



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



**BRUNO AUGUSTO VILAÇA DA SILVEIRA**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS FILTROS PRENSA DE UMA  
EMPRESA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO  
FERRÍFERO**

**OURO PRETO**

**ABRIL/2021**

BRUNO AUGUSTO VILAÇA DA SILVEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS FILTROS PRENSA DE UMA  
EMPRESA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO  
FERRÍFERO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Área de estudo: Filtragem de Rejeitos.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.

OURO PRETO

ABRIL/2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S587a Silveira, Bruno Augusto Vilaca da.  
Análise do desempenho dos filtros prensa de uma empresa de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. [manuscrito] / Bruno Augusto Vilaca da Silveira. - 2021.  
66 f.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minérios de Ferro. 2. Rejeitos (Mineração). 3. Beneficiamento de minério - Filtragem. I. Alves, Vladimir Kronemberger. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.794.2

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



### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos vinte e um dias do mês de abril de 2021, às 13h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Bruno Augusto Vilaça da Silveira**, matrícula 14.2.9402, intitulado: **ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS FILTROS PRENSA DE UMA EMPRESA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves, Eng.º Mecânico Tonimar Mendes de Oliveira e Eng.º de Minas Jacinto Tchipa Daniel Cumena. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Eng.º Mecânico Tonimar Mendes de Oliveira, segundo, o Eng.º de Minas Jacinto Tchipa Daniel Cumena e em último, o Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 9 (nove), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 21 de abril de 2021.

Presidente: Prof. Dr. Vladimir Kronemberger Alves

Membro: Eng.º Mecânico Tonimar Mendes de Oliveira

Membro: Eng.º de Minas Jacinto Tchipa Daniel Cumena

Discente: Bruno Augusto Vilaça da Silveira

Dedico esse trabalho aos meus pais, que nunca mediram esforços para me ajudar a ir em busca dos meus sonhos.

## RESUMO

A mineração, de forma geral, contribui significativamente para a geração de uma quantidade alta de resíduos, seja proveniente do beneficiamento do minério, o rejeito, ou de material sem valor econômico retirado da lavra, o estéril. E ambos devem ser dispostos de maneira segura e ambientalmente adequada. A filtração do rejeito, para uma posterior deposição, é uma alternativa considerada nas novas usinas de beneficiamento mineral. A empresa extrai minério de ferro, e se localiza no quadrilátero ferrífero. Este estudo busca explicar os métodos de separação sólido líquido, aprofundando mais especialmente sobre os filtros prensa. E tem como objetivo principal comparar o desempenho operacional atual dos filtros prensa com o desempenho nominal planejado pela empresa fabricante desse tipo de equipamento. Buscou-se apresentar possíveis melhorias com o objetivo de ganho de rendimento e, dessa forma, conseguir filtrar mais rejeito por hora.

Palavras Chave: Minério de Ferro, Rejeito, Filtração, filtro prensa.

## **ABSTRACT**

Mining, in general, contributes significantly to the generation of a high amount of waste, whether it comes from the processing of the ore, the tailings, or of material with no economic value taken from the mine, the sterile. And both must be disposed of in a safe and environmentally adequate way. The filtering of the tailings, for later deposition, is an alternative considered in the new mineral processing plants. The company extracts iron ore and is in the iron quadrilateral. This study seeks to explain the solid liquid separation methods, going deeper into the filter presses. And its main objective is to compare the current operational performance of the filter presses with the nominal performance planned by the company that manufactures this type of equipment. We sought to present possible improvements with the objective of gaining income and, in this way, being able to filter more tailings per hour.

