flocculantes. Essas dimensões impõem desafios, pois demanda grande área para instalação e grande investimento. Uma alternativa poderia ser o estudo de cenários com a adição de flocculantes e/ou o uso de modelos de espessadores tipo *Deep Cone*, que poderiam diminuir consideravelmente as áreas requeridas.

4.3 FILTRAGEM

4.3.1 Filtragem dos Rejeitos de Flotação

Foram feitos teste de filtragem de Filtros Planos ou de Mesa, Filtros de Discos e Filtros de Tambor variando o floculante e auxiliar de filtragem bem como o teor de sólido da alimentação.

A Tabela 4 apresenta o dimensionamento para os rejeitos de flotação considerando os filtros Planos com diâmetro de 7,31 m (24 ft) e área efetiva de 444 m².

Tabela 4 - Dimensionamento de Filtros Plano ou de Mesa

Testes	Floculante	Massa de floculante	Concentração de floculante	Dosagem de floculante	Auxiliar	Massa de Auxiliar	Concentração de auxiliar	Dosagem de auxiliar	% Sólidos	Umidade da Torta (%)	Área de Filtragem (m ²)	Nº de Filtros /E 24 ft
1	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	50	16,85	3.550	87
2	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	60	19,68	2.689	66
3	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	65	30,96	2.906	71
4	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	13,33	0,1	50	50	17,39	2.740	67
5	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	17,87	0,1	50	60	19,01	2.189	54
6	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	20,56	0,1	50	65	19,19	1.988	49
7	-	-	-	-	85488	13,33	0,1	50	50	17,11	2.802	68
8	-	-	-	-	85488	17,87	0,1	50	60	17,06	2.470	60
9	-	-	-	-	85488	20,56	0,1	50	65	13,75	2.231	55
10	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	19,11	1.746	43
11	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,34	1.265	31
12	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	26,29	1.036	26
13	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	21,26	6.693	163
14	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,38	10.414	253
15	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	19,05	20.043	486
16	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	26,67	0,1	100	50	16,33	2.990	73
17	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	35,74	0,1	100	60	19	2.495	61
18	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	41,13	0,1	100	65	19,25	2.582	63
19	-	-	-	-	85488	26,67	0,1	100	50	18,02	2.879	70
20	-	-	-	-	85488	35,74	0,1	100	60	20,86	1.975	48
21	-	-	-	-	85488	41,13	0,1	100	65	18,69	2.000	49
22	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	17,13	1.766	43
23	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	17,26	1.109	27
24	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	17,29	949	24
25	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	13,77	1.450	36

26	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	18,55	1.509	37
27	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	15,54	1.084	27

A Tabela 5 apresenta o dimensionamento de filtros de disco, considerando filtros com diâmetros de 3,81 m (12'6") com 20 discos, cuja área nominal é 408,8 m² (4400 ft²).

Tabela 5 - Dimensionamento de Filtros de Disco

TESTES	Floculante	Massa de floculante	Concentração de floculante	Dosagem de floculante (g/t)	Auxiliar	Massa de Auxiliar	Concentração de auxiliar	Dosagem de auxiliar	% Sólidos	Umidade da Torta (%)	Área de Filtragem (m ²)	Nº de Filtros / 12'6" ft
1	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	50	16,85	3.715	10
2	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	60	19,68	3.427	9
3	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	65	30,96	1.255	4
4	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	13,33	0,1	50	50	17,39	4.426	11
5	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	17,87	0,1	50	60	19,01	3.029	8
6	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	20,56	0,1	50	65	19,19	1.403	4
7	-	-	-	-	85488	13,33	0,1	50	50	17,11	4.168	11
8	-	-	-	-	85488	17,87	0,1	50	60	17,06	1.914	5
9	-	-	-	-	85488	20,56	0,1	50	65	13,75	1.523	4
10	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	19,11	178	1
11	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,34	199	1
12	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	26,29	135	1
13	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	21,26	1.385	4
14	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,38	706	2
15	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	19,05	330	1
16	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	26,67	0,1	100	50	16,33	4.871	12
17	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	35,74	0,1	100	60	19	2.542	7
18	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	41,13	0,1	100	65	19,25	1.360	4
19	-	-	-	-	85488	26,67	0,1	100	50	18,02	4.057	10
20	-	-	-	-	85488	35,74	0,1	100	60	20,86	3.206	8
21	-	-	-	-	85488	41,13	0,1	100	65	18,69	1.650	5
22	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	17,13	184	1
23	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	17,26	156	1
24	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	17,29	173	1
25	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	13,77	202	1
26	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	18,55	214	1
27	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	15,54	149	1

A Tabela 6 apresenta os resultados para o dimensionamento de Filtros tipo Tambor, foram considerados filtros de 1,11 m (12 ft) de diâmetro e 1,86 m (20 ft) de largura, cuja área é de 70 m².

