



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

**RENATA KEILA SANTOS**

**ESTUDO DE FILTRAGEM DE UM REJEITO DE FLOTAÇÃO VISANDO  
O EMPILHAMENTO A SECO**

**ARAXÁ-MG  
2022**

**RENATA KEILA SANTOS**

**ESTUDO DE FILTRAGEM DE UM REJEITO DE FLOTAÇÃO VISANDO  
O EMPILHAMENTO A SECO**

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

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Michelly dos Santos Oliveira

Coorientador: Dr. Francisco Gregianin Testa

**ARAXÁ-MG**

**2022**

RENATA KEILA SANTOS

## ESTUDO DE FILTRAGEM DE UM REJEITO DE FLOTAÇÃO VISANDO O EMPILHAMENTO A SECO

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

Data de Defesa: Araxá, 10 de fevereiro de 2022.



---

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



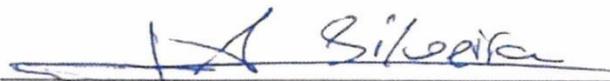
---

Membro Titular e Coorientador: Eng. Dr. Francisco Gregianin Testa  
Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)



---

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



---

Membro Titular: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG - Unidade Araxá

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, Juliana e Hamilton, às minhas irmãs, Rafaeli e Rayani, e aos meus familiares.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por essa oportunidade e por iluminar os meus caminhos.

Aos meus pais, Juliana e Hamilton, às minhas irmãs, Rafaeli e Rayani, meu padrasto Leandro, e todos da minha família, por cada palavra de incentivo e todo o suporte que recebi para chegar até aqui.

Aos professores, pelo conhecimento compartilhado e por despertarem em mim a vontade de aprender cada vez mais.

À minha orientadora, Michelly Oliveira, e ao meu coorientador, Francisco Testa, pela disponibilidade, atenção, paciência e por me guiarem na realização desse trabalho.

Aos professores, Fábio e Alex, pelas contribuições.

À Priscila, pelos ensinamentos e colaboração mais que importante nos testes de laboratório.

Ao Léo, Luisinho, Augusto, Ricardinho, Renata, Raphaela, Marynara e Capponi, por todo o suporte e incentivo.

Ao João Victor e à Marina Martins, pelo apoio e incentivo.

Aos meus colegas e amigos do curso, pelo companheirismo. Sou muito grata às amizades de André, Carlos, Iara, Ítalo e Lorena, que estiveram ao meu lado.

À Lorena, minha amiga, por ter sido tão parceira comigo durante todos esses anos da faculdade e pela cumplicidade muito além do que eu poderia imaginar.

Bênçãos de Deus. Gratidão a todos.

## RESUMO

As mineradoras estão buscando metodologias alternativas para a disposição dos rejeitos às convencionais barragens em virtude dos graves acidentes que ocorreram recentemente e significativas mudanças nas normas e leis ambientais. A disposição de rejeito filtrado em pilhas, também conhecido como *dry stacking* ou empilhamento a seco, tem apresentado grande crescimento nos últimos anos. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo compreender o comportamento de um rejeito de flotação que apresenta 80% de suas partículas menores que 93,35 µm em filtragem a vácuo de laboratório. Dentre os objetivos específicos, buscou-se determinar a umidade ótima, definir tempos adequados de filtragem tendo em vista a utilização de filtros de discos a vácuo e avaliar o efeito de diferentes tecidos filtrantes e reagentes auxiliares. Após a coleta e preparação da amostra, foi feita a caracterização física e ensaio de compactação. Em seguida, foram realizados ensaios de filtragem de folha de alimentação inferior com pressão de vácuo de -600mmHg. Definiu-se experimentalmente um tempo de 13 segundos para a formação da torta e 40 segundos para a secagem com base na umidade ótima de 13,04% obtida em ensaio de compactação. Dentre a gama de tecidos testados, o tecido 03-1001-K050 de poliamida, monofilamentar, com tessitura sarja, possibilitou produzir a torta com 11,70% de umidade, o filtrado mais limpo com 0,26% de sólidos e elevada TUF (taxa unitária de filtragem) de 1235,38 kg/h/m<sup>2</sup>. Quanto à avaliação dos reagentes, observou-se comportamento semelhante do R-1607 e o sulfato de alumínio, ambos promoveram aumento na TUF na dosagem de 10 g/t e as tortas se tornaram ligeiramente mais úmidas. Nas dosagens de 55 e 100 g/t houve queda na TUF com tendência de diminuição da umidade da torta. O R-1687 apresentou comportamento distinto, na dosagem de 10 g/t provocou diminuição na TUF e umidade da torta, e nas dosagens de 55 e 100 g/t, a TUF e umidade da torta aumentaram. Visando a disposição em pilhas, concluiu-se que é possível alcançar o teor de umidade ótimo desse rejeito em filtro de disco a vácuo. Ademais, a utilização de tecidos filtrantes e reagentes auxiliares adequados proporcionaram melhorias significativas no desaguamento.

**Palavras-Chave:** Rejeitos. Empilhamento a seco. Filtragem.

## ABSTRACT

Mining companies are looking for alternative methodologies for the disposal of tailings to dams due to accidents that have recently occurred and significant changes in environmental regulations and laws. In recent years, the disposal of filtered tailings in piles, also known as dry stacking or dry storage, has shown great growth. In this context, the present work aimed to understand the behavior of a flotation tailing that presents 80% of its particles smaller than 93.35  $\mu\text{m}$  in laboratory vacuum filtration. Among the specific objectives, we sought to determine the optimal moisture, the selection times of filtration in disc filter and the evaluation of the effects of the different filters cloths and reagents. After the sampling and preparation of the sample, the physical characterization and compaction test were performed. Then, lower feed sheet filtration tests were performed with a vacuum pressure of -600mmHg. A time of 13 seconds for cake formation and 40 seconds for drying was experimentally defined based on the optimal moisture of 13.04% in a compaction test. Among the range of filter cloths tested, the 03-1001-K050 polyamide fabric, monofilament, with twill weave, it is possible to produce a cake with 11.70% moisture, the cleanest filtrate with 0.26 % solids and superior TUF (filtering unit rate) of 1235.38 kg/h/m<sup>2</sup>. As for the evaluation of the reagents, a similar behavior was observed for R-1607 and aluminum sulfate, both of which promoted an increase in TUF at the dosage of 10 g/t and the cakes became slightly wetter. In the dosages of 55 and 100 g/t, there was a decrease in TUF with a tendency to decrease the cake moisture. The R-1687 presented different behavior, at the dosage of 10 g/t it caused a decrease in TUF and cake moisture, and at the doses of 55 and 100 g/t, the TUF and cake moisture increased. Aiming at the disposal in piles, it was concluded that it is possible to reach the optimal moisture content of this waste in a vacuum disc filter. Furthermore, the use of suitable filter cloths and auxiliary reagents provided significant improvements in dewatering.

**Keywords:** Tailings. Dry Stacking. Filtration.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Quantidade média de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento de 1 tonelada de minérios. ....	16
Figura 2 - Barragem de rejeitos.....	17
Figura 3 - Estado dos rejeitos desaguados. ....	18
Figura 4 - Crescimento da aplicação de tecnologias de desaguamento dos rejeitos e métodos alternativos. ....	18
Figura 5 - Representação esquemática do empilhamento a seco.....	19
Figura 6 - Formação da pilha de rejeitos filtrados. ....	20
Figura 7 - Filtragem com formação de torta. ....	22
Figura 8 - Representação da tessitura do pano. ....	27
Figura 9 - Tessitura do meio filtrante. (A) tela; (B) sarja; (C) cetim. ....	28
Figura 10 - Características do fio. (A) monofilamentar; (B) multifilamentar; (C) felpudo. ....	29
Figura 11 - Filtro de tambor.....	32
Figura 12 - Representação do filtro de disco convencional.....	33
Figura 13 - Válvula de vácuo para filtro de disco.....	34
Figura 14 - Ilustração do filtro plano ou mesa. ....	35
Figura 15 - Filtro de correia. ....	36
Figura 16 - Representação do teste de folha de alimentação superior. ....	37
Figura 17 - Representação do teste de folha de alimentação inferior. (A) etapa de formação da torta; (B) etapa de secagem da torta. ....	38
Figura 18 - Tratamentos dos resultados do teste de folha. ....	40
Figura 19 - Preparação da amostra. (A) secagem; (B) homogeneização. ....	41
Figura 20 - Fluxograma de preparação de amostras. ....	42
Figura 21 - Ensaio de picnometria. (A) picnômetro vazio; (B) picnômetro com partículas sólidas; (C) picnômetro com água e sólidos; (D) picnômetro com água. ....	43
Figura 22 - Ensaio de compactação.....	44
Figura 23 - Massa úmida de rejeito compactado retirado do cilindro de Proctor em um dos testes realizados.....	45
Figura 24 - Sistema de filtragem. ....	47

Figura 25 - Folha de teste com a placa ranhurada de drenagem.....	47
Figura 26 - Modelos de tecidos filtrantes.....	50
Figura 27 - Curva de distribuição granulométrica da amostra.....	52
Figura 28 - Gráfico da curva de compactação.....	53
Figura 29 - Massa de torta seca formada por unidade de área em função da espessura da torta. ....	55
Figura 30 - Massa da torta seca formada por unidade de área em função do tempo de formação da torta. ....	56
Figura 31 - Umidade da torta em função do tempo de secagem dividido pela massa da torta seca por unidade de área.....	57
Figura 32 - Umidade da torta para diferentes tipos de tecidos.....	58
Figura 33 - Resultados da TUF para diferentes tipos de tecidos.....	59
Figura 34 - Resultados do percentual de sólidos para diferentes tipos de tecidos....	60
Figura 35 - Resultados da adição do R-1607 na TUF e umidade da torta. ....	61
Figura 36 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de R-1607 a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e (C) 100 g/t.....	61
Figura 37 - Resultados da adição do R-1687 na TUF e umidade da torta. ....	62
Figura 38 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de R-1687 a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e 100 g/t (C).....	62
Figura 39 - Resultados da adição do sulfato de alumínio na TUF e umidade da torta. ....	63
Figura 40 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de sulfato de alumínio a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e 100 g/t (C). ....	63

## LISTA DE QUADRO E TABELAS

Tabela 1 - Empreendimentos de pilhas de rejeito filtrado projetadas ou em operação no Brasil. ....	21
Tabela 2 - Aspectos que influenciam na filtração. ....	23
Tabela 3 - Efeito da trama sobre a filtração. ....	28
Tabela 4 - Efeito das características do fio na filtração. ....	29
Tabela 5 - Quantidades adicionadas de água. ....	44
Tabela 6 - Preparo da polpas. ....	46
Tabela 7 - Variação dos tempos de formação e secagem da torta. ....	49
Tabela 8 - Características dos tecidos filtrantes. ....	50
Tabela 9 - Parâmetros de preparação dos reagentes. ....	51
Tabela 10 - Resultados da picnometria. ....	53
Tabela 11 - Variação do tempo de formação e secagem da torta. ....	54
Tabela 12 - Variação do tempo de secagem. ....	56
Tabela 13 - Percentual de sólidos no filtrado pela aplicação dos reagentes. ....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
d <sub>50</sub>	Tamanho em que 50% das partículas são passantes
d <sub>80</sub>	Tamanho em que 80% das partículas são passantes
MG	Minas Gerais
NA	<i>Not Available</i>
NBR	Norma Brasileira
PA	Poliamida
pH	Potencial hidrogeniônico
PP	Polipropileno
PVA	Poliacetato de vinila
PVC	Policloreto de vinila
TUF	Taxa Unitária de Filtragem

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1 Rejeitos de mineração</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2 Empilhamento a seco</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3 Filtragem de rejeitos</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4 Fatores que influenciam na filtragem</b> .....	<b>23</b>
2.4.1 TORTA/FILTRADO .....	24
2.4.2 PROPRIEDADES DA POLPA.....	25
2.4.3 CARACTERÍSTICAS DO SÓLIDO.....	26
2.4.4 MEIO FILTRANTE.....	27
2.4.5 REAGENTES AUXILIARES .....	30
<b>2.5 Filtros rotativos a vácuo</b> .....	<b>31</b>
2.5.1 FILTRO DE TAMBOR .....	32
2.5.2 FILTRO DE DISCO .....	33
2.5.3 FILTRO PLANO OU MESA.....	35
2.5.4 FILTRO DE CORREIA .....	36
<b>2.6 Teste de folha</b> .....	<b>36</b>
2.6.1 DIMENSIONAMENTO.....	40
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
<b>3.1 Preparação da amostra</b> .....	<b>41</b>
<b>3.2 Análise granulométrica</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3 Picnometria</b> .....	<b>43</b>
<b>3.4 Ensaio de compactação</b> .....	<b>44</b>
<b>3.5 Preparação de polpas para a filtragem</b> .....	<b>46</b>
<b>3.6 Teste de folha</b> .....	<b>47</b>
3.6.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CICLO .....	49
3.6.2 AVALIAÇÃO DE TECIDOS FILTRANTEs .....	50
3.6.3 APLICAÇÃO DE REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAGEM .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>52</b>
<b>4.1 Análise granulométrica</b> .....	<b>52</b>
<b>4.2 Densidade dos sólidos</b> .....	<b>53</b>
<b>4.3 Umidade ótima de compactação</b> .....	<b>53</b>
<b>4.4 Teste de folha</b> .....	<b>54</b>

4.4.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CICLO .....	54
4.4.2 AVALIAÇÃO DE TECIDOS FILTRANTES .....	58
4.4.3 AVALIAÇÃO DE REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAGEM .....	60
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os rejeitos da mineração são resíduos comumente na forma de polpa, uma suspensão de sólidos em água, gerados ao final da etapa de beneficiamento do minério quando não há mais possibilidade de alcançar resultados satisfatórios de recuperação pelos processos tecnológicos disponíveis e viáveis. Eles devem ter uma destinação correta, podendo ser reaproveitados ou senão estocados em condições adequadas de segurança, e em respeito às normas e às leis ambientais (ALVES, 2020).

As estruturas tradicionalmente empregadas pelas mineradoras para a contenção e disposição dos seus resíduos são as barragens, as quais correspondem a um barramento de solo, terra ou do próprio rejeito, dotado de um reservatório onde são lançados os rejeitos. No entanto, com os recentes desastres envolvendo o rompimento de estruturas como essas, e significativas mudanças em restrições e normas ambientais, há um crescente desenvolvimento ao processamento de rejeitos e adoção de métodos alternativos às barragens (TESSAROTO, 2015).

A disposição de rejeitos filtrados em pilhas, ou o empilhamento a seco, é apresentada como uma alternativa aplicável a diversos materiais. O método consiste em adensar previamente a polpa de rejeitos e depois filtrar com a premissa básica de produzir torta com baixo teor de umidade e adequado ao manejo posterior que envolve a sua compactação eficiente em pilhas. Uma maior compactação beneficia principalmente a estabilidade da estrutura.

Conforme exposto, o desempenho da filtragem é um fator chave para o processo. Para Davies (2011), o estudo de tecnologias de filtragem mais econômicas para cada operação que possibilitem obter tortas dentro das especificações e requisitos geomecânicos é essencial para a diminuição de custos haja vista que esse método apresenta custos elevados e não há geração de receitas.

Nesse sentido, os filtros de discos, da categoria a vácuo, são apresentados na literatura como uma interessante opção para filtrar rejeito, geralmente é a primeira a ser testada por ser um equipamento econômico e de elevada área filtrante. Para avaliar o uso dessa aplicação em escala de laboratório, e inclusive, dimensionar equipamentos industriais, emprega-se o teste de folha. Os resultados do teste são indicativos da viabilidade técnica e econômica para a filtragem a vácuo dos rejeitos

nos requisitos desejados de umidade da torta, clarificação do filtrado e taxa unitária de filtração (TUF), e, sobretudo, podem ser feitas investigações gerais que contemplem condições de processo para melhorar o desaguamento da torta.