Key-words: Iron Ore, Tailings, Filtration, Filter Press.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Participação das principais substâncias metálicas no valor de produção mineral comercializada – 2019.....	15
<b>Figura 2</b> – Principais minerais de ferro .....	16
<b>Figura 3</b> – Formação Ferrífera Bandada (BIF). .....	16
<b>Figura 4</b> – Estrutura da hematita: Octaédrica. ....	17
<b>Figura 5</b> – Estrutura Cristalina da magnetita .....	18
<b>Figura 6</b> – Estrutura cristalina da Goethita .....	19
<b>Figura 7</b> – Filtração com formação de torta. ....	20
<b>Figura 8</b> – Esquema visual do Filtro a Disco .....	23
<b>Figura 9</b> – Armação das Paletas do Filtro a Disco.....	24
<b>Figura 10</b> – Esquema de operação do Filtro a Disco.....	24
<b>Figura 11</b> – Esquema de operação do filtro de plano. ....	25
<b>Figura 12</b> – Filtro de mesa em operação. ....	26
<b>Figura 13</b> – Modelo real de filtro de tambor. ....	26
<b>Figura 14</b> – Filtro de Tambor. ....	27
<b>Figura 15</b> – Esquema de operação do Filtro de tambor. ....	27
<b>Figura 16</b> – Modelo de filtro de correia. ....	28
<b>Figura 17</b> – Esquema operacional do filtro de correia. ....	29
<b>Figura 18</b> – Filtro Prensa Horizontal <i>Andritz</i> . ....	31
<b>Figura 19</b> – Placa com o meio filtrante do filtro prensa.....	31
<b>Figura 20</b> – Tessituras básicas.....	33
<b>Figura 21</b> – Representação do <i>Leaf Test</i> . ....	34
<b>Figura 22</b> – Modelo de gráfico conforme Dahlstrom e Sliverblatt. ....	35
<b>Figura 23</b> – Etapas do teste de proveta.....	36
<b>Figura 24</b> – % de sólidos VS Tensão de escoamento. ....	37
<b>Figura 25</b> – Vista frontal do espessador convencional. ....	38
<b>Figura 26</b> – Vista superior do espessador convencional. ....	38
<b>Figura 27</b> – Modelo de espessador de concreto armado. ....	39
<b>Figura 28</b> – Espessador de Lamelas .....	40
<b>Figura 29</b> – Barragem de rejeito a montante. ....	41
<b>Figura 30</b> – Barragem de rejeito a jusante .....	42

<b>Figura 31</b> – Barragem de rejeito em linha de centro.....	43
<b>Figura 32</b> – Rejeito filtrado.....	44
<b>Figura 33</b> – Localização aproximada da mineradora.....	45
<b>Figura 34</b> – Fluxograma de processos .....	47
<b>Figura 35</b> – Modelo de filtro prensa piloto. ....	48
<b>Figura 36</b> – Polpa, filtrados e torta.....	49
<b>Figura 37</b> – Intervalo de tempo dos ciclos e tempo de alimentação .....	50
<b>Figura 38</b> – Peso de cada ciclo realizado.....	50
<b>Figura 39</b> – Modelo de base de dados da operação dos filtros .....	51
<b>Figura 40</b> – Gráfico mostra a curva de peso do filtro.....	57
<b>Figura 41</b> – Curva de vazão na alimentação do filtro. ....	58
<b>Figura 42</b> – Curva de pressão na alimentação do filtro. ....	59
<b>Gráfico 1</b> – TUF - Filtro 01.....	55
<b>Gráfico 2</b> – TUF - Filtro 02.....	55
<b>Gráfico 3</b> – Tempo de alimentação em relação ao tempo médio de ciclo .....	56
<b>Gráfico 4</b> – Produção média de rejeito por hora.....	56
<b>Gráfico 5</b> – Produção média de rejeito por hora.....	57
<b>Gráfico 6</b> – Umidade do rejeito filtrado .....	59
<b>Gráfico 7</b> – Tempo médio de ciclo do filtro 01 .....	60
<b>Gráfico 8</b> – Tempo médio de ciclo do filtro 02 .....	60

## LISTA DE TABELA

<b>Tabela 1</b> – Propriedades Físicas dos óxidos de ferro .....	19
<b>Tabela 2</b> – Meios filtrantes e suas características .....	32
<b>Tabela 3</b> – Efeito da trama sobre a filtração .....	33
<b>Tabela 4</b> – Efeitos das características dos fios (em ordem decrescente de preferência) .....	33
<b>Tabela 5</b> – Teste de filtração.....	52
<b>Tabela 6</b> – Teste de filtração.....	53
<b>Tabela 7</b> – Teste de filtração.....	53
<b>Tabela 8</b> – Modelo de filtro sugerido pela empresa .....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
NBR	Norma Brasileira
TPH	Toneladas Por hora
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
TUF	Taxa unitária de Filtragem
FP	Filtro Prensa
HR	Hora