Tabela 6 - Dimensionamento dos Filtros de Tambor

TESTES	Floculante	Massa de floculante	Concentração de	Dosagem de floculante	Auxiliar	Massa de Auxiliar	Concentração de auxiliar	Dosagem de auxiliar	% Sólidos	Umidade da Torta (%)	Área de Filtragem (m ²)	X N° de 20' Filtros
1	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	50	16,85	4.904	71
2	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	60	19,68	4.524	65
3	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	65	30,96	1.657	24
4	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	13,33	0,1	50	50	17,39	5.843	84
5	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	17,87	0,1	50	60	19,01	3.998	58
6	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	20,56	0,1	50	65	19,19	1.852	27
7	-	-	-	-	85488	13,33	0,1	50	50	17,11	5.501	79
8	-	-	-	-	85488	17,87	0,1	50	60	17,06	2.526	37
9	-	-	-	-	85488	20,56	0,1	50	65	13,75	2.011	29
10	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	19,11	234	4
11	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,34	263	4
12	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	26,29	178	3
13	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	21,26	1.828	27
14	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	21,38	932	14
15	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	19,05	436	7
16	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	26,67	0,1	100	50	16,33	6.429	92
17	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	35,74	0,1	100	60	19	3.356	48
18	-	-	-	-	E-PE MIN 027/17	41,13	0,1	100	65	19,25	1.796	26
19	-	-	-	-	85488	26,67	0,1	100	50	18,02	5.355	77
20	-	-	-	-	85488	35,74	0,1	100	60	20,86	4.232	61
21	-	-	-	-	85488	41,13	0,1	100	65	18,69	2.178	32
22	Flonex 912	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	17,13	243	4
23	Flonex 912	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	17,26	206	3
24	Flonex 912	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	17,29	229	4
25	Pietfloc	5,33	0,1	20	-	-	-	-	50	13,77	267	4
26	Pietfloc	7,15	0,1	20	-	-	-	-	60	18,55	283	5
27	Pietfloc	8,23	0,1	20	-	-	-	-	65	15,54	197	3

Importante notar que o teores de sólidos da alimentação usados como inputs, nos cenários variam de 50 a 65%, necessitando, portanto de operação anterior de hidrocliconagem.

Para filtros planos, o cenário de melhor performance foi o de número 24 sendo o floculante flonex 912 com dosagem de 20 g/t, usando 24 discos de 24 ft de diâmetro, resultou em teor umidade de 17,3%. Os teores de umidades são satisfatórios, entretanto o número de discos requeridos inviabiliza o uso deste tipo de equipamento.

Para filtros de disco, o teste de melhor performance é o de número 25 usando o floculante Pietfloc a 20g/t, obtendo um teor umidade de 13,8%. Os teores de umidade dos produtos são satisfatórios e é requerido apenas um filtro para a filtragem dos rejeitos. Como já apresentado, este tipo de filtro é largamente usado na indústria de minério de ferro, demanda-se estudos mais detalhados para a aplicação deste tipo de filtro em rejeitos fosfatados.

Para filtros de tambor, o teste de melhores resultados foi o de número 25 com o uso de 4 filtros de 12 ft de diâmetro e 12 ft de largura, floculante Pietfloc a 20g/t resultando em 13,8% de teor de umidade. Os teores de umidades dos produtos são também satisfatórios e o número de equipamentos requeridos é razoável.

4.3.2 Filtragem das Lamas

De modo análogo como foi feito para os rejeitos de flotação, as amostras de polpa de lama foram submetidas a ensaios de filtragem, mas considerando a alimentação sempre igual a 20% de sólidos (Tabela 7).