Baseado nisso, o presente trabalho tem como objetivo compreender o comportamento de um rejeito de flotação em ensaio de filtração de folha tendo em vista o empilhamento a seco. Dentre os objetivos específicos, buscou-se determinar a umidade ótima do rejeito a partir do ensaio geotécnico de compactação, estabelecer tempos para a formação e secagem da torta com base nos requisitos desejados, e avaliar o efeito de diferentes tecidos filtrantes e aplicação de reagentes auxiliares como oportunidades para melhorar o desaguamento.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentados a introdução e a motivação em estudar esse tema. No segundo capítulo são abordados os conceitos gerais sobre rejeitos de mineração, os aspectos da técnica de empilhamento a seco e os fundamentos que regem a operação unitária de filtração. No terceiro capítulo são descritos os procedimentos experimentais adotados nesse trabalho. No quarto capítulo são expostos os resultados alcançados e a discussão deles. No quinto capítulo são apresentadas as conclusões.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

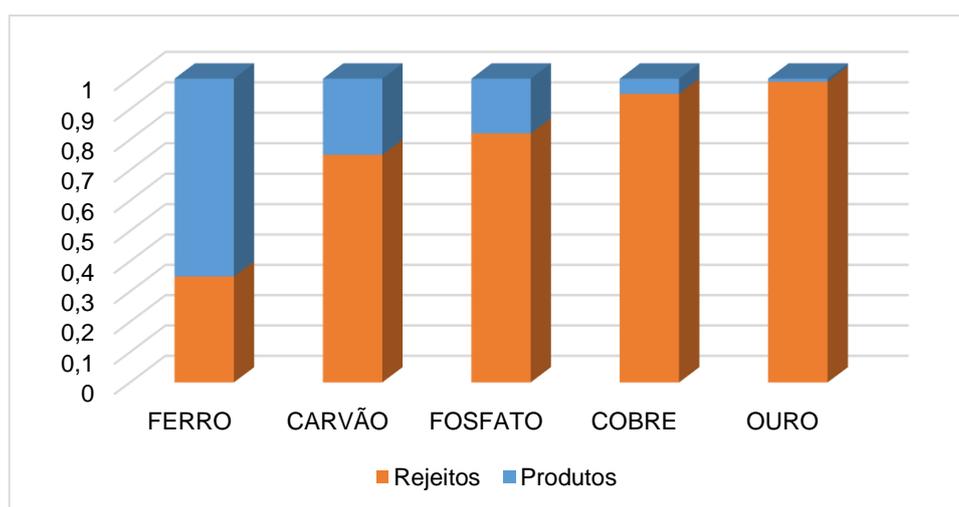
Nesse capítulo são apresentados o embasamento teórico acerca dos rejeitos de mineração, a técnica de disposição de rejeitos filtrados em pilhas bem como os conceitos fundamentais que regem a filtragem com ênfase nos fatores que influenciam o desempenho dessa operação.

### 2.1 Rejeitos de mineração

A exaustão de jazidas de alto teores e o aumento da demanda por bens minerais relacionados ao avanço econômico e tecnológico têm possibilitado que minérios de baixos teores sejam lavrados. Nessa condição, há a necessidade de maior fragmentação das partículas para liberação dos minerais de interesse, a consequência é o aumento expressivo da quantidade de materiais não aproveitados durante o processo, os denominados rejeitos.

A Figura 1 apresenta a média de rejeitos e produtos do beneficiamento de minérios de ferro, carvão, fosfato, cobre e ouro (considerando 1 tonelada de minério).

Figura 1 - Quantidade média de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento de 1 tonelada de minérios.



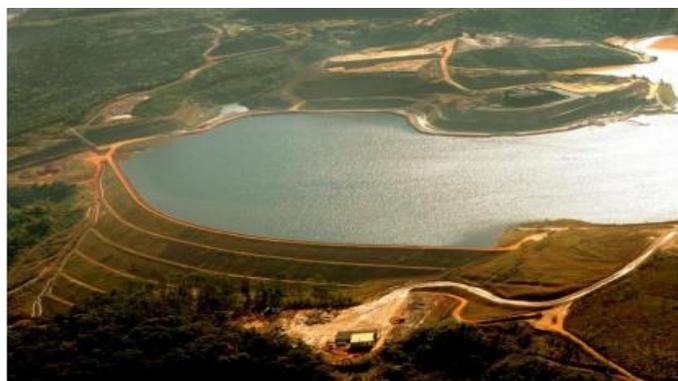
Fonte: Adaptado de SOARES (2010).

Conforme Soares (2010) aponta, é significativa a quantidade de rejeitos gerada. Isso afeta de forma qualitativa e quantitativa o meio ambiente, e é motivo de preocupação crescente nas empresas de mineração que buscam

minimização dos impactos ambientais e redução dos custos ligados aos processos de contenção desses resíduos (ESPÓSITO, 2000).

As barragens são as estruturas tradicionalmente empregadas para a contenção dos rejeitos de mineração e recuperação de água de processo. Da usina de beneficiamento, a polpa é transportada por gravidade ou bombeada e lançada no reservatório da barragem. As partículas mais grossas sedimentam próximo ao ponto de lançamento, a lama se posiciona em uma fase intermediária e a água livre ao final do reservatório (GUIMARÃES, 2011). A Figura 2 é um exemplo de barragem de mineração.

Figura 2 - Barragem de rejeitos.



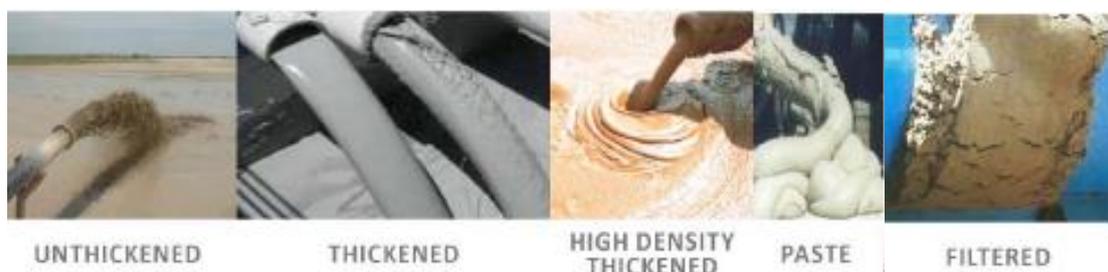
Fonte: SEMINÁRIO (2018).

O método apresenta grande potencialidade de impacto ambiental, requer enormes áreas para a disposição e uma significativa perda de água por evaporação (ALVES, 2020). Em alternativa a disposição de polpa diluída em barragens, os rejeitos podem ser desaguados. Os equipamentos básicos são os de separação sólido-líquido como os espessadores e filtros, ciclones, peneiras desaguadoras e centrífugas.

O estado dos rejeitos desaguados pode ser classificado com base na concentração de sólidos em massa e na sua tensão de escoamento (tensão necessária para movimentar o fluido) em polpa diluída, espessada, de alta densidade, pasta mineral e torta filtrada, como mostra a Figura 3 (ALVES, 2020). As polpas diluídas e espessadas são caracterizadas por baixas tensões de escoamento, inferiores a 50 Pa e concentração de sólidos de 10 a 50%. As polpas de alta densidade apresentam tensões de escoamento entre 50 a 80 Pa

e concentração de sólidos de 50 a 70%. Já as pastas minerais apresentam tensões de escoamento superiores a 100 Pa e concentração de sólidos acima de 55%. As tortas filtradas apresentam tensões de escoamento superiores a 1000 Pa e concentração de sólidos entre 80 e 90%.

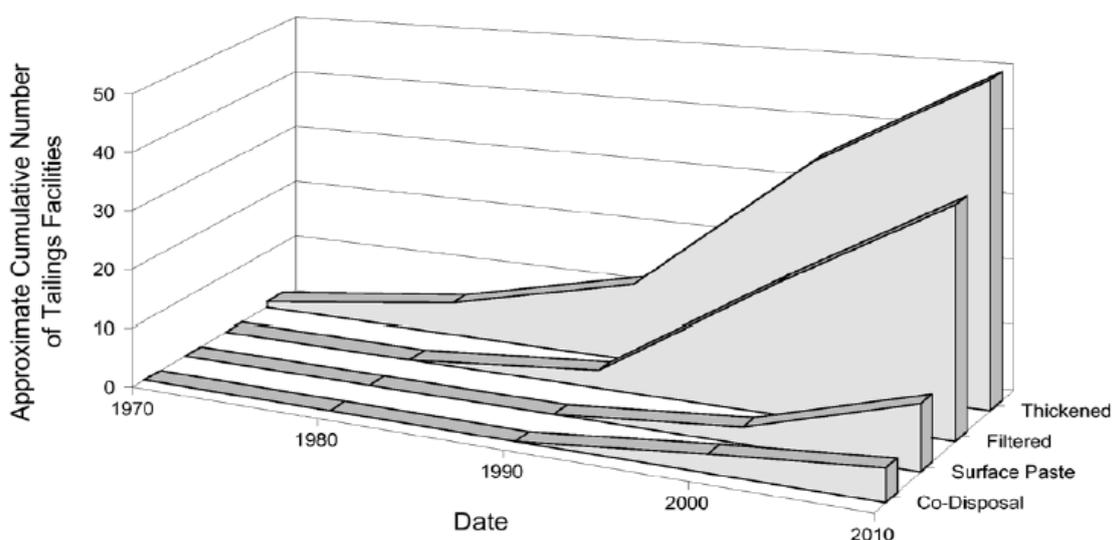
Figura 3 - Estado dos rejeitos desaguados.



Fonte: Adaptado de MEND (2017).

Davies (2011) apresenta no gráfico da Figura 4 a tendência mundial de crescimento da aplicação de tecnologias de desaguamento dos rejeitos como o espessamento e a filtragem bem como a utilização de métodos alternativos como a disposição em pasta e a co-disposição. Esse último trata-se da alocação de rejeito finos em espaços vazios de estéreis granulares gerados nas operações de lavra (FIGUEIREDO, 2007).

Figura 4 - Crescimento da aplicação de tecnologias de desaguamento dos rejeitos e métodos alternativos.



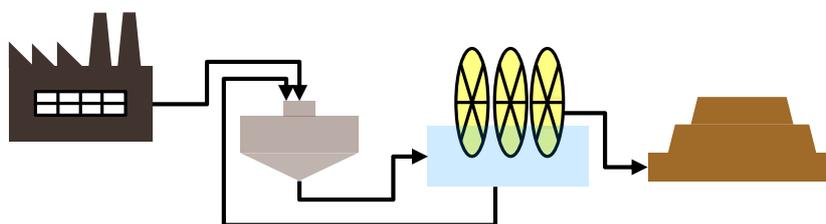
Fonte: DAVIES (2011).

Nesse trabalho um enfoque maior é dado para a disposição de rejeito filtrado em pilhas.

## 2.2 Empilhamento a seco

O termo *dry stacking*, traduzido como empilhamento a seco, nomeia a técnica de disposição de rejeitos filtrados em pilhas. Destaca-se que a torta produzida pela filtração não se apresenta “seca”, mas sim insaturada. Consiste em adensar previamente a polpa dos rejeitos em espessadores até determinada concentração de sólidos e depois filtrar para produzir tortas com certa umidade que posteriormente são transportadas, por caminhões ou transportadores de correia, para uma instalação de contenção para serem empilhadas, conforme representação na Figura 5 (ULRICH; COFFIN, 2013). O filtrado, adicionalmente, pode ser utilizado como água de recirculação na usina de beneficiamento (GUIMARÃES, 2011).

Figura 5 - Representação esquemática do empilhamento a seco.



No momento da disposição da torta em pilhas é desejável que ela esteja com o teor de umidade ótimo determinado a partir de um ensaio de laboratório denominado Solo – Ensaio de Compactação: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR (Norma Brasileira) 7182:2016, que consiste em realizar processos de compactação em uma amostra teste em diferentes níveis de umidade. O teor de umidade que proporciona a maior compactação (maior massa específica aparente seca) é definida como a umidade ótima daquele material.

A premissa básica nos projetos de empilhamento de rejeito filtrado é que o teor de umidade alvo/alcançável na planta de filtração seja equivalente à ótima de compactação. É aceitável produzir em climas mais úmidos, tortas com uma variação de até 1 ou 2% de umidade abaixo da ótima, e em climas extremamente

secos, 1% acima (DAVIES, 2011). Já para Crystal, Hore e Ezama (2018), a umidade alvo vai depender do empreendimento em termos de critérios de projeto, plano de empilhamento, localização, clima, geometria da pilha, entre outros fatores.

Na etapa de construção da pilha é usual a formação de finas camadas da torta com a finalidade de favorecer a evaporação da água presente entre os sólidos pela ação dos ventos e da radiação solar. A etapa seguinte é a operação de compactação pela passagem de equipamentos pesados como rolos compressores e tratores, conforme Figura 6. Um bom grau de compactação além de beneficiar a estabilidade geral da instalação, diminui eventos de infiltração e probabilidade de ressaturação (DAVIES, 2011).

Figura 6 - Formação da pilha de rejeitos filtrados.



Fonte: NEVES (2017).

A filtragem de rejeitos para a disposição em pilhas é uma prática usual nas minerações do deserto de Atacama e regiões áridas devido à escassez de água. Na mina de ouro de *La Coipa*, no Chile, por exemplo, todo o rejeito é filtrado em filtros de correia, e as tortas produzidas com aproximadamente 20% de umidade são transportadas para serem empilhadas (GUIMARÃES, 2011). Em regiões de climas tropicais, como o Brasil, a aplicação é mais complexa haja vista que as chuvas recorrentes contribuem para o aumento da umidade do rejeito, diminuem a trafegabilidade das vias e na pilha, o que requer um sistema de drenagem bem mais robusto (ALVES, 2020).

Alves (2020) listou algumas pilhas de rejeito filtrado projetadas ou em operação no Brasil, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Empreendimentos de pilhas de rejeito filtrado projetadas ou em operação no Brasil.

<b>Unidade</b>	<b>Mineradora</b>	<b>Tecnologia de filtragem</b>	<b>Umidade alvo</b>
Mina Casa de Pedra	CSN	Prensa	13 a 16%
Mina Pau Branco	Vallourec	Prensa	15 a 17%
Mina Cuiabá	AngloGold Ashanti	Disco cerâmico	NA
Unidade Vazante	NEXA	Prensa	9 a 11%
Mina do Pico	Vale	Disco convencional	NA
Projeto Aripuanã	NEXA	Prensa	15%
Itatiaiuçu	Usiminas	Prensa	NA
-	Samarco	Disco convencional	NA

Fonte: Adaptado de ALVES (2020)

A maior parte dos empreendimentos listados está localizada na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, localidade em que ocorreu recentemente dois graves acidentes de rompimento de barragens.

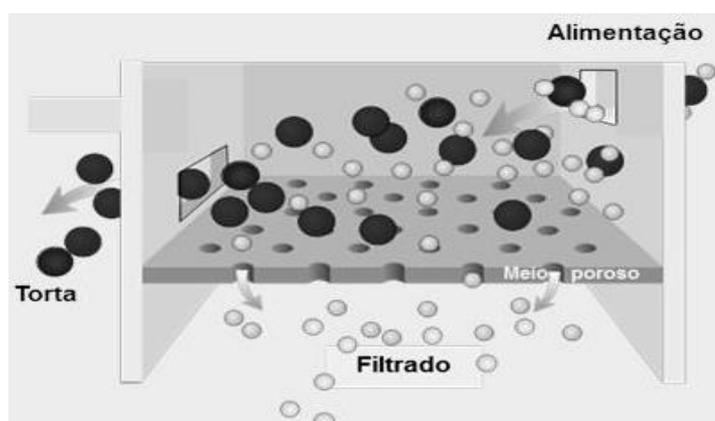
As grandes vantagens desse método em relação ao convencional em barragens são a possibilidade de recuperação de água e redução da área para a disposição. Por outro lado, o elevado custo, pela necessidade de uma planta de desaguamento, transporte e disposição final, sem a geração de receita, é a principal desvantagem.

Neves (2017) afirma que esses custos são amortizados na fase de desativação do empreendimento pela facilidade de recuperação da área. Além disso, atingir a umidade ótima por determinada tecnologia de filtragem pode ser relativamente difícil haja vista que rejeitos são materiais geralmente bastante finos. Para Davies (2011), o estudo de tecnologias de filtragem mais econômicas para cada operação que possibilitem obter tortas dentro das especificações e requisitos geomecânicos é essencial para a diminuição de custos.

### 2.3 Filtragem de rejeitos

A filtragem é a operação unitária de separação sólido-líquido que tem a finalidade de promover a separação de partículas minerais de uma polpa pela sua passagem através de um meio poroso. Os produtos são partículas sólidas, retidas no meio poroso, denominadas torta, e o líquido que o atravessa compõe o filtrado (CHAVES, 2013), conforme representação da Figura 7.

Figura 7 - Filtragem com formação de torta.



Fonte: CHAVES (2010).

O mecanismo de desaguamento acontece pela percolação de líquido existente entre os interstícios das partículas sólidas por ação de força de gravidade ou forças externas. O tipo de ação externa diferencia a filtragem como sendo a vácuo, sob pressão, hiperbárica, centrífuga e capilar (CONCHA, 2014). Cada uma requer a filtragem específica em equipamentos denominados filtros, cada um deles com seu modo de operar, requisitos e taxas de filtragem (ALVES, 2020).