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3 METODOLOGIA ADOTADA</b> .....	<b>14</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
4.1 MINÉRIO DE FERRO .....	15
4.1.1 Aspéctos Gerais .....	15
4.2 MINERAIS .....	17
4.2.1 Hematita .....	17
4.2.2 Magnetita .....	18
4.2.3 Goethita .....	18
4.3 FILTRAGEM .....	19
4.3.1 Teoria da filtração com formação de torta .....	20
4.4 TIPOS DE FILTROS .....	21
4.4.1 Filtro de disco .....	22
4.4.2 Filtro plano .....	24
4.4.3 Filtro de tambor .....	26
4.4.4 Filtro de correia .....	28
4.4.5 Filtro prensa horizontal .....	29
4.5 MEIOS FILTRANTES .....	31
4.6 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO .....	34
4.7 ESPESSADOR .....	35
4.7.1 Tipos de espessadores .....	37
4.7.1.1 Espessador contínuo convencional .....	37
4.7.1.2 Espessadro de alta capacidade (super espessadores) .....	38
4.7.1.3 Espessador de Lamelas .....	39
4.8 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO .....	40
4.8.1 Método Convencional .....	41
4.8.2 Método Alçamento a Montante .....	41
4.8.3 Método Alçamento a Jusante .....	42
4.8.4 Método de Linha de Centro .....	42

4.8.5 Métodos Alternativos .....	43
4.8.6 Empilhamento de Rejeito .....	43
<b>5 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>45</b>
5.1 LOCALIZAÇÃO .....	45
5.2 FLUXOGRAMA DO PROCESSO.....	46
5.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
5.3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS TEÓRICOS .....	48
5.3.1.1 Características – Filtro Prensa Piloto .....	48
5.3.1.2 Caracterização das amostras de Lama .....	49
5.3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS OPERACIONAIS.....	49
5.3.2.1 Ciclos de Filtragem.....	49
5.4 PARÂMETROS ANALISADOS .....	51
<b>6 RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
6.1 TESTE DE FILTRO PRENSA PILOTO .....	52
6.2 FILTRO DIMENSIONADO.....	53
6.3 DESEMPENHOS ATUAIS DOS FILTROS.....	54
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração possibilita o fornecimento de produtos essenciais, de utilidade cotidiana do homem. Como consequência, é indispensável o contínuo aperfeiçoamento de novas práticas que utilizam o processamento mineral dentro das indústrias mineradoras, de forma a aumentar o desempenho das atividades.

Segundo Luz et al (2010), o minério passa por tratamento e beneficiamento por meio de um conjunto de operações que tem como objetivo realizar alterações na granulometria, na concentração relativa de determinado minério, e no formato do mesmo sem que sua identidade química ou física sofra alterações, não sendo descaracterizado.

A Lei Federal brasileira nº 12.305/2010 define como sendo rejeitos os resíduos sólidos, em que após todas as intervenções que possibilitam o tratamento e recuperação, por meio de processos tecnológicos viáveis, não é possível o reaproveitamento, restando apenas o a disposição final dentro dos padrões ambientais adequados.

Contudo, a crescente exploração de jazidas com baixo teor de mineral de interesse tem aumentado ainda mais o volume de rejeitos gerados através do beneficiamento do minério. Após os dois acidentes envolvendo a liquefação de barragens, o de Mariana, em 2015, e o de Brumadinho, em 2019, ficou determinado que esse tipo de disposição de material não aproveitado será extinto nos próximos anos.

O empilhamento de rejeito, devidamente tratado, tem se tornado uma alternativa viável a esse problema. A polpa é filtrada e a torta produzida torna-se apta ao empilhamento. Além disso, a água extraída da polpa poderá ser reaproveitada como água de processo na usina. O que também contribui para a não necessidade de adquirir outorga para direito de uso de recurso hídrico.

Por isso, dentro desse contexto, o estudo de novas tecnologias disponíveis de filtragem, bem como a otimização do desempenho dos equipamentos torna-se de suma importância para minimizar os impactos ambientais e possibilitar uma mineração mais consciente.