Tabela 7 - Ensaios de Filtragem para as Lamas

TESTE	Floculante	Massa de floculante	Concentração de floculante de dosagem de floculante (g/t)		Auxiliar	Massa de Auxiliar	Concentração de auxiliar	Dosagem de auxiliar	Umidade (%)	Espessura da torta (mm)	Tempo Formação	Tempo Secagem torta
1	tal qual	tal qual	-	-	tal qual	tal qual	-	-	39,63	6	560	120
2	Flonex 912	2,029	0,1	25	-	-	-	-	39,98	5	540	90
3	Flonex 912	6,087	0,1	75	-	-	-	-	43,48	6	510	100
4	Flonex 912	8,116	0,1	100	-	-	-	-	39,55	5	490	126
5	Pietfloc	2,029	0,1	25	-	-	-	-	38,87	6	850	220
6	Pietfloc	6,087	0,1	75	-	-	-	-	38,33	6	540	280
7	Pietfloc	8,116	0,1	100	-	-	-	-	38,65	5	570	180
8	E-PE MIN 027/17	-	-	-	E-PE MIN 027/17	2,03	0,1	25	36,82	5	680	345

9	E-PE MIN 027/17	-	-	-	E-PE MIN 027/17	6,09	0,1	75	37,76	5	750	150
10	E-PE MIN 027/17	-	-	-	E-PE MIN 027/17	8,116	0,1	100	37,59	5	440	210
11	85488	-	-	-	85488	2,029	0,1	25	37,89	5	530	195
12	85488	-	-	-	85488	6,087	0,1	75	37,3	5	750	250
13	85488 100 g/t	-	-	-	85488	8,116	0,1	100	37,11	5	710	280

As Tabelas 8, 9 e 10 descrevem o dimensionamento para a filtragem das lammas em Filtro Plano ou Mesa, de Disco e Tambor.

Tabela 8 - Dimensionamento Filtro Plano – Lammas

Teste	Tempo de Descarga 25% (horas)	Tempo de Secagem (75%) Horas	Ciclo Total (Horas)	Razão de filtragem (kg/h)/m ²	Área de Filtragem (m ²)	Nº de Filtros Æ 24 ft
1	0,01	0,03	0,04	146,6	5.321	130
2	0,01	0,03	0,03	196,5	3.970	97
3	0,01	0,03	0,04	176,9	4.409	107
4	0,01	0,04	0,05	139,5	5.593	136
5	0,02	0,06	0,08	80,1	9.733	236
6	0,03	0,08	0,10	63,2	12.337	300
7	0,02	0,05	0,07	98,2	7.947	193
8	0,03	0,10	0,13	51,1	15.273	371
9	0,01	0,04	0,06	117,7	6.627	161
10	0,02	0,06	0,08	84,2	9.260	225
11	0,02	0,05	0,07	90,9	8.578	208
12	0,02	0,07	0,09	70,5	11.062	269
13	0,03	0,08	0,10	63,2	12.341	300

Tabela 9 - Dimensionamento Filtro a Disco – Lammas CMT

Teste	Tempo de formação 33% (horas)	Tempo de Secagem (40%) Horas	Ciclo Total (Horas)	Razão de filtragem (kg/h)/m ²	Área de Filtragem (m ²)	Nº de Filtros 12'6" c/ 20 discos
1	0,16	0,19	0,47	13,8	56.437	139
2	0,15	0,18	0,45	14,4	54.142	133
3	0,14	0,17	0,43	15,3	51.108	126
4	0,14	0,16	0,41	15,8	49.434	121
5	0,24	0,29	0,72	9,1	85.465	210
6	0,15	0,18	0,45	14,4	54.072	133
7	0,16	0,19	0,48	13,6	57.194	140
8	0,19	0,23	0,57	11,4	68.416	168
9	0,21	0,25	0,63	10,4	75.304	185
10	0,12	0,15	0,37	17,7	44.093	108
11	0,15	0,18	0,45	14,7	52.989	130
12	0,21	0,25	0,63	10,3	75.420	185
13	0,20	0,24	0,60	11,0	71.123	174