A filtragem pode ser realizada de forma contínua ou por batelada, mas é sempre cíclica. O ciclo completo compreende as fases de formação, secagem, descarga e em alguns casos de lavagem da torta. A formação da torta dá-se pela acumulação das partículas sólidas junto ao meio filtrante. A secagem, pela aspiração da água contida no material. A descarga, pelo desprendimento da torta do meio poroso por meio de sopro ou raspagem (CHAVES, 2013).

Antes da etapa de filtragem geralmente são usados espessadores para remover o excesso de água. Hanh (2019) aponta que os rejeitos espessados

que alimentam uma planta de filtração apresentam em média 50 a 70% de sólidos em massa. A filtração tipicamente desagua para 75% a 90% de sólidos em massa.

## 2.4 Fatores que influenciam na filtração

Ao longo do tempo, os estudos de diferentes sistemas de separação sólido-líquido foram importantes para estabelecer que certos fatores influenciam na eficiência de um processo de filtração. Nesse sentido, Guimarães (2011) agrupou, conforme Tabela 2, uma série de variáveis em quatro categorias relacionadas à torta/filtrado, às propriedades da polpa, às características do sólido e às condições de equipamento. A seguir discorre-se sobre a influência dessas variáveis na operação de filtração.

Tabela 2 - Aspectos que influenciam na filtração.

<b>Torta/filtrado</b>	<b>Polpa</b>	<b>Sólido</b>	<b>Equipamento</b>
Espessura da torta	Taxa de alimentação	Distribuição granulométrica	Meio filtrante
Porosidade do leito	Porcentagem de sólidos	Área superficial específica	Nível de vácuo, sopro, pressão
Permeabilidade do leito	Temperatura	Geometria das partículas	Ciclo
Viscosidade do filtrado	Viscosidade	Propriedade de superfície	Nível de agitação
-	pH	Massa específica	-
-	Reagentes auxiliares	-	-
-	Sais dissolvidos	--	-

Fonte: Adaptado de GUIMARÃES (2011).

### 2.4.1 TORTA/FILTRADO

A Lei de Darcy representada pela Equação 1 é uma relação empírica que descreve a teoria clássica de filtração. O ponto de partida é o fluxo de líquido em regime laminar através de um meio poroso e torta não compressível (MASSARANI, 2002).

$$Q = \frac{B \times \Delta P \times A}{\mu \times L} \quad (1)$$

Em que:

Q: fluxo do filtrado

B: permeabilidade do leito (torta)

$\Delta P$ : diferencial de pressão através da torta e do meio filtrante

A: área transversal ao fluxo (área do meio filtrante)

$\mu$ : viscosidade do filtrado

L: espessura do meio filtrante + torta

R ou L/B: resistência ao fluxo (da torta e meio filtrante)

A Equação 1 indica que a velocidade de filtração ou o volume de filtrado que atravessa o elemento filtrante por unidade de tempo é diretamente proporcional à permeabilidade do leito, ao diferencial de pressão e à área de filtração, e inversamente proporcional à viscosidade do filtrado e à espessura da torta (GUIMARÃES, 2011).

De acordo com Araujo Júnior (2014) a permeabilidade do leito (meio filtrante e torta) pode ser expressa pela Equação 2 proposta por *Koseny*, a qual estabelece uma relação com a superfície específica das partículas minerais, massa dos sólidos e a porosidade do leito.

$$B = \frac{1}{K_c} \times \frac{\rho_s \varepsilon^3}{S^2 (1 - \varepsilon)^2} \quad (2)$$

Em que:

B: permeabilidade do leito

$\rho_s$ : massa específica dos sólidos;

$\epsilon$ : porosidade do leito (relação entre volume de vazios e o volume do leito)

$k_c$ : constante de *Koseny*, em função da porosidade, forma das partículas, orientação das partículas no leito e da distribuição granulométrica;

S: área superficial específica.

A Equação 2 mostra que o fluxo de filtrado diminui com o aumento da superfície específica, ou seja, polpas contendo partículas muito finas dificultam a filtração. Por outro lado, o desaguamento é bastante favorecido com o aumento da porosidade do leito e massa específica dos sólidos (GUIMARÃES, 2011).

#### 2.4.2 PROPRIEDADES DA POLPA

As polpas com elevado percentual de sólidos favorecem a filtração. Quanto mais densa a polpa, maior a razão de filtração e menor a velocidade. A velocidade de filtração mais baixa, não é um problema visto que a quantidade de água também é menor (CHAVES, 2013). Além disso, alguns modelos de filtros necessitam de uma concentração de sólidos mínima na alimentação para garantir o desempenho, isso se aplica principalmente aos filtros a vácuo. Diante disso, é comum o adensamento prévio da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento (GUIMARÃES, 2011).

O aumento de temperatura está relacionado à redução da viscosidade do filtrado o que facilita o escoamento. Os limites práticos de aumento de temperatura são definidos com base no ponto de ebulição do líquido, pela quantidade de vapor que começa a interferir na atuação do vácuo, pela solubilização de minerais da torta, ou por problemas de lubrificação das peças móveis do filtro (CHAVES, 2013). O aquecimento é uma operação considerada cara e, por este motivo, é de baixa aplicação em operações industriais (GUIMARÃES, 2011).

Em polpa, o tamanho das partículas faz com que propriedades da superfície se tornem importantes para partículas menores que cerca de 5 a 10  $\mu\text{m}$ . A carga superficial das partículas, que geralmente é representada pelo potencial zeta, é a de maior relevância. O potencial zeta depende das

propriedades do fluido ao redor da partícula, como a concentração e a valência dos íons na solução (WAKEMAN; TARLETON, 2005a).

No estudo com o *pellet feed*, realizado por Araujo Junior (2014), foi avaliada a influência do pH no desempenho da filtração. O reagente CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) foi adicionado para reduzir o pH da polpa. Observou-se que a redução do pH para valores até 7 aumentou a TUF e reduziu a umidade do *pellet feed*. A diminuição do pH reduziu o potencial zeta, o que acarretou maior agregação das partículas em razão da diminuição de sua repulsão eletrostática.

### 2.4.3 CARACTERÍSTICAS DO SÓLIDO

Caso as propriedades das partículas pudessem ser especificadas para uma filtração, o alvo seriam partículas com o maior tamanho possível, com o formato mais próximo do esférico e com uma distribuição de tamanho único. Na realidade, tem-se uma alimentação composta por uma distribuição de tamanho, com as partículas de menores tamanhos controlando muitos aspectos da filtração (WAKEMAN, 2007).

A distribuição granulométrica de partículas grossas gera torta com interstícios maiores, isso favorece a razão e a velocidade de filtração, e obtenção de tortas com menores umidades. Dessa maneira, as partículas finas dificultam a filtração (GUIMARÃES, 2011). Um pequeno aumento da quantidade de partículas finas pode reduzir de forma significativa as taxas de filtração (WAKEMAN, 2007).

Uma grandeza inversamente proporcional ao tamanho de uma partícula é sua área superficial. A área superficial por grama de um determinado produto é expressa pela superfície específica. Araujo Junior (2014) testou duas amostras, uma com 1430 cm<sup>2</sup>/g e outra com 1004 cm<sup>2</sup>/g. Observou-se que a redução da área superficial específica promoveu aumento expressivo na TUF e obtenção de teores mais baixos de umidade da torta. A elevação da TUF pode ser justificada pelo aumento da permeabilidade da torta, como indica a equação de *Kozeny* (Equação 2).

Espera-se que a forma das partículas também influencie na filtração. De acordo com Boskovic *et al.* (2005), as partículas com formas esféricas tendem a deslizar ou rolar pelo meio filtrante enquanto que as partículas cúbicas tendem

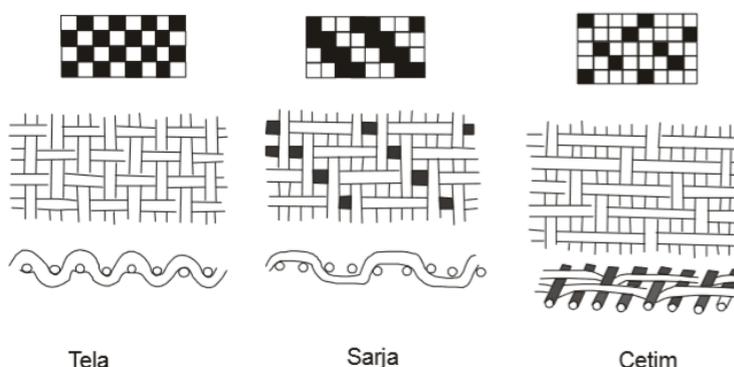
a deslizar ou tombar. No movimento de tombamento, aumentam-se as possibilidades do contato entre partícula e meio filtrante ser apenas pela lateral ou aresta. O resultado pode ser a não retenção da partícula pelo meio filtrante (RODRIGUES; RODRIGUES; RODRIGUES, 2019). Em geral, quanto mais próxima de uma esfera melhor o resultado da filtragem (WAKEMAN, 2007).

#### 2.4.4 MEIO FILTRANTE

Os meios filtrantes são os elementos responsáveis por reter as partículas sólidas e ao mesmo tempo possibilitar a passagem do líquido (AMARANTE, 2002). É considerado, na maior parte das vezes, o componente mais importante para obter a operação satisfatória de um filtro (CHAVES, 2013). Os critérios para uma boa avaliação de um meio filtrante incluem a sua permeabilidade antes e após o uso, a capacidade de retenção de partículas e a interação com as características das partículas a serem filtradas (forma e a distribuição de tamanho das partículas) (WAKEMAN; TARLETON, 2007a).

De acordo com Chaves (2013), são exemplos de fibras utilizadas como meio filtrantes: o acetato, acrílico, modacrylic, fluorocarbono, nomex, náilon, poliéster, polietileno, polipropileno, PVC (policloreto de vinila), PVA (poliacetato de vinila), rayon e saran. Quanto à tessitura do pano, os meios filtrantes podem ser de muitas maneiras, Chaves (2013) destaca que as mais importantes são de trama simples ou tela, sarja e cetim, mostradas nas Figuras 8 e 9.

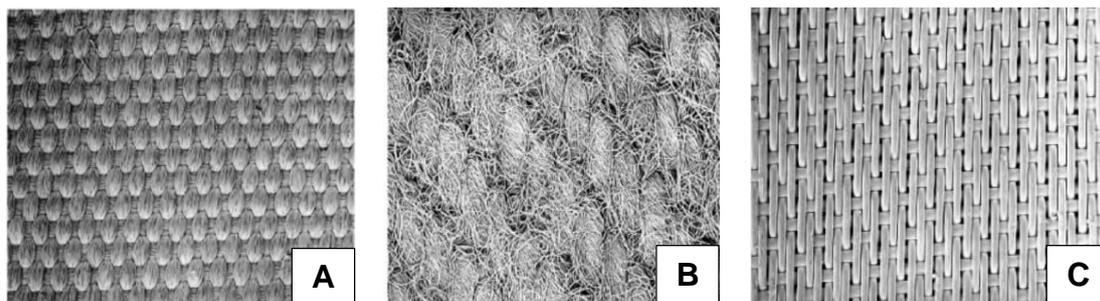
Figura 8 - Representação da tessitura do pano.



Fonte: CHAVES (2013).

A trama tela apresenta um trançado simples em que os fios passam por cima e por baixo uns dos outros. A sarja exibe um desenho diagonal em que um fio passa por cima e por baixo de dois ou mais fios consecutivos. Já no cetim, quatro ou mais fios cruzados passam por baixo de um mesmo fio, dando um aspecto mais liso ao tecido (CHAVES, 2013).

Figura 9 - Tessitura do meio filtrante. (A) tela; (B) sarja; (C) cetim.



Fonte: WAKEMAN; TARLETON (2007a).

De acordo com Wakeman e Tarleton (2007a), a trama tela tende a ser empregada quando a máxima limpidez do filtrado é requerida, a sarja em aplicações em que a durabilidade do tecido é preocupação primária e o cetim quando o requisito primário é a mínima umidade da torta, boa descarga e resistência ao cegamento. A Tabela 3 mostra o efeito da trama sobre a filtragem em ordem decrescente de preferência.

Tabela 3 - Efeito da trama sobre a filtragem.

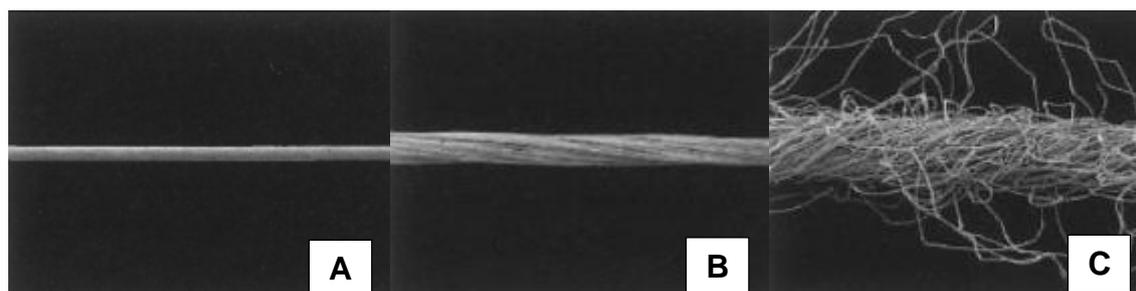
<b>Máxima limpidez do filtrado</b>	<b>Mínima resistência ao escoamento</b>	<b>Umidade mínima da torta</b>	<b>Mais fácil descarga da torta</b>	<b>Máxima vida de tela</b>	<b>Mínima tendência a cegar</b>
tela	cetim	cetim	cetim	sarja	cetim
sarja	sarja	sarja	sarja	tela	sarja
cetim	tela	tela	tela	cetim	tela

Fonte: WAKEMAN; TARLETON (2007a).

As características do fio podem ser monofilamentar (mono), multifilamentar (multi) ou felpudo, como mostra a Figura 10. Os monofilamentares são fios simples de seção transversal circular com diâmetros de 0,1 a 0,3 mm que se caracterizam pela resistência ao cegamento, facilidade

em descarregar tortas com mínima umidade. Os multifilamentares contêm um grande número de fios de diâmetros menores que 0,03 mm e se caracterizam por serem mais propensos ao cegamento que os monofilamentares (CARDOSO, 2018). Os felpudos são produzidos a partir de fibras naturais de comprimentos curtos, como algodão ou lã, fiadas em conjunto, são bastante interessantes quando é requerida a máxima limpidez do filtrado (CHAVES, 2013).

Figura 10 - Características do fio. (A) monofilamentar; (B) multifilamentar; (C) felpudo.



Fonte: WAKEMAN; TARLETON (2005a).

A Tabela 4 mostra o efeito da característica do fio sobre os resultados da filtração em ordem decrescente de preferência.

Tabela 4 - Efeito das características do fio na filtração.

<b>Máxima limpidez do filtrado</b>	<b>Mínima resistência ao escoamento</b>	<b>Umidade mínima da torta</b>	<b>Mais fácil descarga da torta</b>	<b>Máxima vida de tela</b>	<b>Mínima tendência a cegar</b>
felpudo	mono	mono	mono	felpudo	mono
multi	multi	multi	multi	multi	multi
mono	felpudo	felpudo	felpudo	mono	felpudo

Fonte: CHAVES (2013)

No geral, Chaves (2013) destaca que um bom meio filtrante deve apresentar mínima propensão ao cegamento, resistência ao ataque químico, resistência mecânica, resistência ao desgaste, maleabilidade para se adaptar ao filtro e custo compatível com a economia da operação. A escolha mais acertada vai depender do compromisso entre a turbidez e percentual de sólidos no filtrado desejado, produtividade do filtro e teor de umidade residual da torta.

#### 2.4.5 REAGENTES AUXILIARES

A agregação de polpas é desejável na filtragem especialmente em casos em que a polpa apresenta partículas de granulometria fina ou de elevadas superfícies específicas. As modificações no estado de agregação/dispersão de uma polpa, nas características de superfície de uma partícula e na tensão superficial do líquido podem causar grande influência sobre os resultados de filtragem (AMARANTE, 2002).

A agregação obtida pela redução da repulsão eletrostática existente entre as partículas em suspensão pela adição de eletrólitos inorgânicos é chamada de coagulação. São utilizados eletrólitos com cargas de sinal opostos ao da superfície das partículas para neutralização de cargas. Os reagentes empregados são sais solúveis de  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  e  $Ca^{2+}$ . O sulfato de alumínio e a cal são coagulantes consagrados (CHAVES, 2013).