## **2 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo geral entender o funcionamento dos filtros mais utilizados na mineração.

E, além disso, tem como objetivo específico comparar o desempenho de filtros prensa com base na capacidade nominal dimensionada pela empresa fabricante e propor possíveis melhorias em seu sistema operacional de forma a ganhar em desempenho e produção.

### **3 METODOLOGIA ADOTADA**

O estudo desenvolvido neste trabalho está baseado em pesquisa bibliográfica, nos documentos de dimensionamento de filtro prensa realizado por uma empresa fabricante e nos dados de desempenhos praticados atualmente pelos filtros adquiridos pela empresa mineradora.

A primeira parte consistiu na busca pelo tema e determinação dos objetivos. Após isso, por meio de pesquisa bibliográfica em livros, trabalhos de conclusão de curso e dissertações de mestrado desenvolveu-se a revisão bibliográfica.

A terceira etapa foi a busca pelos dados do dimensionamento dos filtros pela empresa fabricante. Após a aquisição das descrições resumidas, sem nenhuma memória de cálculo, iniciou-se, na quarta etapa, a análise comparativa do desempenho entre o dimensionado pela fabricante e o obtido pela empresa mineradora.

A quinta etapa é constituída pelas considerações finais que apresenta os principais resultados, as conclusões e as recomendações propostas.

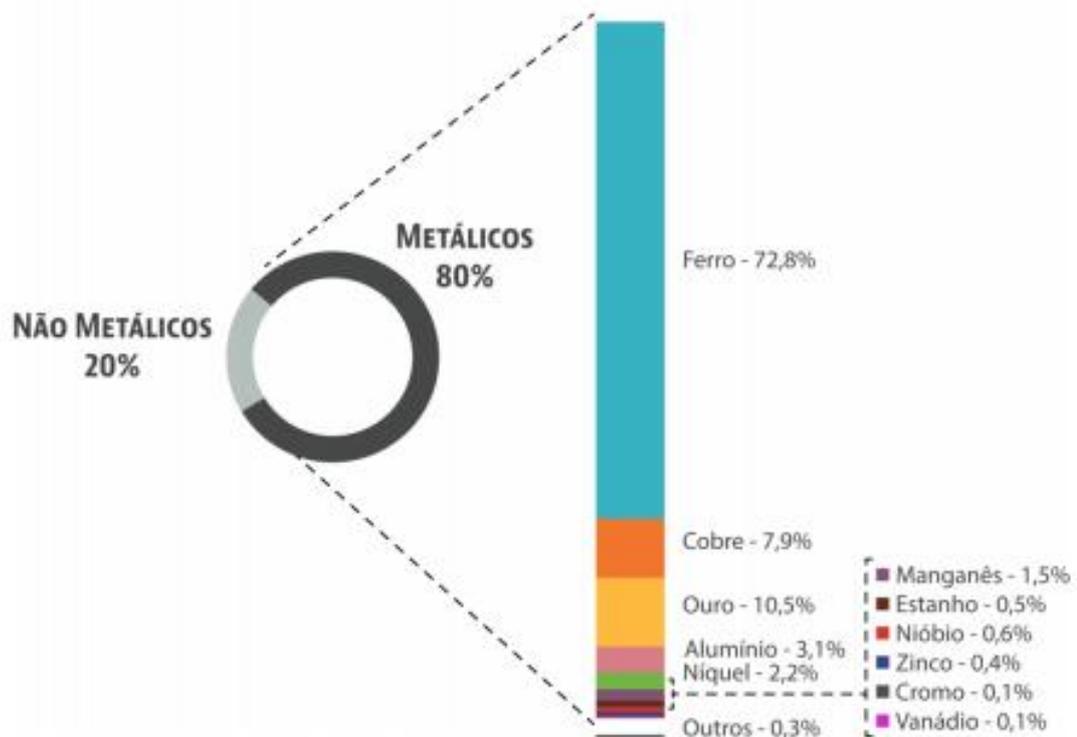
## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 MINÉRIO DE FERRO

#### 4.1.1 Aspectos Gerais

O Minério de ferro possui alta representatividade na economia brasileira. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) as substâncias metálicas, em 2019, representaram cerca de 80% da produção mineral comercializada no Brasil. Dentro desses 80%, o minério de ferro lidera com aproximadamente 73% das vendas, seguido pelo ouro com 10,5% e o cobre com 7,9%, conforme a Figura 1 abaixo (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2019).