Tabela 10 – Dimensionamento Filtro de Tambor – Lamas

Teste	Tempo de formação 25% (horas)	Tempo de sopragem (33%) Horas	Tempo de Secagem (50%) Horas	Ciclo Total (Horas)	Razão de filtragem (kg/h)/m ²	Área de Filtragem (m ²)	Nº de Filtros 20' x 12'
1	0,1556	0,2053	0,3111	0,6222	10,5	74.497	1.065
2	0,1500	0,1980	0,3000	0,6000	10,9	71.467	1.021
3	0,1417	0,1870	0,2833	0,5667	11,6	67.462	964
4	0,1361	0,1797	0,2722	0,5444	12,0	65.253	933
5	0,2361	0,3117	0,4722	0,9444	6,9	112.814	1.612
6	0,1500	0,1980	0,3000	0,6000	10,9	71.376	1.020
7	0,1583	0,2090	0,3167	0,6333	10,3	75.496	1.079
8	0,1889	0,2493	0,3778	0,7556	8,6	90.309	1.291
9	0,2083	0,2750	0,4167	0,8333	7,8	99.401	1.421
10	0,1222	0,1613	0,2444	0,4889	13,4	58.203	832
11	0,1472	0,1943	0,2944	0,5889	11,2	69.946	1.000
12	0,2083	0,2750	0,4167	0,8333	7,8	99.554	1.423
13	0,1972	0,2603	0,3944	0,7889	8,3	93.882	1.342

Como se pode observar na Tabela 7, os resultados são de tortas com teores umidade muito altas, por volta de 37% e ainda assim com grande número de equipamento requeridos nos três tipos de filtros à vácuo.

Foram realizados ainda ensaios no filtro prensa, com os cenários de alimentação de sólidos a 20 e 35%. A Figura 29 é uma foto das tortas geradas no filtro prensa.

Figura 29 - Produto das Lamas no Filtro Prensa



Em ambos os cenários as tortas produzidas obtiveram 25% de teor de umidade, valor razoável. O dimensionamento dos equipamentos é de 10 filtros prensas de 250 placas, sendo as placas com dimensões de 2,5 m x 2,5 m, necessitando, portanto da construção

de uma planta de filtragem e vultoso investimento, além das dificuldades e custos de operação de um equipamento como esse.

4.4 HIDROCICLONAGEM PARA OS REJEITOS

A Tabela 11 é o resultado de simulação de otimização no *software JKSimMet* de variação de diferentes tamanhos de *Apex* e *Vortex*.

Tabela 11 - Simulação de Aberturas para Hidrociclones

		Simulações								
		Instalados	1	2	3	4	5	6	7	8
Configuração	Apex (mm)	60,0	53,7	47,3	60,0	53,7	47,3	60,0	53,7	47,3
	Vortex (mm)	40,0	40,0	40,0	46,4	46,4	46,4	52,7	52,7	52,7
Overflow	P ₈₀ (µm)	74,2	76,4	79,1	79,5	82,0	84,8	84,5	86,9	89,8
	M _s (t/h)	505232	567422	637108	60043	669801	747314	693489	769335	85387
	M _w (t/h)	2163	2268	2359	2198	2295	2380	2227	2317	2397
	Teor de Sólidos	2,3%	2,4%	2,6%	2,7%	2,8%	3,0%	3,0%	3,2%	3,4%
Underflow	P ₈₀ (µm)	218,6	218,8	219,0	218,9	219,1	219,3	219,2	219,4	219,6
	M _s (t/h)	749477	743258	736289	739957	733	725269	730651	723067	714613
	M _w (t/h)	398002	293643	202057	362987	266177	181269	334762	244104	164639
	Teor de Sólidos	65,3%	71,7%	78,5%	67,1%	73,4%	80,0%	68,6%	74,8%	81,3%
	Partição	94%	93%	92%	92%	92%	91%	91%	90%	89%

Os valores de teor de sólidos no *underflow* variam em torno 70% em aproximadamente 90% dos rejeitos da flotação.

Adicionalmente, foi realizado o *slump test* com o material do *underflow* proveniente das baterias de hidrociclonação já em operação. O cone foi deixado repousar 5 dias sem precipitação e ao final, não se observou abatimento mensurável (Figura 30).