A floculação é a agregação conseguida pela adição de polímeros orgânicos com elevado peso molecular, que promovem a ligação entre as partículas servindo como pontes e originando agregados chamados flóculos ou focos. O desempenho dos floculantes é afetado por fatores como diluição e preparo, dosagem, peso molecular, agitação, pH, força iônica da solução e percentual de sólidos na polpa (VALADÃO, 1996 *apud* AMARANTE, 2002).

Os floculantes mais eficazes devem ser aqueles capazes de formar pequenos agregados e resistentes ao cisalhamento. A agitação ideal é aquela capaz de propiciar o contato entre o polímero e a partícula, quando insuficiente pode levar a uma má distribuição do floculante na polpa e em excesso pode causar a quebra dos agregados já formados ou da própria molécula (CHAVES, 2013).

Os surfactantes são substâncias orgânicas constituídas por moléculas de caráter anfipático, ou seja, polar e apolar. Na filtragem, os surfactantes atuam na interface sólido-líquido tornando a superfície do mineral hidrofóbica e na interface líquido/ar diminuindo a tensão superficial reduzindo as forças que retém água nos capilares da torta (DIAS; SILVA; PERES; VALADÃO, 2004).

Os auxiliares de filtragem têm como elemento ativo um ou mais surfactantes, são adicionados na polpa para diminuir a tensão superficial da água ou por atuarem como floculantes (AMARANTE, 2002; CHAVES, 2013). Esses

reagentes podem interferir na porosidade e resistência específica da torta, umidade de torta e taxa unitária de filtração (DIAS; SILVA; PERES; VALADÃO, 2004).

Amarante (2002) estudou a influência da adição de surfactantes e floculantes em polpas de minério de ferro e notou que a adição do floculante provocou a diminuição no tempo de formação da torta e a adição do surfactante contribuiu para diminuição da umidade da torta.

## **2.5 Filtros rotativos a vácuo**

Os filtros rotativos a vácuo são equipamentos que operam segundo forças induzidas por vácuo e meios semipermeáveis. Essa categoria engloba basicamente quatro tipos de filtros: tambor, disco, plano ou mesa e correia (WAKEMAN; TARLETON, 2007b).

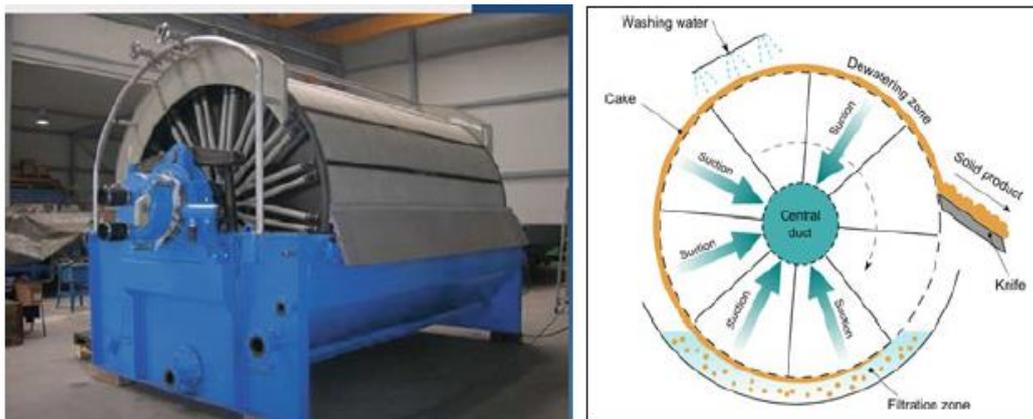
Uma classificação usual é feita em função da posição relativa de alimentação da polpa nos filtros a vácuo. Os filtros de tambor e disco são ditos de alimentação por baixo ou inferior. Os filtros de correia e mesa (plano) são de alimentação por cima ou superior (GUIMARÃES, 2011). A alimentação por baixo é considerada por Chaves (2013) a mais vantajosa do ponto de vista operacional, porém é limitada a polpas que possam ser mantidas em suspensão sem agitação turbulenta.

Uma boa configuração dos filtros de disco, tambor e mesa produzem tortas de 12 a 18% de umidade, e um filtro de correia pode atingir teores de umidade de 8 a 10% (CONCHA, 2014). Purchas e Wakeman (1986) citados por Concha (2014) enfatizam que para a aplicação do filtro industrial ser prática, as tortas produzidas devem estar com espessura suficiente para a descarga. A espessura mínima de torta produzida pelos filtros de disco são da ordem de 10 a 13 mm, para os filtros de tambor devem ser de 3 a 6 mm, para os filtros de correia de 3 a 5 mm e filtros de mesa de 20 mm (CONCHA, 2014; WAKEMAN; TARLETON, 2007b).

### 2.5.1 FILTRO DE TAMBOR

O filtro de tambor consiste de um cilindro giratório com superfície coberta de meio filtrante, como mostra a Figura 11. Dentro do cilindro existem compartimentos denominados setores que se comunicam com tubulações de vácuo e ar comprimido no eixo central (CHAVES, 2013).

Figura 11 - Filtro de tambor.



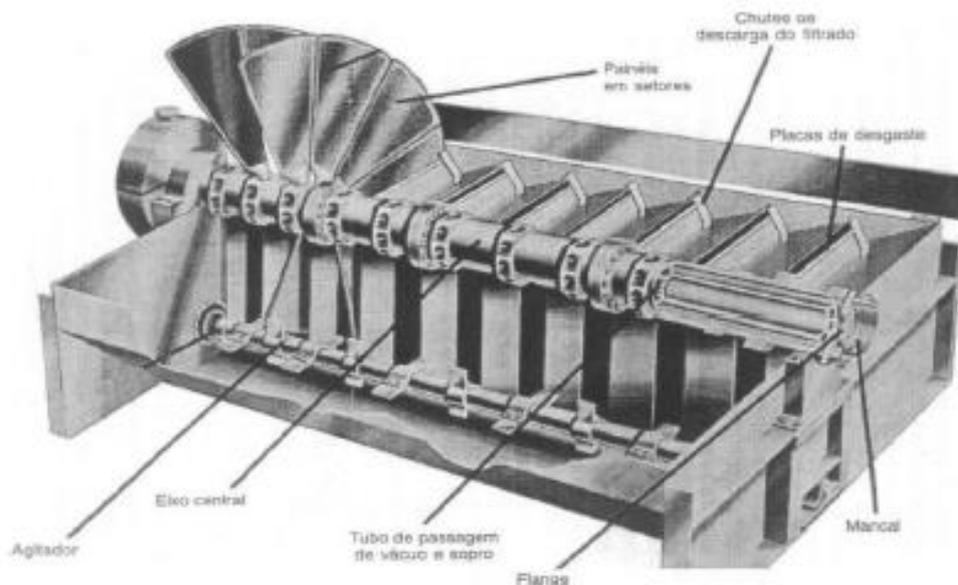
Fonte: CONCHA (2014).

Durante o movimento de rotação do cilindro em um tanque de polpa para ser filtrada, o líquido é aspirado para o interior sob ação do vácuo e as partículas sólidas são retidas na superfície submersa do meio filtrante. Esta superfície eventualmente emerge e o ar aspirado através da torta desloca a água dos poros, secando a torta. Após a secagem, a torta é soprada e descarregada com auxílio de um mecanismo de raspagem. O filtro de tambor permite lavagem e desentupimento da tela (CONCHA, 2014).

## 2.5.2 FILTRO DE DISCO

O filtro de disco é um equipamento constituído de vários discos verticais arranjados de forma paralela e interligados por um eixo horizontal que passa pelo centro dos discos, conforme Figura 12 (CHAVES, 2013).

Figura 12 - Representação do filtro de disco convencional.

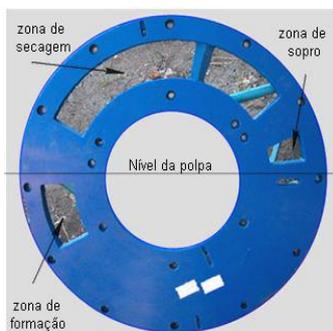


Fonte: CHAVES (2013).

O disco individual é constituído de vários setores independentes revestidos com tecido filtrante. Dentro de cada setor há conexões com tubulações de vácuo e ar comprimido responsáveis por determinar as etapas do ciclo de filtração (CONCHA, 2014; CHAVES, 2013). O ciclo equivale ao giro completo dos discos em uma bacia de polpa a ser filtrada.

O elemento responsável por adequar os períodos de sucção, sopro ou sem movimentação de ar, também denominados de tempos mortos, é uma válvula com aberturas desenhadas, conforme Figura 13 (GUIMARÃES, 2011).

Figura 13 - Válvula de vácuo para filtro de disco.



Fonte: GUIMARÃES (2011).

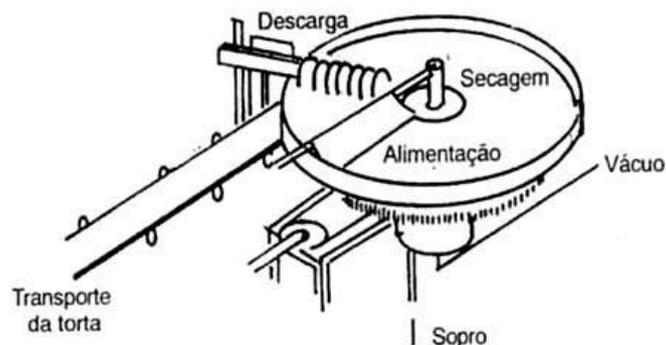
A torta é formada junto ao meio filtrante quando os discos estão submersos no tanque de polpa sob ação de vácuo. Ao imergir, inicia-se a etapa de secagem ou remoção de líquido da torta formada, ainda por ação de vácuo. O filtrado move-se para dentro do setor para ser recolhido (CONCHA, 2014; GUIMARÃES, 2011). A última etapa do ciclo é a descarga da torta produzida. Ela é soprada por ação de ar comprimido e cai em calhas que direcionam a torta para um transportador de correia instalado embaixo do filtro (CHAVES, 2013; GUIMARÃES, 2011).

Os filtros de disco são equipamentos aplicados na mineração quando deseja-se filtrar materiais finos que não obstruam a tela e que formem polpas que possam ser mantidas em suspensão. Algumas características marcantes desse equipamento são a enorme área filtrante em relação área de piso ocupada na usina, haja vista que ambas as superfícies do disco são filtrantes, é um equipamento barato e de baixo custo operacional (CHAVES, 2013; CONCHA, 2014).

### 2.5.3 FILTRO PLANO OU MESA

O filtro plano ou mesa é constituído de uma superfície circular horizontal que gira em torno de um eixo vertical sobre a qual é apoiado o meio filtrante e despejada a polpa a filtrar, conforme representação da Figura 14.

Figura 14 - Ilustração do filtro plano ou mesa.



Fonte: CHAVES (2013).

O círculo é composto de vários setores ligeiramente inclinados que se comunicam com uma câmara de vácuo e, na posição de descarga, com uma câmara de ar comprimido, ambas posicionadas debaixo do filtro. A torta formada é recolhida por um transportador helicoidal e descarregada sobre um transportador de correia (CONCHA, 2014).

O filtro plano é aplicado a polpas heterogêneas constituídas de partículas grossas (CHAVES, 2013). A principal desvantagem desse filtro é a existência de apenas uma superfície filtrante, ou seja, capacidade por unidade de piso limitada (CONCHA, 2014).

#### 2.5.4 FILTRO DE CORREIA

O filtro de correia é constituído por uma correia de borracha perfurada que se movimenta continuamente e é utilizada para apoiar o meio filtrante, conforme Figura 15.

Figura 15 - Filtro de correia.



Fonte: CONCHA (2014).

A polpa é alimentada em uma extremidade da correia e descarregada na extremidade oposta. O vácuo é aplicado abaixo do meio filtrante por meio de uma caixa de vácuo estacionária que percorre todo o comprimento do filtro (CONCHA, 2014). Esse filtro é muito eficiente para processar polpas heterogêneas e vazões de sólidos que não são tratadas nos outros tipos de filtros. Além disso, permite a lavagem do meio filtrante (CHAVES, 2013).

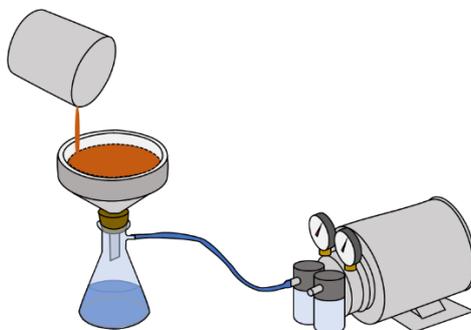
#### 2.6 Teste de folha

O *leaf test* ou teste de folha é um ensaio de bancada para dimensionamento de filtros industriais contínuos a vácuo e simulações em geral que envolvam variáveis que influenciam o sistema de filtração (SILVA; VALADÃO; AMARANTE, 2002). O ensaio reproduz em escala de laboratório as etapas de formação e de secagem da torta de um filtro a vácuo. O tempo de formação é um valor definido para atingir determinada espessura de torta assim como o tempo de secagem é para a umidade final (CHAVES, 2013). Contudo,

não é possível quantificar tempos de sopro e os tempos mortos (tempo existente entre formação da torta e secagem).

A montagem típica do *leaf test* constitui a folha de teste coberta de tecido filtrante ligada a uma bomba de vácuo e a um recipiente para a retenção do filtrado (GOMES; VALADÃO; ARAÚJO; SILVA, 1998). O teste possibilita que polpa seja alimentada por cima ou por baixo. No caso de filtros contínuos horizontais a vácuo, de alimentação superior, o teste é realizado com a polpa sendo despejada sobre a folha de teste (GOMES; VALADÃO; ARAÚJO; SILVA, 1998). Nesse caso, afixa-se o meio filtrante em um anteparo, que pode ser um funil de *Buchner* ou um outro aparato, como indicado na Figura 16.

Figura 16 - Representação do teste de folha de alimentação superior.

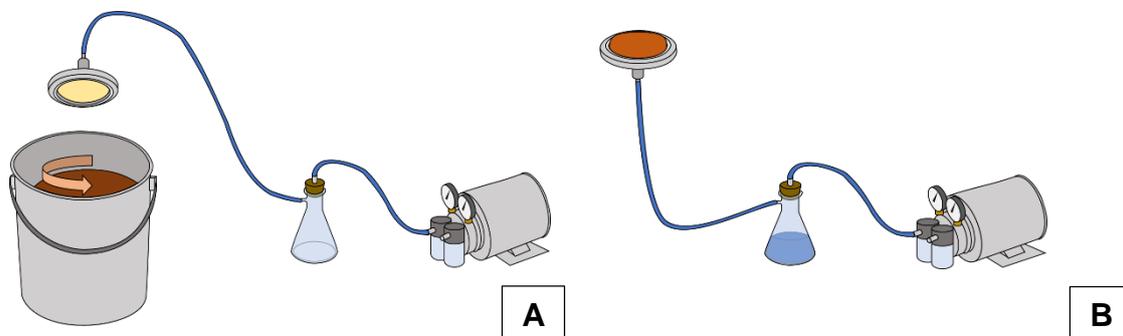


A torta é formada por ação da força de gravidade e de vácuo. O tempo de formação de torta é medido durante o ensaio considerando o tempo gasto para que a torta seja vista sem a presença de líquido em sua superfície (GUIMARÃES, 2011). O tempo de secagem é pré-estabelecido com base nos resultados de testes anteriores e umidade desejável.

Para os filtros contínuos de tambor e disco, de alimentação inferior, o teste é realizado com a inserção da face da folha de teste na polpa a ser filtrada sob ação de vácuo durante um tempo pré-estabelecido como de formação da torta. Após esse intervalo, o dispositivo é retirado da polpa e invertido 180°, ainda sob ação do vácuo, até o término de um tempo pré-estabelecido como de secagem da torta (GUIMARÃES, 2011).

A Figura 17 é uma representação do teste folha de alimentação inferior.

Figura 17 - Representação do teste de folha de alimentação inferior. (A) etapa de formação da torta; (B) etapa de secagem da torta.



Em ambas as configurações, ao final do teste, recolhe-se o filtrado e a torta para a pesagem das massas úmida e seca. A espessura da torta, o nível de vácuo, o volume e a turbidez de filtrado também são dados interessantes de serem coletados. Com base nesses dados são determinados os parâmetros quantificadores da filtração, os quais são a umidade da torta, a taxa unitária de filtração (TUF) e a porcentagem de sólidos no filtrado.