Figura 1: Participação das principais substâncias metálicas no valor de produção mineral comercializada – 2019.



Fonte: ANM (2019)

Em valores, esses 80% de minerais metálicos, correspondem a 129 bilhões de reais, tendo sido, cerca de 89%, arrecadados no estado de Minas Gerais e no estado do Pará.

A hematita, a magnetita e a goethita são os principais minerais que contêm ferro, conforme ilustra a Figura 2 abaixo. E os maiores depósitos são as formações ferríferas bandadas (BIF), chamadas de itabiritos, composta de hematita e sílica, ilustradas pela Figura 3. Esse mineral é utilizado nas siderúrgicas para produzir ferro-gusa que posteriormente são transformados em aço.

Figura 2: Principais minerais de ferro.



Fonte: Klein e Dutrow (2012).

Figura 3: Formação Ferrífera Bandada (BIF).



Fonte: Geocolecionismo (2021).

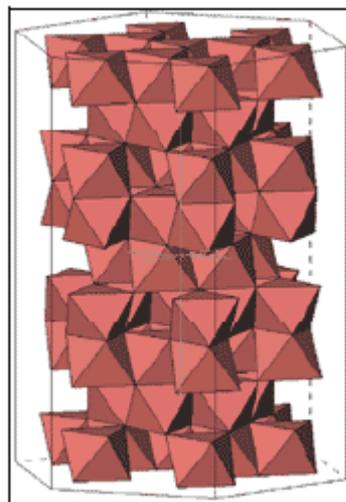
## 4.2 MINERAIS

### 4.2.1 Hematita

A hematita é o principal mineral-minério de ferro obtido em larga escala nas jazidas brasileiras. Ela é um óxido de coloração avermelhada característica, com célula unitária hexagonal. A sua morfologia varia de laminar, ligadas a melhores condições de formação, até as formas isodimensionais (WILLS; MUNN, 2006).

De acordo com Wolf (2009), a estrutura cristalina da hematita é descrita como arranjos do tipo hcp (empacotamento hexagonal compacto) de íons de oxigênio empilhados na direção 001 e seu sistema cristalino é romboédrico, formando uma estrutura octaédrica conforme Figura 4, abaixo. Contém, cerca de 69,9% de ferro, fator que intensifica sua coloração.

Figura 4: Estrutura da hematita: Octaédrica.



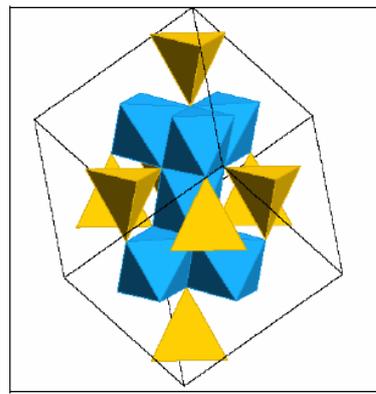
Fonte 1: Wolf (2009).

Esse mineral é encontrado em formações ferríferas bandadas, em associações com a goethita-limonita, em cangas, e também, associada com goethita, calcita e quartzo clástico.

### 4.2.2 Magnetita

Segundo Klein e Dutrow (2012), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) possui coloração escura, voltada para a cor preta, com propriedades ferromagnéticas. Ela tem face centrada e célula unitária cúbica. Por possuir ferro divalente e ferro trivalente em sua estrutura conforme Figura 5, a magnetita se diferencia dos demais compostos minerais.

Figura 5: Estrutura Cristalina da magnetita.



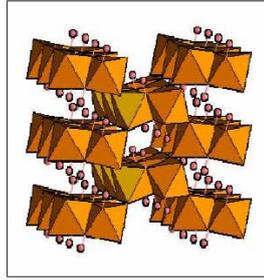
Fonte: Klein e Hurlbut (1999).

Encontra-se distribuída como um mineral acessório comum em rochas magmáticas. Através da segregação magmática em certas rochas, principalmente nas metamórficas cristalinas, ela torna-se um dos principais constituintes e pode formar grandes corpos de minério. Contém, aproximadamente, 72,4% de ferro (KLEIN; HURLBUT,1999).