Figura 30 - *Slump Test* com underflow de hidrociclonagem de rejeito de flotação

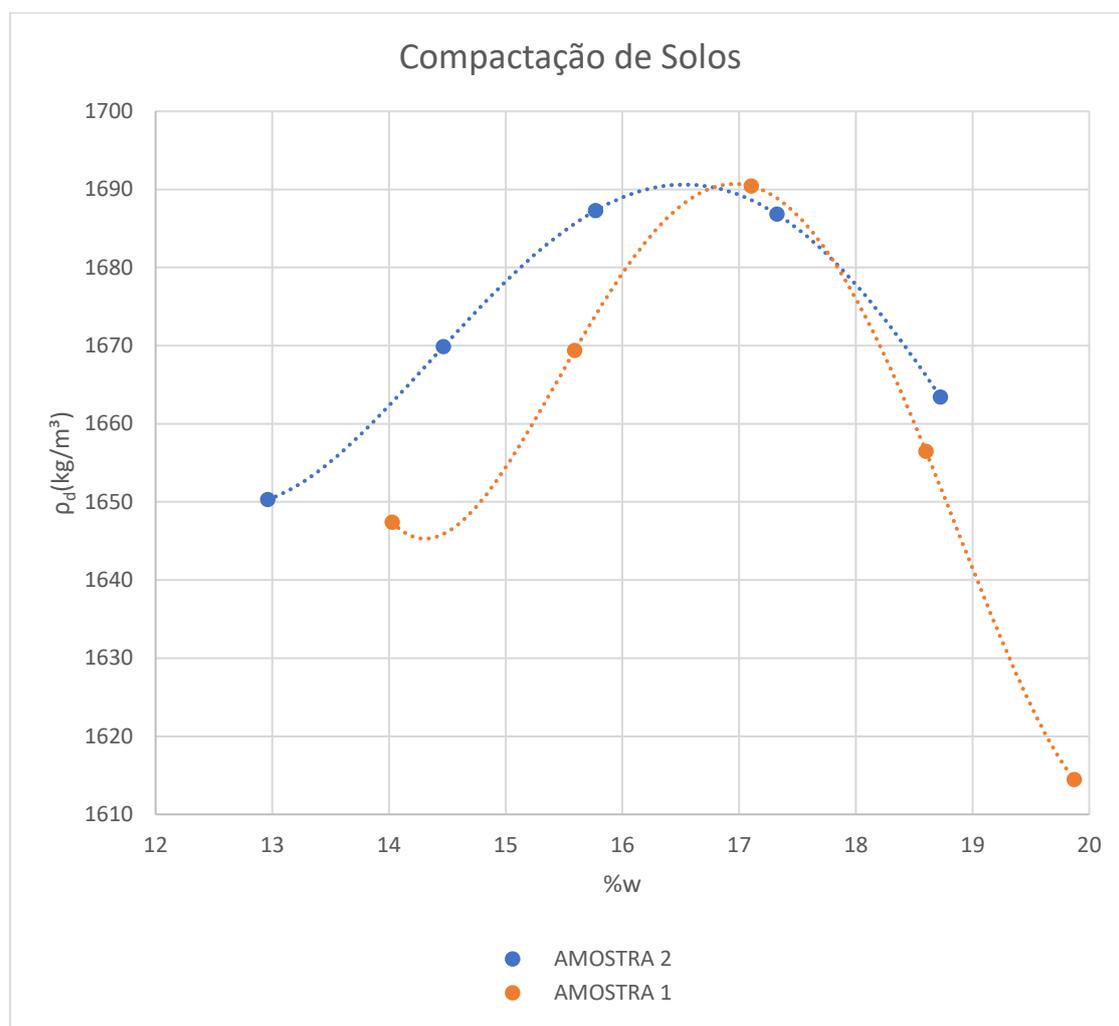
Isso é um indício da capacidade da hidrociclonagem de desaguar os rejeitos de flotação em parâmetros adequados para o empilhamento, fato que já é conhecido pela empresa, pois este mesmo material já é usado na construção das barragens. Entretanto, é necessário que o material espere 5 dias depois de hidrociclonado para ser usado. Por isso, é interessante que a hidrociclonagem dos rejeitos seja uma operação auxiliar da filtração, aumentando o teor de sólidos da polpa de forma que fique adequado como alimentação dos filtros.

4.5 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

Os rejeitos de flotação foram avaliados quanto à compactação mecânica em obras de terraplanagem através do ensaio de compactação Proctor Normal com amostras em duplicata. As curvas de compactação estão representadas na Figura 32.