A umidade da torta em base úmida (b.u) é a relação entre a quantidade de água presente entre as partículas sólidas dividida pela massa úmida, obtida conforme Equação 3.

$$Umidade\ b.u\ (\%) = \frac{massa\ úmida\ (g) - massa\ seca\ (g)}{massa\ úmida\ (g)} \times 100 \quad (3)$$

A TUF ou produtividade é o parâmetro que quantifica a massa seca produzida em relação à área filtrante por unidade de tempo. O cálculo dessa taxa pode ser obtido por meio da Equação 4 (ARAÚJO JUNIOR, 2014).

$$TUF\ \left(\frac{kg}{m^2}\right) = \frac{massa\ seca\ (kg) \times 3600}{área\ de\ filtração\ (m^2) \times tempo\ de\ ciclo(s)} \quad (4)$$

Quanto ao filtrado, o interessante é a ausência ou baixa proporção de partículas sólidas. Sugere-se determinar a porcentagem de sólidos do filtrado,

conforme Equação 5, ou medir a turbidez por meio do equipamento turbidímetro. Em que  $m_s$  é a massa seca e  $m_p$  é a massa da polpa.

$$\text{Percentual de sólidos no filtrado em massa (\%)} = \frac{m_s}{m_p} \times 100 \quad (5)$$

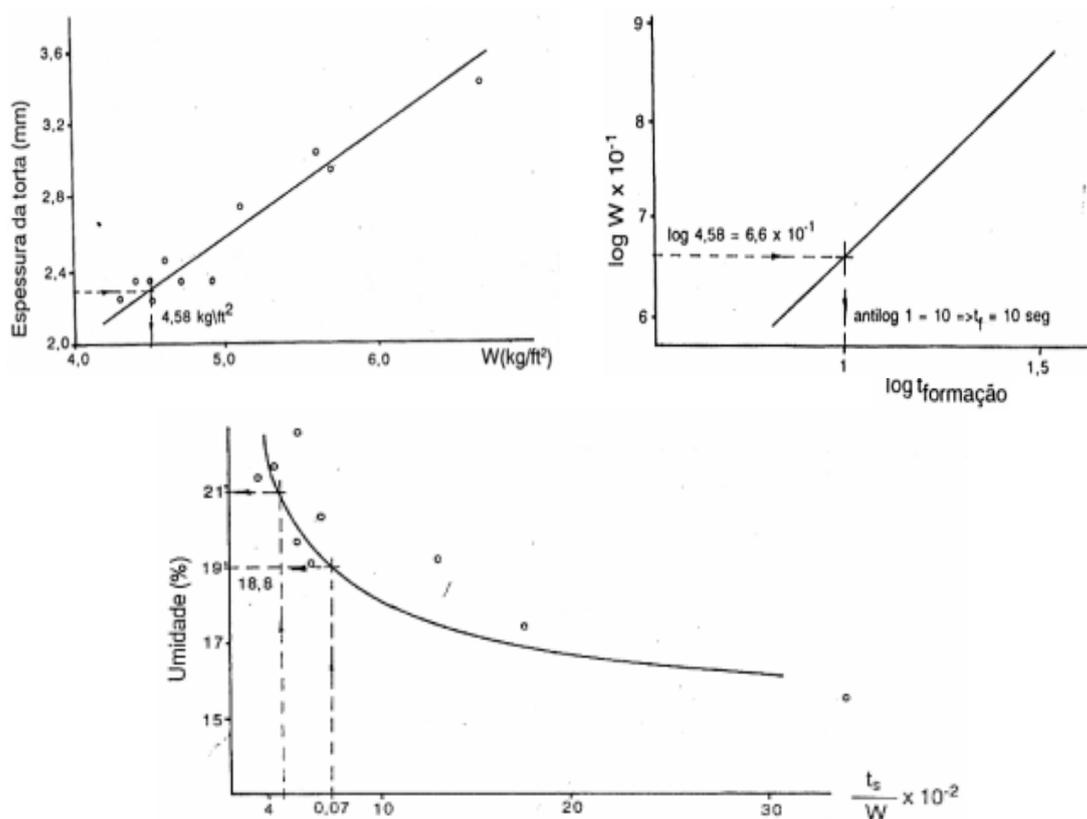
O percentual de sólidos no filtrado pode indicar, por exemplo, se o meio filtrante está sendo eficaz na retenção das partículas ou o desempenho de reagentes auxiliares de filtração na clarificação do filtrado.

Apesar de procedimento específico do teste de folha, não existe uma padronização sobre a forma do recipiente mais adequado para armazenar a polpa, a maneira de adição de reagentes auxiliares, o tipo de agitação dentre mecânica contínua, descontínua e manual, o modo de inserção e de retirada da folha de teste da polpa (SILVA; VALADÃO; AMARANTE, 2002).

### 2.6.1 DIMENSIONAMENTO

O método de dimensionamento de filtros a vácuo recomendado por Chaves (2013) a partir do teste de folha consiste em variar os tempos de formação e secagem da torta e com base nos resultados de espessura da torta, umidade e massa de torta seca formada por unidade de área construir gráficos de correlação, conforme Figura 18. O conhecimento do tempo de uma etapa é suficiente para determinar o ciclo completo.

Figura 18 - Tratamentos dos resultados do teste de folha.



Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2004).

As etapas do ciclo devem corresponder a um percentual mínimo do ciclo total para garantir o desempenho previsto do equipamento escolhido. A distribuição dos tempos varia conforme as diferentes tecnologias de filtragem existentes no mercado (disco, tambor, plano, etc.) e fabricantes de equipamentos (GUIMARÃES, 2011).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os materiais e os procedimentos para a caracterização da amostra, preparo de polpas e dos reagentes auxiliares de filtragem bem como a execução do teste de folha.

#### 3.1 Preparação da amostra

O estudo foi conduzido com uma amostra de rejeito de flotação. A amostra foi coletada na forma de polpa a 32% de sólidos em massa, desaguada, seca em estufa a 100°C e desaglomerada para a homogeneização em pilha alongada, conforme Figura 19.

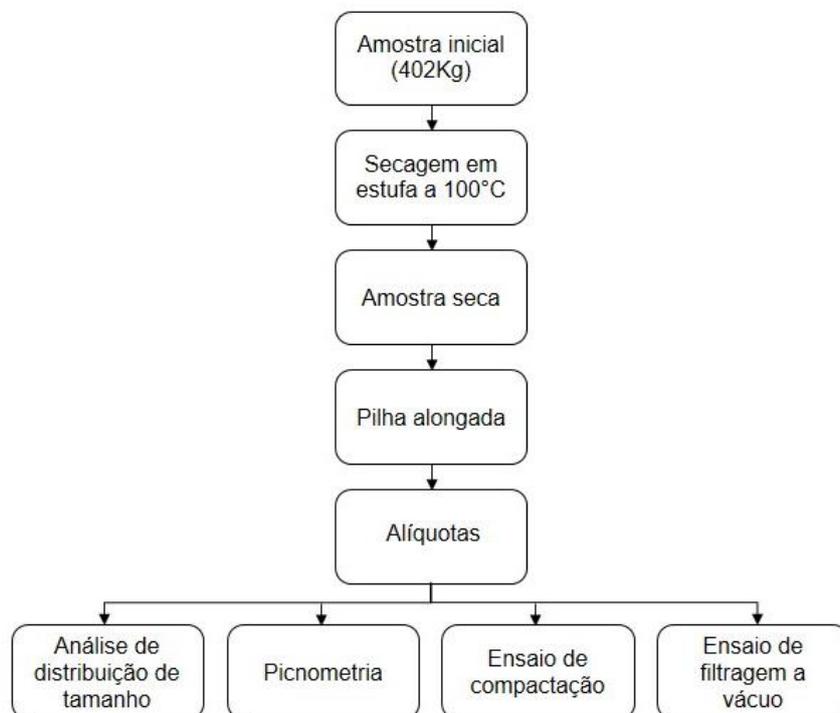
Figura 19 - Preparação da amostra. (A) secagem; (B) homogeneização.



Em seguida, alíquotas de 5kg foram retomadas da pilha e ensacadas para os ensaios de caracterização física e testes de filtragem pelo arranjo teste de folha de alimentação inferior com a intenção de simular a utilização de filtro de disco a vácuo. O filtro de disco geralmente é a primeira opção a ser avaliada pela elevada relação área filtrante em relação a área ocupada na usina e custo de investimento e operação inferior aos demais filtros. Esse é um fator relevante haja vista que geralmente uma expressiva quantidade de massa é destinada ao tratamento de rejeitos.

O fluxograma da Figura 20 indica a sequência dos procedimentos realizados em laboratório.

Figura 20 - Fluxograma de preparação de amostras.



As seguintes análises foram realizadas para caracterização da amostra:

- i) Análise de distribuição de tamanho de partículas, via difração a *laser*, em equipamento *Bettersizer S3 Plus*;
- ii) Determinação da densidade dos sólidos, pela técnica de picnometria com a utilização de picnômetros de 50 mL;
- iii) Determinação da umidade ótima pelo ensaio geotécnico de compactação em cilindro de Proctor normal.

### 3.2 Análise granulométrica

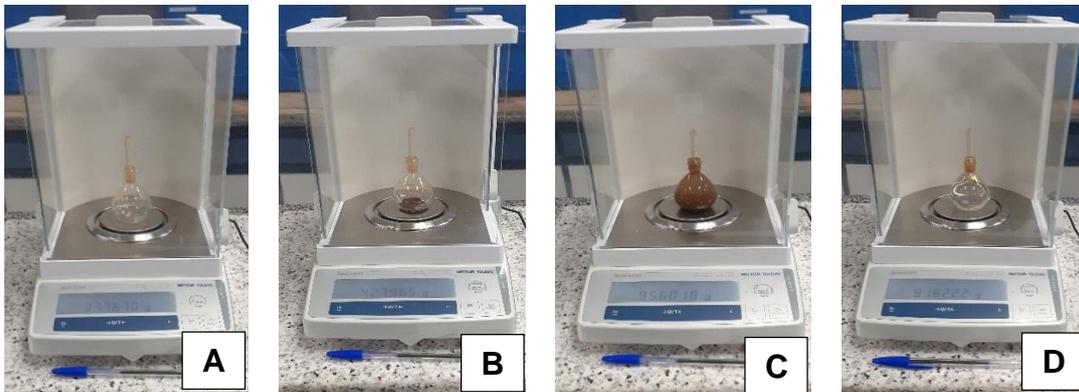
A análise da distribuição de tamanho de partículas, foi realizada pelo método de difração a *laser*, em equipamento *Bettersizer S3 Plus*.

### 3.3 Picnometria

As massas referentes ao picnômetro vazio e seco ( $A1$ ), ao picnômetro com as partículas sólidas ( $A2$ ), ao picnômetro com água e sólidos ( $A3$ ), e ao picnômetro com água ( $A4$ ), oriundas de pesagem em balança *Mettler Toledo* de precisão de quatro casas decimais, conforme Figura 21, foram empregadas na Equação 6 para determinação da densidade dos sólidos ( $d_s$ ). Foi considerada a média de quatro medidas.

$$d_s = \frac{A2 - A1}{(A4 + A2) - (A1 + A3)} \quad (6)$$

Figura 21 - Ensaio de picnometria. (A) picnômetro vazio; (B) picnômetro com partículas sólidas; (C) picnômetro com água e sólidos; (D) picnômetro com água.



### 3.4 Ensaio de compactação

De acordo com a norma ABNT NBR Solos – Ensaio de Compactação 7182:2016, realizou-se o teste de compactação para determinação da umidade ótima (referência para a filtragem de rejeitos haja vista que indica a possibilidade de compactação eficiente nas pilhas). Utilizou-se um cilindro metálico pequeno de Proctor de 992cm<sup>3</sup> acoplado ao seu cilindro complementar e um soquete pequeno de 2,5 kg, como mostra a Figura 22.

Figura 22 - Ensaio de compactação.



Os ensaios foram realizados sem reuso de material com a massa de 4000 g do rejeito preparada em diferentes níveis de umidade. No primeiro ensaio, adicionou-se água para obter teor de umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima presumível, no segundo ensaio, adicionou-se água de forma a incrementar em 2% a umidade em relação à primeira, e assim por diante. A Tabela 5 indica as quantidades adicionadas de água a cada ensaio.

Tabela 5 - Quantidades adicionadas de água.

Ensaio	1	2	3	4	5
<b>Massa de rejeito (g)</b>	4000	4000	4000	4000	4000
<b>Massa de água adicionada (g)</b>	400	480	560	640	720

Após a completa homogeneização da água na massa de sólidos, adicionou-se a amostra de rejeito aos poucos ao cilindro de Proctor e seu complementar de maneira a formar três camadas de altura aproximadamente

iguais. Na superfície de cada camada foram aplicados 26 golpes do soquete a uma altura fixa e de forma uniformemente distribuída. Depois da compactação da última camada, retirou-se o cilindro complementar e removeu-se o excesso de rejeito acima do cilindro de Proctor com o auxílio de uma régua biselada. A Figura 23 mostra a massa de rejeito compactado em um dos ensaios realizados.

Figura 23 - Massa úmida de rejeito compactado retirado do cilindro de Proctor em um dos testes realizados.



Ao final, pesou-se a massa úmida de rejeito compactado, e retirou-se uma alíquota para determinação da umidade em base seca ( $w_{b.s}$ ) expressa em percentual, conforme Equação 7.

$$w_{b.s} = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (7)$$

Em que  $mu$  é a massa úmida e  $ms$  é a massa seca obtida pela permanência da amostra em estufa a  $100^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.

A massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), expressa em gramas por centímetro cúbico, foi obtida pelo uso da Equação 8.

$$\rho_d = \frac{mu \times 100}{V(100 + w_{b.s})} \quad (8)$$

Em que  $V$  é o volume do molde cilíndrico em centímetros cúbicos,  $wb.s$  é o teor de umidade em base seca do rejeito compactado em porcentagem, e  $mu$  é a massa úmida de rejeito compactado.

Por fim, traçou-se a curva de teor de umidade *versus* a massa específica aparente seca com os dados de cada ensaio, obtendo-se dois pontos no ramo seco, dois no ramo úmido além da ótima. Para a conversão de umidade em base seca para a umidade em base úmida, parâmetro comumente utilizado para quantificar a filtragem ( $wb.u$ ), foi utilizada a Equação 9.

$$wb.u = \frac{wb.s}{1 + wb.s} \times 100 \quad (9)$$

Em que  $wb.s$  é a umidade em base seca.

### 3.5 Preparação de polpas para a filtragem

A massa de sólidos do rejeito foi empalpada a 65% de sólidos em massa para reproduzir em escala de laboratório as condições da realidade industrial. O volume da polpa foi estipulado em 7 litros com base na capacidade volumétrica do recipiente disponível no laboratório. A Tabela 6 mostra os parâmetros de preparação.

Tabela 6 - Preparo da polpas.

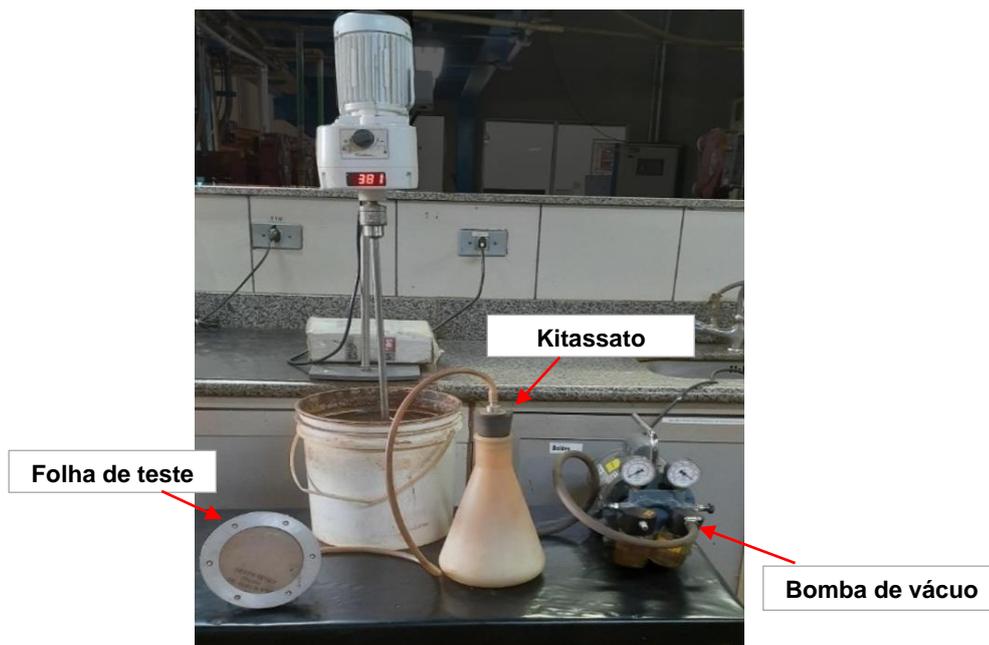
<b>Volume de polpa (mL)</b>	<b>Massa de sólidos (g)</b>	<b>Massa de água (g)</b>
7000	8954	4821

A polpa foi colocada em suspensão por agitação mecânica em frequência de 381 rpm. Utilizou-se um pHmetro da marca *Mettler Toledo* para ajuste do pH da polpa para a condição neutra (pH=6) com a utilização de uma solução de cal a 10%.