### 4.2.3 Goethita

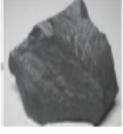
Segundo Cornell e Schwetmann (1996), a goethita é um hidróxido de ferro de coloração amarelada. Ela é isoestrutural com o diásporo e com outros óxidos metálicos, conforme Figura 6. Sua célula unitária é ortorrômbica. É formada sob condições oxidantes através do intemperismo dos minerais de ferro e não apresenta magnetismo. O teor de ferro é aproximadamente 63%, conforme Tabela 1.

Figura 6: Estrutura cristalina da Goethita.



Fonte: Wolf (2009)

Tabela 1: Propriedades Físicas dos óxidos de ferro.

Propriedades físicas e cristalográficas diferenciadoras dos principais óxidos de ferro									
Mineral	Fórmula Química	Brilho	Clivagem	Cor/Traço	Fratura	Dureza	Hábito	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Susceptibilidade magnética (Unidade 10 <sup>-6</sup> SI)
<b>Magnetita</b>									
	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ~72% Fe	Metálico	Ausente	Preto/ Preto	Subconchoidal	6	Cristais octaédricos, Aglomerados maciços	5,18	Ferromagnético (7,00 x 10 <sup>4</sup> - 2,00x10 <sup>5</sup> )
<b>Hematita</b>									
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ~70% Fe	Metálico	Ausente ou com partição micéica primunciada	Cinza grafite ou vermelho ocre/ Vermelho ocre	Subconchoidal	5,5- 6,5	Maciço, placoide ou ferroso	5,26	Paramagnético (0,42 - 3,80) x 10 <sup>4</sup>
<b>Goethita</b>									
	FeO(OH) ~63%	Adamantino Submetálico	Perfeita	Tons de marrom/ Tons de marrom	Ausente	5,0 -5,5	Botrioidal, maciço, fibroso ou acicular	4,27	Paramagnético 1,28 - 1,70

Fonte: Klein &amp; Dutrow (2012).

### 4.3 FILTRAGEM

A filtragem é uma das etapas de operação unitária que tem como objetivo separar as partículas sólidas que estão contidas em um líquido. Isso pode se dar de duas maneiras distintas, na primeira, as partículas se acumulam no exterior do meio filtrante, o que forma um leito de partículas. A segunda maneira é conhecida por colmatação. Nela, a polpa percola uma matriz porosa que retém as partículas. Geralmente, os sólidos retidos são chamados de *Cake* ou *Torta*, e o líquido que resta denomina-se filtrado (CHAVES; PERES, 2006).

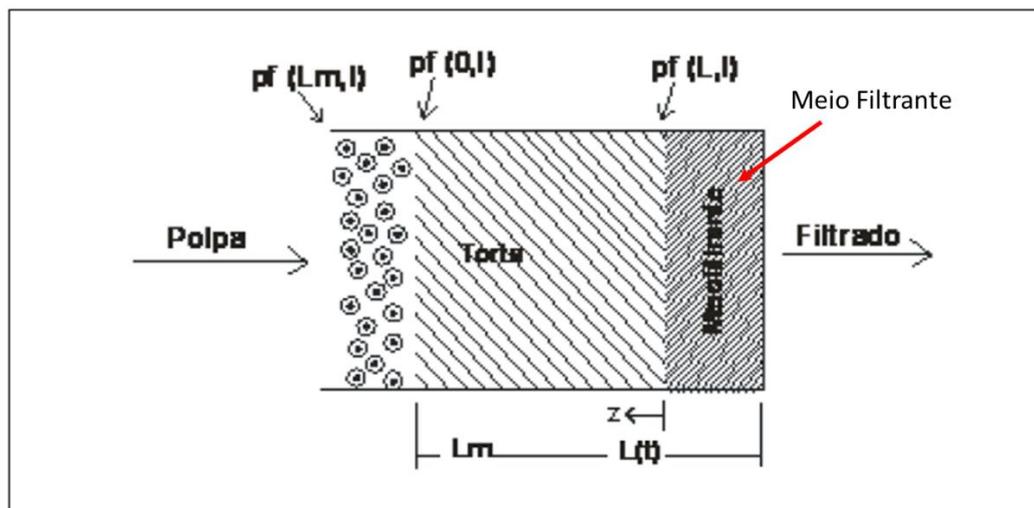
Na indústria mineral, na sua grande maioria, a filtragem é feita por equipamentos que trabalham continuamente, entretanto, os filtros prensa são uma exceção, pois estão sendo utilizados cada vez mais, de forma a aumentar o rendimento, principalmente relacionados ao rejeito de minério de ferro (AMARANTE, 2002).