Os valores de teor de umidade dos gráficos usam a definição de acordo a Equação 1, o que não é usual em ensaios de compactação, que geralmente adotam a definição usada na geotecnia para teor de umidade. Essa adaptação se fez necessária para possibilitar a comparação dos resultados dos ensaios de compactação com os demais resultados dos ensaios de desagramento.

Figura 31 - Curvas dos Ensaios de Compactação Procto-Normal para os Rejeitos da Flotação



Os teores de umidade ótima e massa específica aparentes secas máximas encontradas para as amostras 1 e 2 foram de 17,0%, 1691 kg/m³, 16,6 % e 1692 kg/m³ respectivamente. Em teor de umidade na definição em geotecnia, temos 20,5% para a amostra 1 e 19,9% para a amostra 2.

4.6 COMPILAÇÃO DOS DADOS

Um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de desaguamento é apresentado na Tabela 12, aqui estão compiladas as avaliações dos produtos obtidos em cada técnica de desaguamento estudada nos rejeitos de flotação e nas lamas.

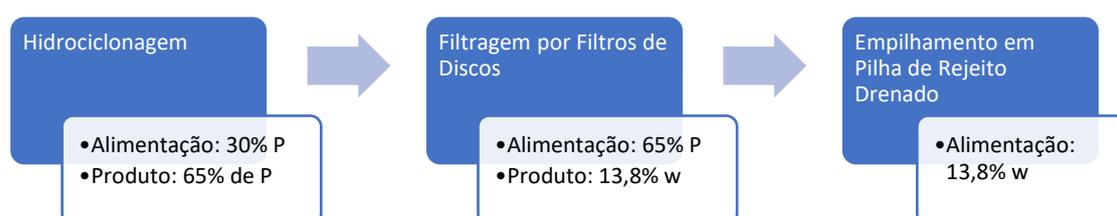
Tabela 12 - Resumo dos resultados de desaguamento

Técnica	Produtos	
	Rejeito Flotação	Lamas
Espessador	Não ensaiado	Teor de Sólidos adequado
Filtro Plano (Mesa)	Umidade Adequada	Umidade Alta
Filtro de Disco	Umidade Adequada	Umidade Alta
Filtro Tambor	Umidade Adequada	Umidade Alta
Hidrociclonagem	Teor de Sólidos Adequado	Não ensaiado
Filtro Prensa	Não ensaiado	Umidade Razoável

Com base nestes desempenhos, foram propostas 3 possíveis alternativas para o manejo e disposição de rejeitos do Complexo Mineral de Tapira como detalhado a seguir.

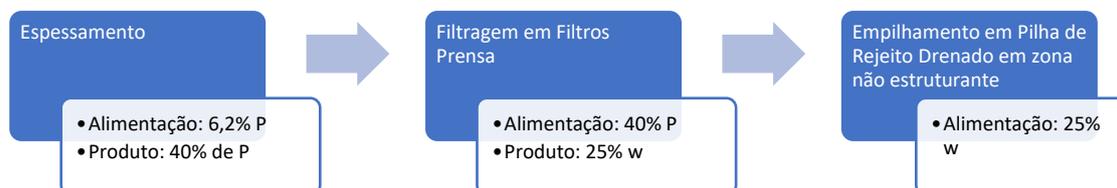
A Figura 32 representa uma possível solução de desaguamento e disposição para os rejeitos de flotação. Como apresentadas, as simulações de hidrociclonagem foram capazes de produzir uma polpa que tenha teor de sólidos adequados para servir de alimentação para os filtros de disco. Os filtros de discos tiveram um bom desempenho no desaguamento dos rejeitos, requerendo apenas um equipamento e produzindo uma torta de teor de umidade abaixo dos teores de umidade ótima encontrados nos ensaios de compactação. Isso indica que o empilhamento das tortas desaguadas por filtro de disco pode ser viável, necessitando, obviamente, de estudos mais aprofundados para que se confirme essa hipótese.