### 3.6 Teste de folha

O sistema típico de filtração a vácuo foi montado no laboratório composto por um reservatório de vácuo (kitassato) interligado por mangueiras à folha de teste revestida de meio filtrante e à bomba de vácuo, conforme Figura 24.

Figura 24 - Sistema de filtração.



A folha de teste utilizada apresenta diâmetro de 11,2 cm e área de aproximadamente 0,001 m<sup>2</sup> e constitui em seu interior uma placa ranhurada para drenagem do filtrado, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Folha de teste com a placa ranhurada de drenagem.



O procedimento padrão do teste de folha foi definido da maneira descrita a seguir. Imergiu-se a folha de teste, sob ação de vácuo de aproximadamente -

600mmHg, no balde com a polpa de rejeitos, durante o tempo pré-estabelecido como de formação da torta. Em seguida, ainda sob ação de vácuo, retirou-se a folha de teste da polpa, invertendo-a de modo que sua face ficasse posicionada para cima bem como a mangueira de drenagem estivesse para baixo, durante o tempo pré-estabelecido de secagem da torta.

Ao final desse período, desligou-se a bomba de vácuo e a torta foi descarregada em uma bandeja com o auxílio de uma espátula. Mediu-se a espessura da torta produzida em três pontos por meio de um paquímetro, e registrou-se seu aspecto/homogeneidade bem como a presença de rachaduras. Posteriormente, pesou-se a massa úmida da torta e depois de seca pela permanência em estufa a aproximadamente 100°C durante 24 horas. Quanto ao filtrado armazenado no kitassato, homogeneizou-se, aferiu-se o volume, pesou-se a massa úmida e seca, e determinou-se a porcentagem de sólidos em massa.

A umidade da torta, o percentual de sólidos do filtrado e a taxa unitária de filtração (TUF) foram os parâmetros empregados para expressar os resultados do teste.

Os ensaios de teste de folha foram realizados em três etapas, a primeira para a definição dos tempos de formação e secagem da torta, a segunda para avaliação de tecidos filtrantes e a terceira para avaliação da aplicação de auxiliares de filtração.

### 3.6.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CICLO

Nessa etapa, somente os tempos de formação e secagem da torta foram variados, as demais variáveis foram mantidas fixas, conforme procedimentos descritos nos itens 3.5 e 3.6. Os pares de tempos de formação e secagem investigados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Variação dos tempos de formação e secagem da torta.

<b>Tempo de formação (s)</b>	15	13	12	11	10	8	7	6	5
<b>Tempo de secagem (s)</b>	54	46	43	39	36	29	25	21	18

Definiu-se como desejável espessura de torta de 13 mm, a máxima recomendada por Purchas e Wakeman (1986) citados por Concha (2014) que defendem que para a operação satisfatória de um filtro de disco a vácuo ser prática a espessura mínima da torta deve estar entre 10 a 13 mm.

Em relação à umidade da torta, considerando a intenção de empilhar o rejeito, seguiu-se a recomendação de Davies (2011), em que o teor de umidade alvo/alcançável na planta de filtragem deve ser equivalente à umidade ótima de compactação definida em ensaio de compactação com variação aceitável de até 1 ou 2% de umidade abaixo da ótima em climas mais úmidos, e em climas extremamente secos, 1% acima. Definiu-se como desejável o valor mais baixo como fator de segurança (11% de umidade em base úmida).

### 3.6.2 AVALIAÇÃO DE TECIDOS FILTRANTES

Foram avaliados oito modelos de tecidos filtrantes monofilamentares da fornecedora Sefar, conforme mostra a Figura 26, distintos entre si em relação a trama, material de construção e permeabilidade. A Tabela 8 apresenta a identificação dos modelos e suas respectivas características.

Figura 26 - Modelos de tecidos filtrantes.



Tabela 8 - Características dos tecidos filtrantes.

Meio filtrante	Trama	Material	Permeabilidade (m <sup>3</sup> /s)
05-1010-K 080	Cetim	PP	0,05
04-1010-K 062	Cetim	PA	0,06
27-8001-SK 079	Cetim	PA	0,05
23-1001-K 056	Cetim	PA	0,06
03-1001-K 050	Sarja	PA	0,03
03-1010-K 050	Sarja	PA	0,03
03-1010-K 056	Cetim	PA	0,06
03-1001-SK 066	Tela	PA	0,02

PP: polipropileno; PA: poliamida

Padronizou-se, antes da realização dos testes válidos de filtragem para avaliação de tecidos filtrantes, submeter a amostra de tecido a duas filtrações consecutivas apenas com a intenção de “sujá-la” ou saturá-la.

### 3.6.3 APLICAÇÃO DE REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAGEM

Os testes de filtragem para avaliação de reagentes auxiliares foram realizados com o objetivo de encontrar oportunidades para a redução na umidade da torta e na concentração de sólidos no filtrado, e aumento da TUF bem como investigar a melhor dosagem. Foram avaliados três reagentes coagulantes, designados R-1607, R-1687 e o sulfato de alumínio, os quais foram preparados na concentração de 0,25% (m/v) e dosados na polpa a 10, 55 e 100 g/t, conforme parâmetros mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de preparação dos reagentes.

<b>Dosagem do reagente (g/t)</b>	<b>Volume da solução de reagente (mL)</b>
10	35,6
55	195,8
100	356,0

A adição do reagente foi feita na polpa a 65% de sólidos, conforme descrição no item 3.5, e mantida em suspensão por meio de um agitador mecânico em frequência de 381 rpm até a completa homogeneização. Feito o condicionamento, procedeu-se com o teste de folha padronizado descrito no item 3.6.

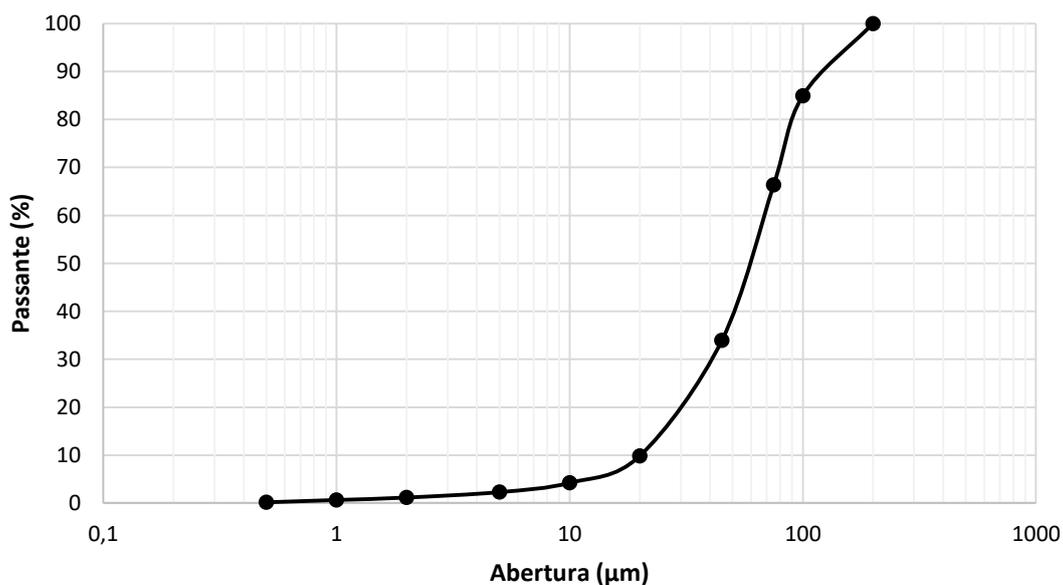
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados acerca da caracterização física do rejeito que contempla análise granulométrica, densidade dos sólidos e ensaio de compactação e dos ensaios de filtragem de folha. Esse últimos estão subdivididos em três etapas. A primeira refere-se aos resultados da variação dos tempos de formação e secagem da torta para dimensionamento, a segunda apresenta os resultados da avaliação de tecidos filtrantes, e a terceira, da aplicação de reagentes auxiliares de filtragem.

### 4.1 Análise granulométrica

A Figura 27 mostra a curva de distribuição granulométrica do rejeito de flotação obtida pelo método de difração a *laser*. O tamanho em que 80% das partículas são passantes,  $d_{80}$ , é de 93,35  $\mu\text{m}$ . O tamanho em que 50% das partículas são passantes,  $d_{50}$ , é de 59,85  $\mu\text{m}$ . Além disso, observa-se que há uma significativa parcela que equivale a 30% da amostra com granulometria abaixo de 40  $\mu\text{m}$ .

Figura 27 - Curva de distribuição granulométrica da amostra.



## 4.2 Densidade dos sólidos

As densidades dos sólidos ( $d_s$ ) obtidas nas picnometrias, conforme descrição no item 3.3, estão expressos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados da picnometria.

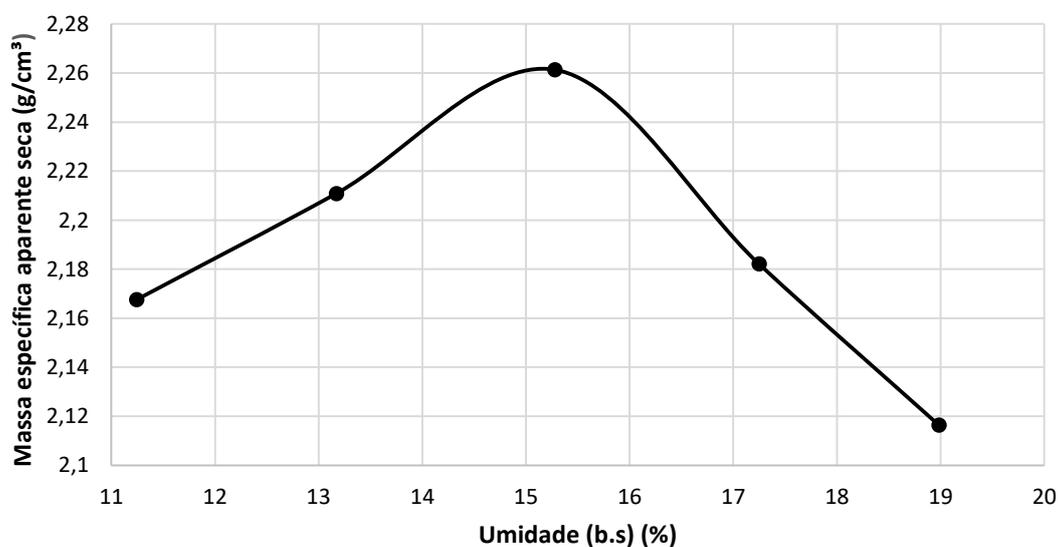
Teste	1	2	3	4
<b>A1 (g)</b>	36,4272	37,7668	36,4274	37,767
<b>A2 (g)</b>	41,49	42,7839	41,4368	42,7965
<b>A3 (g)</b>	91,5129	91,8228	91,4813	95,6018
<b>A4 (g)</b>	87,6666	91,8228	87,6661	91,8222
<b><math>d_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	4,1618	4,0608	4,1948	4,0239

O resultado da massa específica média foi 4,11 g/cm<sup>3</sup> com desvio padrão de 0,08 g/cm<sup>3</sup>, o que indica uma boa reprodutibilidade dos ensaios realizados.

## 4.3 Umidade ótima de compactação

A partir dos cálculos de umidade e massa específica aparente seca decorrentes de cada ensaio de compactação realizado para as cinco porções do rejeito em níveis distintos de umidade, conforme item 3.4, foi traçada a curva da Figura 28, obtendo-se dois pontos no ramo seco e dois no úmido.

Figura 28 - Gráfico da curva de compactação.



A análise da curva de compactação mostra que a adição de água causa aumento da massa específica aparente seca do rejeito compactado até certo ponto. A partir daí, observa-se o efeito inverso, ou seja, a massa específica aparente seca reduz com o aumento da umidade. O teste comprova experimentalmente que a adição de determinada quantidade de água a um rejeito seco facilita a sua compactação (REINERT; SILVA; DINIZ, 2015).

O ponto de inflexão da curva representa a massa específica aparente seca máxima, que nesse caso, apresentou valor de 2,263 g/cm<sup>3</sup>, e 15% é a umidade ótima associada. A conversão de umidade geotécnica em base seca para a umidade em base úmida, de acordo com Equação 9, resultou no valor de 13,04%. Essa umidade foi definida como desejável/alvo nos testes de filtração.

#### 4.4 Teste de folha

Os resultados dos testes de folha estão organizados em três tópicos. O primeiro referente ao dimensionamento, o segundo apresenta os resultados da seleção de tecido filtrante e o terceiro da avaliação de reagentes auxiliares de filtração.

##### 4.4.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CICLO

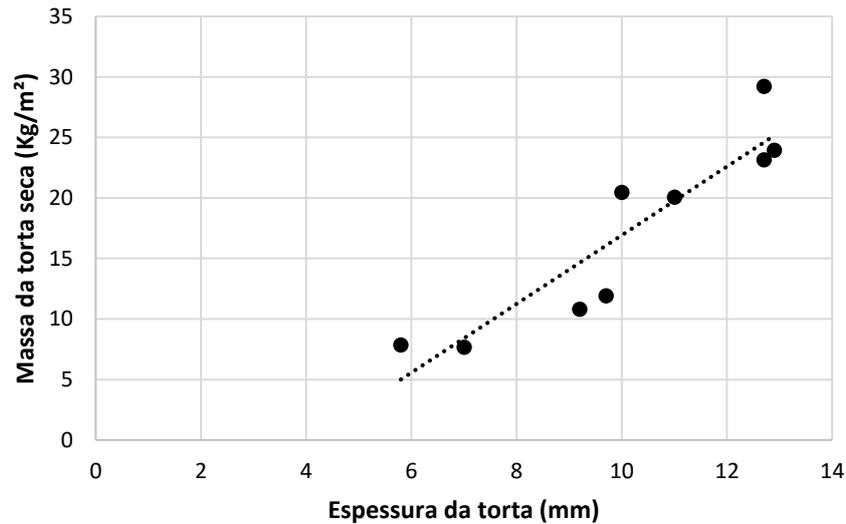
Os resultados da variação dos tempos de formação e secagem da torta estão expressos na Tabela 11 sob os parâmetros de massa da torta seca por unidade de área, espessura e umidade da torta.

Tabela 11 - Variação do tempo de formação e secagem da torta.

<b>Formação (s)</b>	<b>Secagem (s)</b>	<b>Massa de torta seca por área (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Umidade (%)</b>
15	54	23,95	12,9	10,68
13	46	29,23	12,7	11,20
12	43	23,15	12,7	10,92
11	39	20,08	11,0	10,84
10	36	20,46	10,0	11,07
8	29	11,94	9,7	11,15
7	25	10,83	9,2	10,73
6	21	7,68	7,0	11,91
5	18	7,86	5,8	11,51

Observa-se que os tempos de formação acima de 10 segundos possibilitaram formar a torta em espessura satisfatória, entre 10 mm e 13 mm, como recomendam Purchas e Wakeman (1986) citados por Concha (2014). A correlação entre a massa de torta seca formada por unidade de área em função da espessura da torta é apresentada na Figura 29.

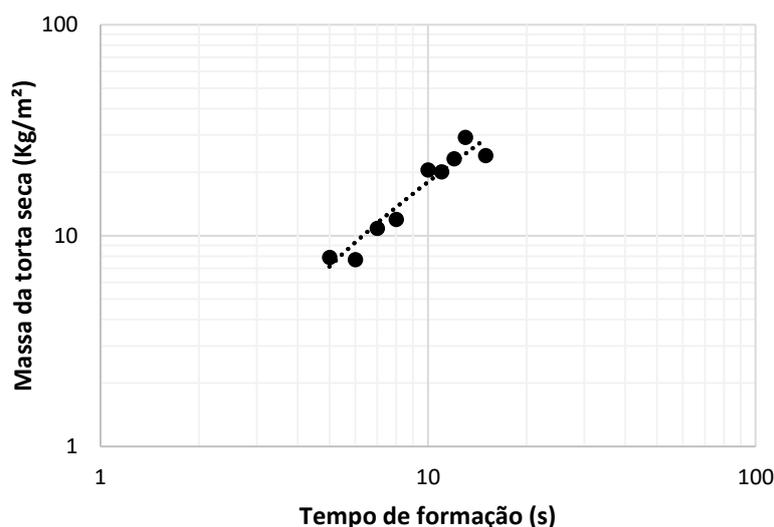
Figura 29 - Massa de torta seca formada por unidade de área em função da espessura da torta.