De acordo com Guimarães (2011), a capacidade de reter sólidos deve ser o principal fator para se selecionar uma máquina de filtrar, além disso, deve ser verificado se o equipamento é mecanicamente forte e resistente à corrosão, para que consiga suportar o trabalho contínuo e pesado que é a filtragem de rejeito de minério, devendo ser resistente à impactos mecânicos.

#### 4.3.1 Teoria da filtração com formação de torta

A teoria da filtração relaciona o equipamento com a área, tempo e pressão de filtração. Porém, essa relação depende das propriedades da torta resultante do mecanismo de filtração, cujos sólidos em suspensão atravessam o meio filtrante através da pressão externa exercida por bombas, resultando no filtrado e na torta, conforme Figura 7.

Figura 7: Filtração com formação de torta.



Fonte: Luz; Sampaio e França (2010).

Através da equação 1 que relaciona vazão e queda de pressão no escoamento de fluido em meio poroso chega-se a uma equação amplamente utilizada em projetos e análises de desempenho de filtros (MASSARANI, 2002):

Equação 1

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_f}{A(\Delta p)} \left[ \frac{\langle \alpha \rangle V \rho_f c}{A} + R_m \right]$$

Onde,

t tempo de filtração;

V volume de filtrado;

A área de filtração;

$\Delta p$  queda de pressão no filtro;

$\rho_f$  densidade de líquidos;

$\langle \alpha \rangle$  resistividade média da torta;

c concentração de sólidos na suspensão que alimenta o filtro;

$R_m$  resistência do meio filtrante;

$$\alpha = \frac{1}{\rho_s \epsilon_s k}$$

Onde,

$\rho_s$  representa a densidade das partículas sólidas;

$\epsilon_s$  fração volumétrica de sólidos;

k a permeabilidade local.

#### 4.4 TIPOS DE FILTROS

Os filtros existentes são os de disco, os de mesa, os de tambor, os de correia e os filtros prensa. Neles deve existir uma diferença de pressão entre as paredes laterais da torta formada pelos sólidos durante o procedimento. O tamanho das partículas está relacionado com a quantidade de poros da torta, e é o que influencia

nessa queda de pressão. Quanto menor as partículas, maior será essa queda (AMARANTE, 2002).

Caso a diferença de pressão requerida seja menor que 1 bar se recomenda filtros a vácuo, e para maiores diferenças indica-se os filtros de pressão. Por isso, ao escolher e realizar o dimensionamento do filtro deve-se estudar, com detalhes, as características da polpa a serem filtradas, como sua porcentagem de sólidos, sua distribuição granulométrica e o produto final que se deseja chegar (CHAVES, 2006).