Figura 32 - Rota de processo para empilhamento de rejeitos de flotação



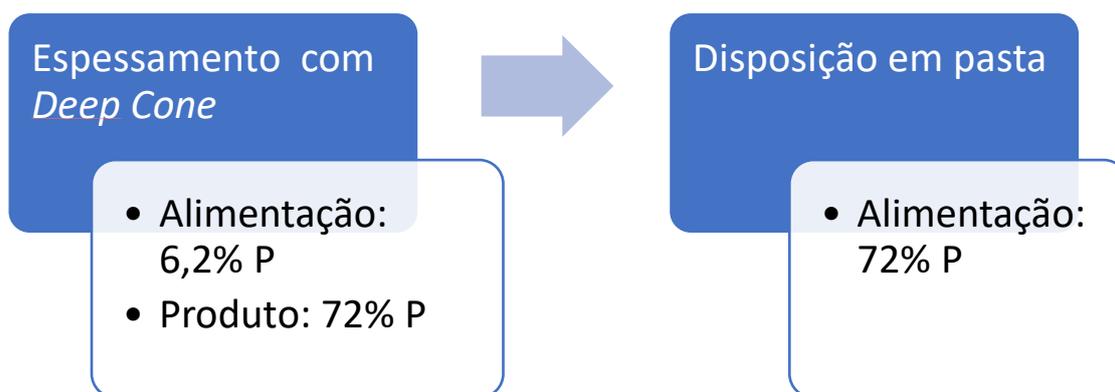
Na Figura 33 tem-se representada uma possível solução para a disposição das lamas. Os testes de espessamento indicaram a possibilidade de produção de um espessado a 40% de teor de sólidos, mas isso demanda estudos para de melhorar a eficiência dos espessadores usando flocculantes e/ou alterando a geometria do equipamento. Nessa configuração de produtos do espessamento, os testes indicaram a possibilidade de filtragem das lamas por filtros prensa, gerando uma torta com teor de umidade razoável, que poderia ser empilhada em co-disposição com os rejeitos de flotação desaguados em pilha zoneada, sendo a zona estruturante constituída de rejeitos de flotação (material mais grosseiro) e zona não estruturante constituída de lamas filtradas por filtro prensa (material mais fino). Esta alternativa apresenta vários desafios no tocante às lamas, pois os espessadores e filtros prensas requeridos são de grandes proporções, além de se gerar produtos ainda não tão adequados ao empilhamento (questão de trabalhabilidade). Esta consideração torna a alternativa de difícil aplicabilidade, necessitando obviamente de estudos mais aprofundados no espessamento e filtragem das lamas, e de estabilidade da pilha a ser formada.

Figura 33 - Rota de processo para empilhamento das lamas



A Figura 34 apresenta uma possível solução ao problema das lamas e que foi estudada por Rezende Neto (2016). Neste trabalho mostrou-se a geração de pastas a partir de lamas fosfáticas da região de Araxá chegando-se a um produto com até 72% de teor de sólidos, que apresentou pouco ou nenhum abatimento. Esta solução demanda estudos mais detalhados da geração em escala industrial das pastas, além de estudos quanto a geometria e estabilidade a longo prazo das estruturas a serem formadas.

Figura 34 - Rota de processo para a geração e disposição de pastas de lama



5. CONCLUSÕES

A forma convencional de disposição de rejeitos em barragens vem sendo desencorajada devido aos impactos dos recentes acidentes de barragens. Neste contexto, formas alternativas de disposição estão sendo buscadas pelas mineradoras, das quais a disposição de rejeitos grosseiros desaguados em pilhas e a disposição de rejeitos finos em pastas concentradas despontam como soluções. Entretanto, a aplicação desses métodos demanda estudos de processos de tratamento de rejeitos que condicione o material a ser disposto e que seja viável economicamente, além de um especial cuidado com estabilidade da estrutura a ser construída, zelando pelas boas práticas da engenharia no planejamento e operação.

Com os resultados dos ensaios e simulações preliminares de desaguamento dos rejeitos gerados na mina de Tapira-MG, foi possível levantar soluções para uma disposição alternativa às tradicionais barragens de rejeito.

Os rejeitos de flotação apresentaram bons resultados de desaguamento com as técnicas estudadas de hidrociclonagem e filtragem por filtros de discos, em sequência. O material obtido, apresentou, em análise preliminar, boas características para o empilhamento (função estruturante) em pilhas de rejeito desaguado.