Nota-se que quanto maior a espessura da torta, maior a massa seca da torta por unidade de área. Ao projetar o maior valor desejado de espessura da torta (13 mm) na reta verifica-se que o valor correspondente da massa da torta seca é de aproximadamente 26 kg/m<sup>2</sup>.

A correlação entre a massa de torta seca formada por unidade de área em função do tempo de formação da torta é mostrada na Figura 30. Ao projetar a massa da torta seca de 26 kg/m<sup>2</sup> obtida anteriormente tem-se que o tempo de formação equivalente é de aproximadamente 13 segundos.

Figura 30 - Massa da torta seca formada por unidade de área em função do tempo de formação da torta.



Após a definição do tempo de formação da torta, procedeu-se com a variação do tempo de secagem em 10, 20, 30, 40 e 50 segundos, conforme mostra a Tabela 12 com as respectivas umidades da torta produzidas.

Tabela 12 - Variação do tempo de secagem.

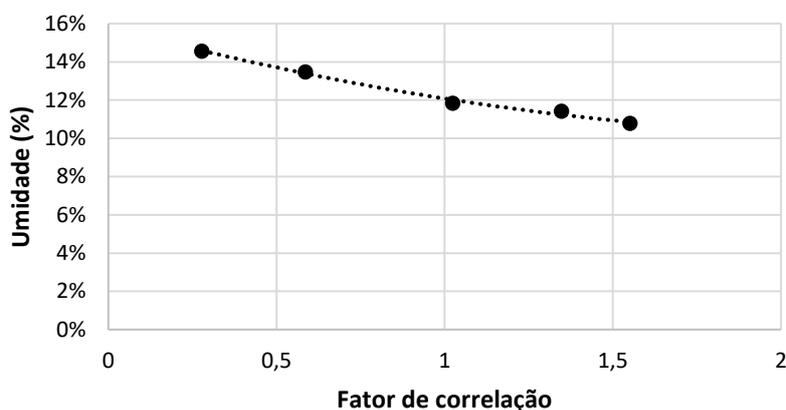
<b>Formação (s)</b>	<b>Secagem (s)</b>	<b>Umidade (%)</b>
13	10	14,56%
13	20	13,48%
13	30	11,84%
13	40	11,41%
13	50	10,78%

Observa-se que quanto maior o tempo de secagem menor a umidade da torta. Os tempos de 30 e 40 segundos promoveram a secagem da torta dentro do recomendável por Davies (2011) para regiões de climas úmidos, que corresponde a uma variação entre 1 e 2% abaixo do teor de umidade ótimo de

13,04% desse rejeito obtido em ensaio de compactação conforme descrição no item 3.4.

Uma comparação entre os tempos de secagem de 30 e 40 segundos, mostra que o tempo de 40 segundos promoveu a secagem mais eficiente da torta obtendo-se 11,41% de umidade. O aumento do tempo de secagem para um mesmo tempo de formação favoreceu a redução de umidade da torta, no entanto, essa tendência não é linear, conforme indica o gráfico da Figura 31 que expressa a umidade da torta em função de um fator de correlação (tempo de secagem dividido pela massa da torta seca por unidade de área).

Figura 31 - Umidade da torta em função do tempo de secagem dividido pela massa da torta seca por unidade de área



Para confirmar o tempo de secagem, projetou-se a umidade mais baixa dentre o intervalo desejável (entre 11 e 13%) encontrando-se o fator de correlação de 1,5. Multiplicando-se o fator de correlação por 26 kg/m<sup>2</sup> o resultado é um tempo de secagem de aproximadamente 40 segundos.

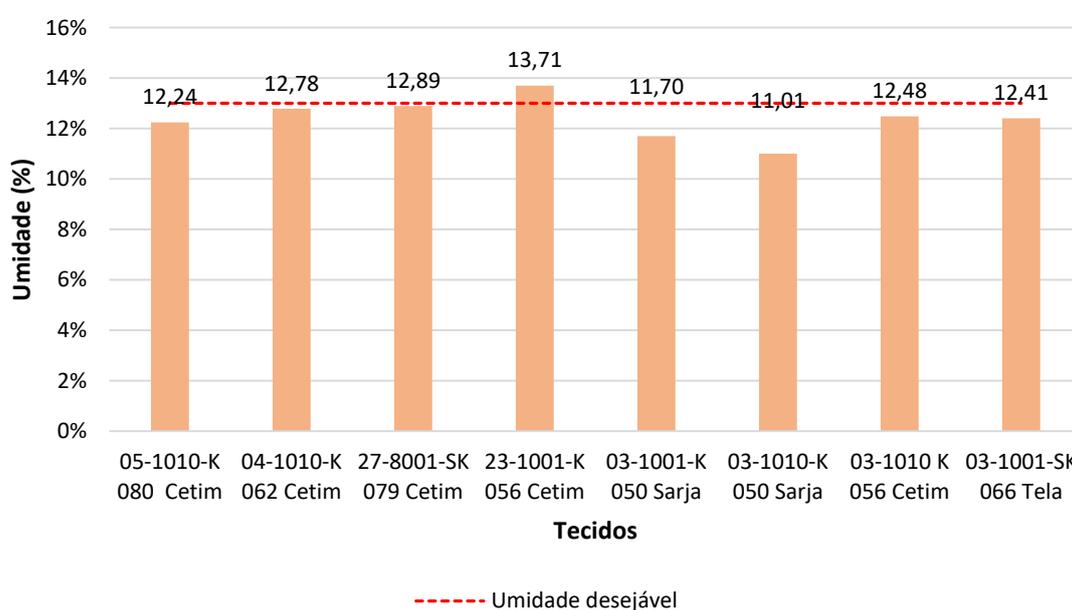
Dessa forma, o tempo de formação da torta foi parametrizado em 13 segundos, e o de secagem em 40 segundos.

O tempo de ciclo definido a partir do teste de folha em respeito a proporção dos tempos recomendados por Chaves (2013) para o filtro de disco a vácuo (33% do ciclo total para a formação, 48% para a secagem, 10% para o sopro e 9% para o morto), foi de 83,33 segundos. Esse valor foi utilizado para os cálculos de produtividade do filtro.

#### 4.4.2 AVALIAÇÃO DE TECIDOS FILTRANTES

As variáveis respostas analisadas nos testes de folha para a avaliação de tecidos filtrantes foram a umidade da torta, o percentual de sólidos no filtrado e a taxa unitária de filtragem. Para os cálculos da TUF, usou-se 80% da razão de filtragem obtido no teste em laboratório, conforme recomenda Chaves (2013), haja vista que as condições no laboratório são bem controladas. A Figura 32 mostra o desempenho dos tecidos em relação à umidade da torta.

Figura 32 - Umidade da torta para diferentes tipos de tecidos.



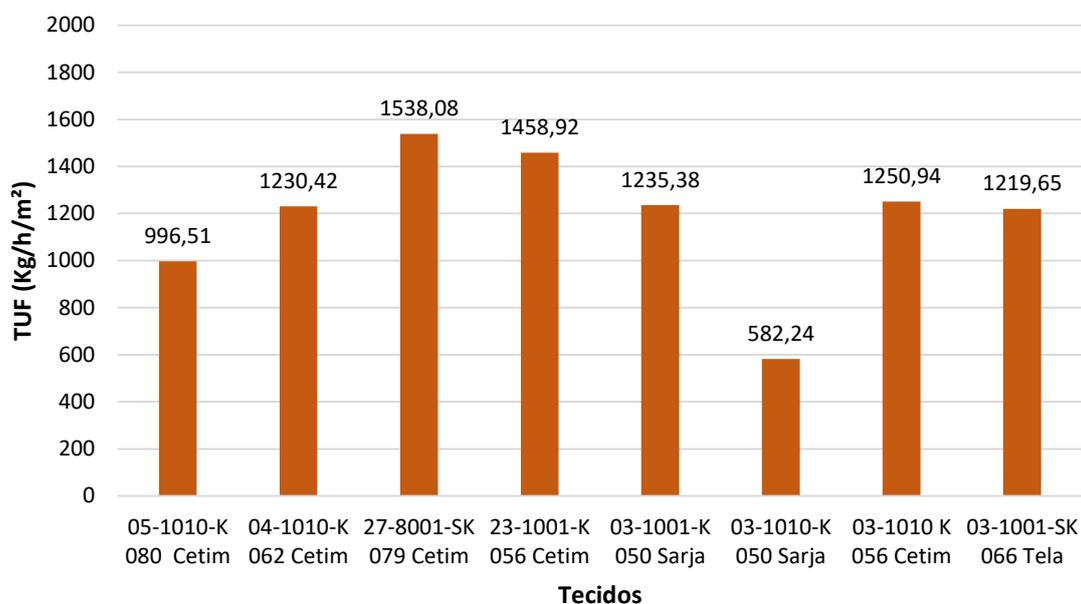
No geral, observou-se pouca variação dos tecidos testados na umidade da torta. Com exceção do tecido 23-1001-K 056, cuja umidade da torta foi 13,71%, todos os demais permitiram produzir torta dentro da faixa desejada (entre 11 a 13% de umidade).

Conforme exposto, a menor umidade da torta foi 11,01%, obtida com a utilização do tecido 03-1010-K 050, de sarja, permeabilidade de 0,03 m<sup>3</sup>/s. E a maior umidade da torta de 13,71% pelo emprego do tecido 23-1001-K 056, de cetim, permeabilidade de 0,06 m<sup>3</sup>/s. Notou-se que os tecidos de menores permeabilidades favoreceram a obtenção de tortas de umidades mais baixas. Esperava-se que as menores umidades fossem obtidas com a utilização de tecidos de trama cetim, conforme indicado por Wakeman e Tarleton (2007a), porém, a sarja apresentou desempenho mais adequado a essa aplicação.

Guimarães (2011) estudou rejeitos da flotação de minério de ferro de várias usinas do Quadrilátero Ferrífero com  $d_{50}$  de 70 a 90  $\mu\text{m}$ , e obteve resultados semelhantes na umidade da torta pela filtragem em filtro de disco convencional com valores entre 10 a 13%.

A Figura 33 mostra o desempenho quanto à TUF para o rejeito objeto desse estudo. Pode-se observar que os tecidos que apresentaram melhor desempenho foram 27-8001-SK 079 com 1538,08  $\text{kg/h/m}^2$ , 23-1001-K 056 com 1458,92  $\text{kg/h/m}^2$ , 03-1010-K 056 com 1250,94  $\text{kg/h/m}^2$  e 03-1001-K 050 com 1235,38  $\text{kg/h/m}^2$ , 04-1010-K 062 com 1230,42 e 03-1001-SK 066 com 1219,65  $\text{kg/h/m}^2$ .

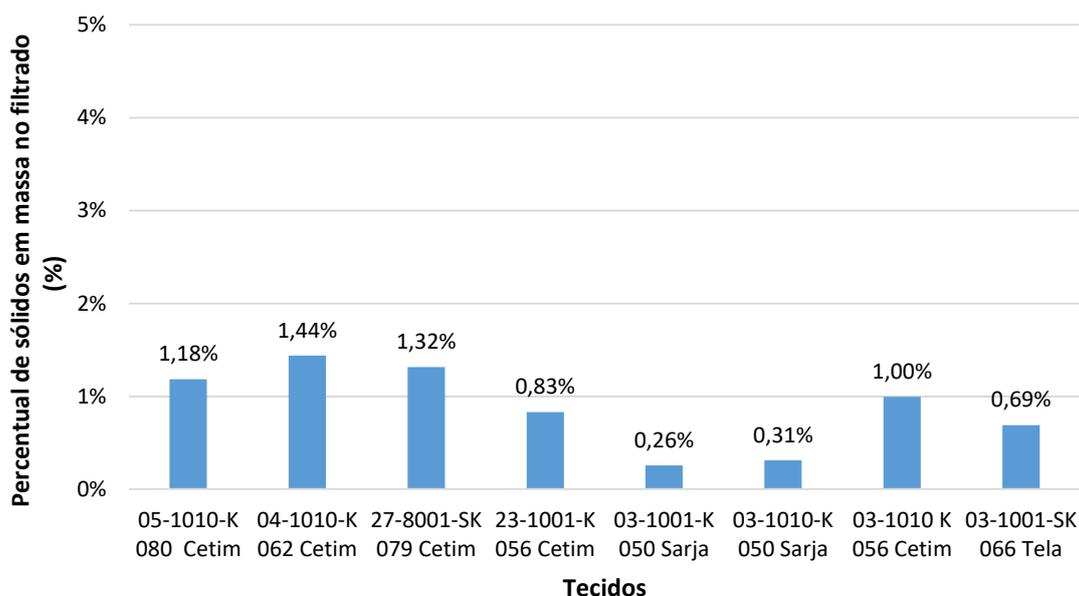
Figura 33 - Resultados da TUF para diferentes tipos de tecidos.



No trabalho de Guimarães (2011), que estudou os rejeitos da flotação de minério de ferro, a TUF para filtro de disco convencional oscilou em torno de 1300  $\text{kg/h/m}^2$ . Esse valor foi adotado como referência nesse trabalho. O tecido 03-1010-K056, de cetim, foi o que apresentou valor muito baixo de TUF.

A Figura 34 mostra o desempenho quanto ao percentual de sólidos do filtrado. Notou-se que os tecidos de trama cetim, que possuem as maiores permeabilidades, conforme descrito na Tabela 8, foram os que apresentaram as maiores quantidades de sólidos no filtrado.

Figura 34 - Resultados do percentual de sólidos para diferentes tipos de tecidos.



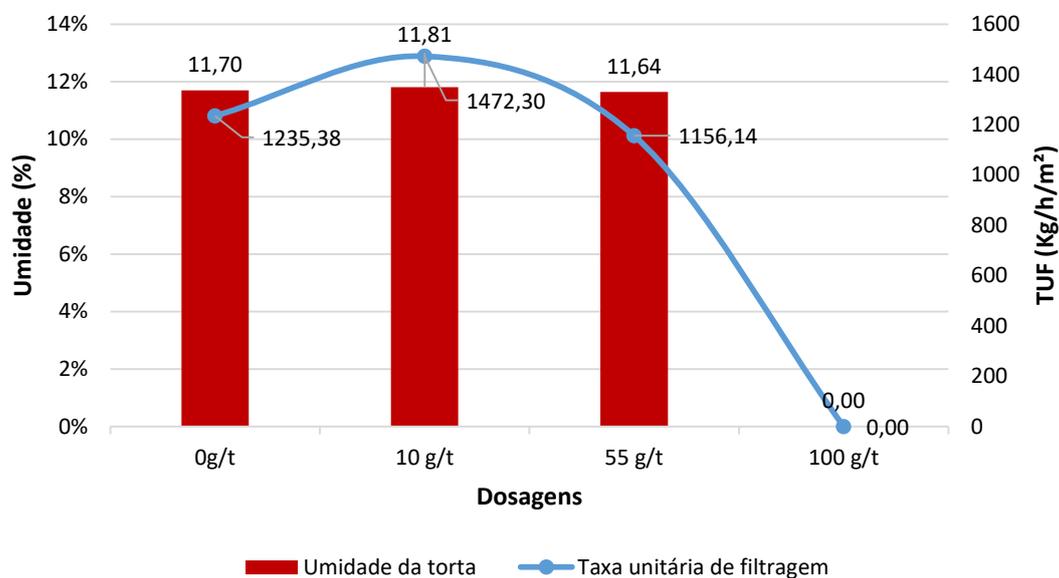
Conforme recomendação de fornecedores de filtros o percentual de sólidos em massa no filtrado deve ser inferior a 0,4% para evitar problemas no bombeamento da água recirculada para a usina. Dentre os tecidos avaliados com elevada produtividade e com umidade na faixa desejada, o tecido 03-1001-K 050 foi o que possibilitou o menor percentual de sólidos no filtrado com valor de 0,26%. Diante disso, foi selecionado como o tecido mais adequado a essa aplicação.

#### 4.4.3 AVALIAÇÃO DE REAGENTES AUXILIARES DE FILTRAGEM

A segunda etapa dos testes de filtragem consistiu em analisar o efeito de da adição de reagentes coagulantes na polpa do rejeito preparada a 65% de sólidos. Para os diferentes tipos de reagentes foram avaliadas as dosagens de 10, 55 e 100 g/t. Utilizou-se o tecido filtrante 03-1001-K 050 selecionado como o mais adequado a essa aplicação conforme item 4.4.2.

A Figura 35 apresenta os resultados da adição do reagente R-1607 a 0,25%.

Figura 35 - Resultados da adição do R-1607 na TUF e umidade da torta.



Pode-se observar que dosando o sistema a 10 g/t houve um aumento da TUF de 1235,38 kg/h/m<sup>2</sup> para 1472,30 kg/h/m<sup>2</sup> (+19,18%) e a umidade da torta aumentou de 11,70% para 11,81%. Na dosagem de 55 g/t, a TUF foi menor que na condição sem reagente, com valor de 1156,14 kg/h/m<sup>2</sup> (-6,41%) e a umidade da torta diminuiu para 11,64%. Na dosagem de 100 g/t não foi formada a torta. A Figura 36 mostra as tortas produzidas.

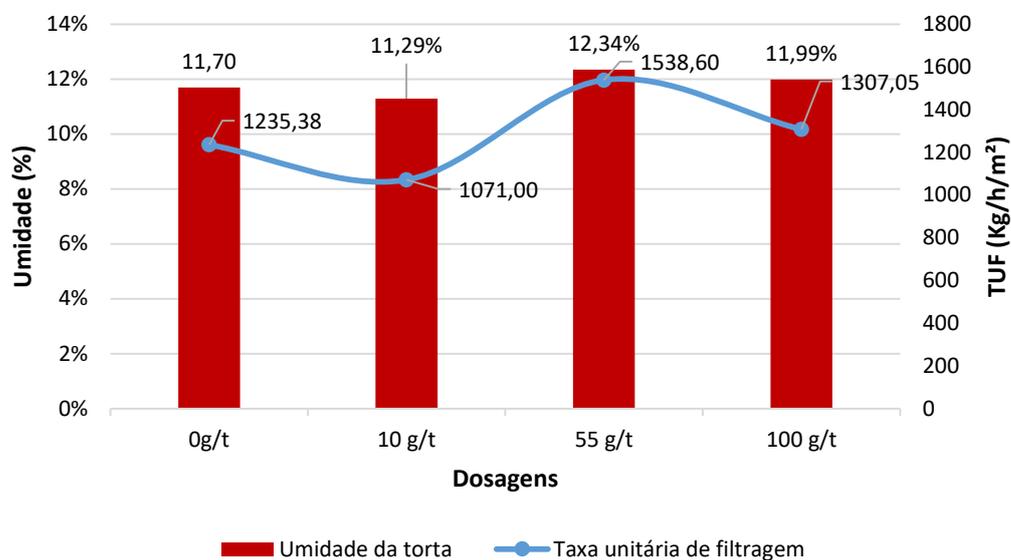
Figura 36 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de R-1607 a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e (C) 100 g/t.



Com exceção da condição que não formou torta, nas demais as tortas apresentaram aspecto uniforme sem a presença de rachaduras.

A Figura 37 apresenta os resultados da adição do reagente R-1687 a 0,25%.

Figura 37 - Resultados da adição do R-1687 na TUF e umidade da torta.



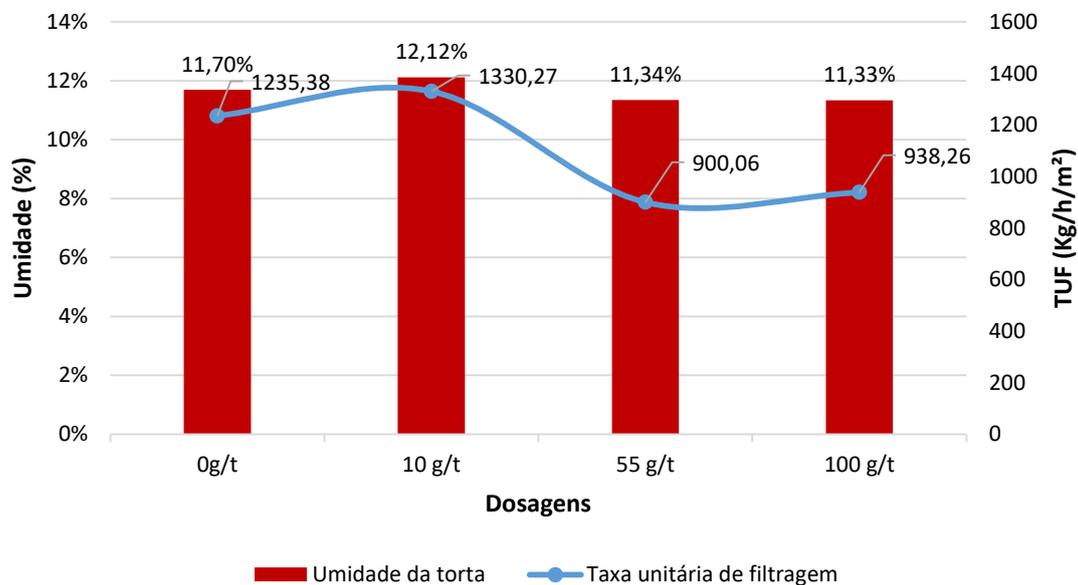
Pode-se observar que dosando o sistema a 10 g/t houve uma diminuição da TUF de 1235,38 kg/h/m² para 1071,00 kg/h/m² em relação a condição sem reagente (-13,31%). Apesar disso, a umidade da torta diminuiu de 11,70% para 11,29%. Na dosagem de 55 g/t, a TUF foi de 1538,60 kg/h/m² (+24,54%) e umidade de 12,34%. Na dosagem de 100 g/t, a taxa de unitária foi de 1307,05 kg/h/m² (+5,81%), com umidade da torta de 11,99%. A Figura 38 mostra as tortas produzidas com aspecto uniforme sem a presença de rachaduras.

Figura 38 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de R-1687 a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e 100 g/t (C).



A Figura 39 apresenta os resultados da adição do reagente sulfato de alumínio a 0,25%.

Figura 39 - Resultados da adição do sulfato de alumínio na TUF e umidade da torta.



Pode-se observar que dosando o sistema a 10 g/t desse reagente houve um aumento da TUF de 1235,38 kg/h/m<sup>2</sup> para 1330,27 kg/h/m<sup>2</sup> (+7,68%). Apesar disso, a umidade da torta aumentou de 11,70% para 12,12%. Nas dosagens de 55 e 100 g/t, as taxas unitárias de filtração foram menores que na condição sem reagente, com valores respectivamente de 900,06 kg/h/m<sup>2</sup> (-27,14%) e 938,26 kg/h/m<sup>2</sup> (-24,05%), com umidade da torta de 11,34% e 11,33%, respectivamente. A Figura 40 mostra as tortas produzidas com aspecto uniforme sem a presença de rachaduras.

Figura 40 - Tortas produzidas ao dosar o sistema com solução de sulfato de alumínio a 10 g/t (A), 55 g/t (B) e 100 g/t (C).



A Tabela 13 apresenta os resultados da clarificação no filtrado usando os reagentes R-1607, R-1687 e sulfato de alumínio.

Tabela 13 - Percentual de sólidos no filtrado pela aplicação dos reagentes

<b>Dosagem</b>	<b>0 g/t</b>	<b>10 g/t</b>	<b>55 g/t</b>	<b>100 g/t</b>
R-1607	0,26 %	0,22%	0,26%	-
R-1687	0,26 %	0,12%	0,16%	0,23%
Sulfato de alumínio	0,26 %	0,26%	0,27%	0,26%

A aplicação dos reagentes, em geral, exerceu pouca variação na clarificação do filtrado em relação à condição sem reagente. A exceção foi o reagente R-1687 que reduziu o percentual de sólidos no filtrado de 0,26% para 0,12% na dosagem de 10 g/t e para 0,16% na dosagem de 55 g/t. Pode-se dizer que todos os resultados são satisfatórios haja vista que todos os percentuais de sólidos no filtrado foram inferiores a 0,4%, conforme recomendação de fornecedores de filtros.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados e discutidos, o objetivo de investigar o comportamento do rejeito de flotação em etapa de filtragem a vácuo tendo em vista a disposição em pilhas foi alcançado. O estudo permitiu, principalmente, a ampliação do conhecimento acerca desse assunto que está cada vez mais em evidência.

Na caracterização do rejeito, a análise de distribuição granulométrica em granulômetro a *laser* indicou  $d_{80}$  de 93,35  $\mu\text{m}$  e  $d_{50}$  de 59,85  $\mu\text{m}$ . Na picnometria, foi obtida a densidade dos sólidos de 4,11  $\text{g}/\text{cm}^3$ . No ensaio de compactação foi obtida a umidade ótima de compactação em base úmida de 13,04%.

Na avaliação dos tempos de filtragem, o tempo de 13 segundos foi satisfatório para a formação da torta em espessura desejada, e o tempo de 40 segundos possibilitou a secagem da torta dentro da faixa de umidade de interesse. Esses tempos podem ser utilizados no dimensionamento de operações futuras.

Em relação a viabilidade técnica de filtrar o rejeito objeto desse estudo visando o empilhamento a seco pelo uso da tecnologia a vácuo em filtro de disco, é possível alcançar o teor de umidade ótimo com elevada produtividade e baixo percentual de sólidos no filtrado. No entanto, recomenda-se realizar estudos pilotos para confirmação dos resultados.

A utilização dos tecidos filtrantes avaliados nesse trabalho não provocou grande mudança na umidade da torta uma vez que todos apresentaram desempenho bem semelhantes. Porém, uma maior influência foi observada sobre a clarificação do filtrado e na TUF.

O tecido 03-1001-K050 de poliamida, monofilamentar, com tessitura sarja, possibilitou produzir a torta com 11,70% de umidade, o filtrado mais limpo com 0,26% de sólidos e elevada TUF (taxa unitária de filtragem) de 1235,38  $\text{kg}/\text{h}/\text{m}^2$ . Um filtrado mais limpo é interessante principalmente do ponto de vista que ele pode ser usado como água de recirculação na usina. Em relação à TUF, usou-se como referência o trabalho de Guimarães (2011), em que os rejeitos da flotação de minério de ferro apresentaram TUF em torno de 1300  $\text{kg}/\text{h}/\text{m}^2$  para filtro de disco convencional. Diante disso, a TUF de 1235,38  $\text{kg}/\text{h}/\text{m}^2$  foi considerada satisfatória para essa aplicação. As taxas elevadas são

interessantes haja vista que uma expressiva quantidade de massa é destinada ao tratamento de rejeitos.

Quanto à avaliação dos reagentes auxiliares de filtração, observou-se comportamento semelhante nos reagentes R-1607 e sulfato de alumínio. Na utilização de ambos ocorreu aumento na TUF na dosagem de 10 g/t e as tortas se tornaram ligeiramente mais úmidas e nas dosagens acima houve queda na produtividade com tendência de diminuição da umidade da torta. O reagente R-1687 apresentou comportamento diferente, provocou diminuição na TUF e umidade da torta na dosagem de 10 g/t e nas dosagens acima a produtividade e umidade da torta aumentaram.

## 6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a capacidade de filtração considerando os grandes volumes de rejeitos a serem processados.
- Analisar o efeito sobre a filtração de eventuais mudanças na granulometria do rejeito objeto desse estudo em decorrência da necessidade de uma maior fragmentação do minério em etapa de moagem para atender a operação de concentração, e inclusive na umidade ótima de compactação.
- Analisar o efeito da variação do pH e diferentes tipos de reagentes, tais como floculantes, coagulantes e auxiliares de filtração, bem como ampliar a faixa de dosagem investigada.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado**: a expansão de uma alternativa para substituição às barragens. 2020. 114f. Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11939>. Acesso em 20 maio 2021.
- AMARANTE, S. C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório**: Testes de Folha e de Funil de Buchner. 2002. 125f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/GESV-5K5QNP>. Acesso em: 22 maio 2021.
- ARAÚJO JUNIOR, A. M. **Influência das variáveis de processo na filtragem cerâmica de polpas de minério de ferro**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/dissertacoes/2014-2>. Acesso em: 10 junho 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. 2016.
- BOSKOVIC, L.; ALTMAN, I. S.; AGRANOVSKI, I. E.; BRADDOCK, R. D.; MYOJO, T.; CHOI, M. Influence of particle shape on filtration processes. **Aerosol Science and Technology**. 2005, v.39, n.12, p.1184-1190. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02786820500442410>. Acesso em: 20 maio 2021.
- CARDOSO, M. de P. **Protótipo de um filtro portátil para realização do leaf-test por alimentação inferior**. 2018. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018. Disponível em: < <http://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/12/Mateus-de-Paiva-Cardoso-min.pdf> >. Acesso em: 29 de abril de 2021.
- CHAVES, A. P. **Desaguamento, espessamento e filtragem**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 240 p. (Coleção teoria e prática do tratamento de minérios, 2).
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 3.ed. São Paulo: Signus, 2010. 229 p.
- CONCHA, F. A. **Solid-liquid separation in the mining industry**. 1.ed. Switzerland: Springer, 2014. 429 p.

CRYSTAL, C.; HORE, C.; EZAMA, I. Filter-Pressed Dry Stacking: Design Considerations Based on Practical Experience. **Geotechnical Engineering**, p. 209-219, 2018.

DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. *In: Proceedings Tailings and Mine Waste*, 2011, Vancouver. **Anais [...]**. Vancouver, 2011. 9 p.

DIAS, C. de L. P.; SILVA, L. M. da; PERES, A. E. C.; VALADÃO, G. E. S. Utilização de reagentes auxiliares na filtragem. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 57, n. 4, p.229-234, out/dez, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672004000400003>. Acesso em: 21 set. 2021.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico**. 2000. 363f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FIGUEIREDO, M. M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. 2007. 100f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GOMES, M. V. N.; VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C de; SILVA, R. V.G. da; Teste folha: uma reavaliação. *In: XVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa; Seminário de Química de Colóides Aplicada à Tecnologia Mineral*, 1998, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 1998. p. 221-235.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MTF32>. Acesso em: 30 abr. 2021.

HAHN, J. Tailings dewatering with increased filtration rates and lowest filter cake moisture for filtered tailings stacking. *In Paste 2019: Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, 2019, Cape Town. **Anais [...]**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2019. p. 245-257. Disponível em: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1910\\_16\\_Hahn](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1910_16_Hahn).

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. 2.ed. Rio de Janeiro, 2002, E-Papers Serviços Editoriais.

MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project. **MEND Report 2.50.1 Study of Tailings Management Technologies**. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.

NEVES, M. C. do A. **Caraterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado**. 2017. 155f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio Janeiro, 2017.

OLIVEIRA, M. L. M de; LUZ, J. A. M. da; LACERDA; C. M. M. **Apostila espessamento e filtragem**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

REINERT, J.; SILVA, M. J. da; DINIZ, F. C. P. **Notas de aula do curso de engenharia civil: práticas de laboratório - Mecânica de solos I**. Curvelo: CEFET-MG, 2015.

RODRIGUES, K. F.; RODRIGUES, O. M. S.; RODRIGUES, R. de S. Influência das características do pellet feed de minério de ferro na etapa de filtragem. **Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração**, São Paulo, v.16, n. 2, p. 239-245, abr./jun. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191725>. Acesso em: 21 set. 2021.

SEMINÁRIO Internacional em MG debate gestão de barragens. **Revista Mineração**, [s./], 2018. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2018/01/23/seminario-internacional-em-mg-debate-gestao-de-barragens/>. Acesso em: 28 dez. 2021.

SILVA, L. M.; VALADÃO, G. E; AMARANTE, S. C. Teste folha com agitação mecânica de polpa e determinação da massa de filtrado por computador. *In*: XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2002. Pernambuco. **Anais [...]**. Pernambuco, 2002. p. 479-485.

SOARES, L. Barragem de rejeitos. *In*: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA; S. C. A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 831-890.

TESSAROTO, C. Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (Dry Stacking). *In*: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015, Poços de Caldas-MG. **Anais [...]**. Poços de Caldas, 2015, 8 p.

ULRICH, B.; COFFIN, J. Considerations for tailings facility desing and operation using filtered tailings. *In* Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2013, Belo Horizonte. **Anais [..]**. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. p. 201-210. Disponível em: [https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1363\\_15\\_Ulrich](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1363_15_Ulrich).

VALADÃO, G. E. S. Desenvolvimento de modelo matemático empírico para a simulação da filtragem de “pellet feed” de minério de ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1996 apud AMARANTE, S. C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Buchner**. 2002. 125f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/liquid separation**: equipment selection and process design. 448 p. 1ed. Oxford: Elsevier, 2007.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/liquid separation**: principles of industrial filtration. 1.ed. Oxford: Elsevier, 2005a. 339 p.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/liquid separation**: scale-up of industrial equipment. 1.ed. Oxford: Elsevier, 2005b. 454 p.

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