Em contrapartida, as lamas estudadas não apresentaram bons desempenhos nos ensaios de desaguamento, demandando vultosos investimentos em novos equipamentos para o seu desaguamento, além de gerar material desaguado, em uma análise preliminar, sem boas condições para o empilhamento. Uma alternativa pode ser a geração e disposição em pastas concentradas, solução que demanda estudos adicionais.

BIBLIOGRAFIA

ABNT. NBR 13029. **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**, 24 jul 2017a.

ABNT. NBR 13028. **Mineração - Elaboração e Apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos**, 14 nov 2017b.

ALVES, P. I. A. **EMPILHAMENTO DE REJEITO FILTRADO: A EXPANSÃO DE UMA ALTERNATIVA PARA SUBSTITUIÇÃO DE BARRAGENS**. Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral. Área de Concentração: Lavra de Minas.. Ouro Preto, p. 116. 2020.

ANM. Resolução nº 13. **Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante"**, 8 ago 2019.

BOCCAMINO, D. **DESENVOLVIMENTO DE GEOMETRIA PARA EMPILHAMENTO DE REJEITOS DESAGUADOS DE MINÉRIO DE FERRO: ESTUDO DE CASO PARA OS REJEITOS GERADOS NA INSTALAÇÃO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS ITABIRITÍCOS (ITM-I) EM OPERAÇÃO NA MINA DO PICO**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Ouro Preto, p. 110. 2017.

BRASIL. Lei nº 12.334. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens**, Brasília, 20 set 2010.

BRASIL. Lei nº 14066. **Altera a Lei nº 12.334, de 2010, que estabelece a PNSB, a Lei nº 7.797, de 1989, que cria o FNMA, a Lei nº 9.433, de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 1967 (Código de Mineração)**., Brasília, 30 Setembro 2020.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática de Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, v. 1, 2002.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, v. 2, 2004.

COE, H. S.; CLEVINGER, G. H. Methods for determining the capacities of slime settling tanks. **Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers**, 1917. 356-358.

DNPM. Portaria nº 70.389. **Cria o CNBM, o SIGBM e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do PSB, das ISR e ISE, RPSB e PAEBM**, 17 maio 2017.

GRABE - EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. Filtro-Prensa. **Grabe**, 2003. Disponível em: <<https://www.grabe.com.br/flowpress1500.php>>. Acesso em: 14 jan. 2021.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte. 2011.

GUIMARÃES, N. C.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. **REM: Revista Escola de Minas**, out.dez 2012. 543-548.

LEÃO, M. **Projeto de Pilhas para Disposição de Rejeitos**. Belo Horizonte: Notas de Aula - Instituto Minere, 2021.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minério**. Rio de Janeiro: CETEM / MCT, 2010.

MILHOMEM, F. D. O. **MODELAGEM DE DESAGUAMENTO EM PENEIRA**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Área de concentração: Tratamento de Minérios. OURO PRETO, p. 148. 2013.

MINAS GERAIS. Lei nº 23291. **Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens**, Belo Horizonte, 25 fev 2019.

REZENDE NETO, M. C. D. **Estudo de pastas minerais a partir do espessamento de lamas de processamento fosfático**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Program de Pós Graduação em Engenharia Metalurgica, Materiais e de Minas. Belo Horizonte, p. 141. 2016.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios: Práticas Laboratórias**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANTOS, J. P. D. **Projetos de Pilhas para Disposição de Rejeitos e Estéril na Mineração**. Belo Horizonte: Notas de Aula - Instituto Minere, 2021.

SANTOS, R. L. C. et al. **Produção de Fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira/Fosfertil**. XIX ENTMME. Recife. 2002. p. 8.

SEMAD/FEAM. Resolução nº 2.784. **Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais**, 21 mar 2019.

SILVA, S. A. D. **Critérios de projetos de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós Graduação em Geotecnia. Ouro Preto. 2016.

VALADÃO, G. E. S. **Separação Sólido-líquido**. Belo Horizonte: EEUFMG, 2008.

VALE. Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil. **Vale Brasil**, 2020. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-inaugura-fabrica-que-transforma-rejeitos-da-mineracao-em-produtos-para-a-construcao-civil.aspx>>. Acesso em: 03 fev. 2020.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. **Mineral Processing Technology**: Elsevier Science & Technology Books, 2006.