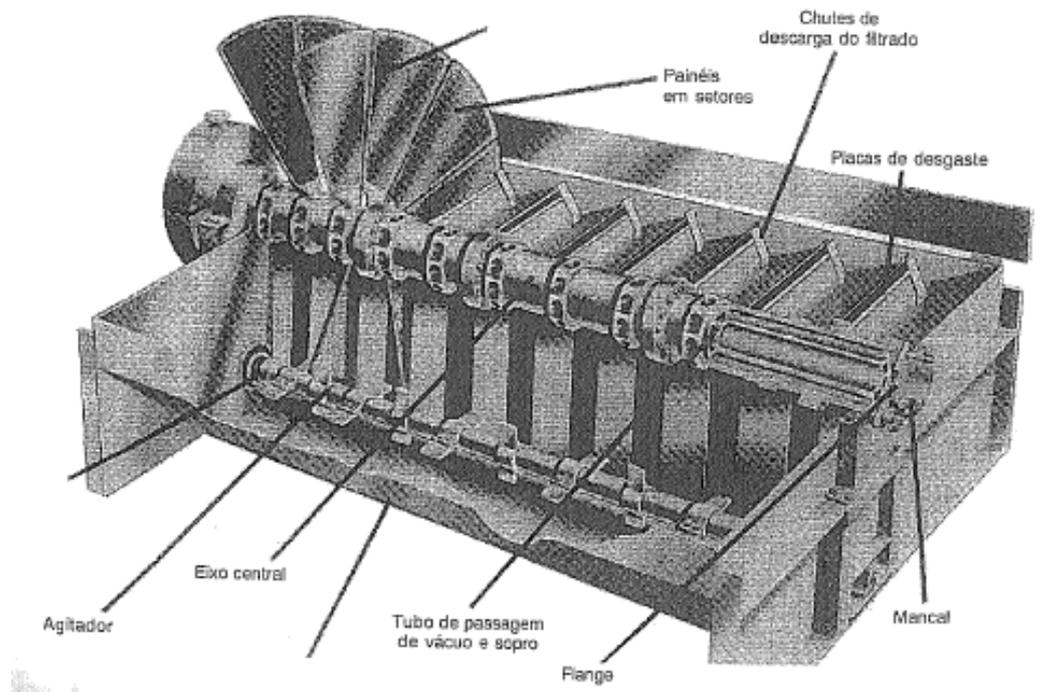
De acordo com Chaves e Peres (2006), os custos gerados com os equipamentos, e com o consumo energético por tonelada de produto aumentam proporcionalmente com o aumento da diferença de pressão requerida, no mesmo processo de separação do material sólido e do material líquido.

#### **4.4.1 Filtro de disco**

Nesse tipo de filtro a torta é formada em ambas as faces do disco e cada uma delas é composta por setores cobertos de tela que se comunicam com as tubulações de vácuo e de ar comprimido. Guimarães (2011) ressalva que em seu funcionamento o disco roda e entra sob um tanque munido de polpa, continuamente, a polpa é aspirada para junto das telas e a torta é formada. O filtrado passa para dentro do disco onde é recolhido e retorna como água de processo.

A Figura 8 ilustra o filtro a disco, no qual é possível identificar o agitador, o eixo central, os painéis em setores, o tubo de passagem de vácuo e sopro, as placas de desgaste, o flange e o mancal.

Figura 8: Esquema visual do Filtro a Disco.

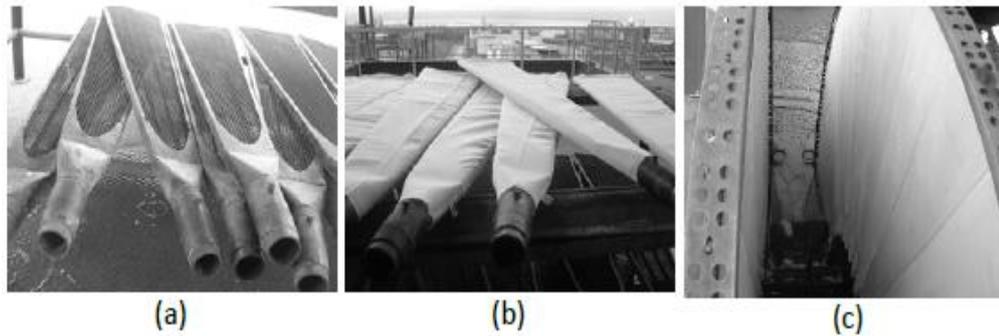


Fonte: Chaves (2006).

A maior vantagem do filtro a disco é a sua enorme área filtrante para uma baixa área de piso utilizada, e o problema mais comum relacionado a ele é quando se trabalha com materiais excessivamente finos, pois, eles obstruem as telas e não há forma de lava-las de dentro para fora a fim de desobstruir os poros, a sopragem de ar faz essa função, mas não é totalmente efetiva. Para o minério de ferro a presença de limonita e argilas no rejeito impede o beneficiamento dessa operação (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Na Figura 9 tem-se: em (a) a armação das seções que formam o disco; em (b) as seções envolta no meio filtrante e em (c) o disco montado para operação.

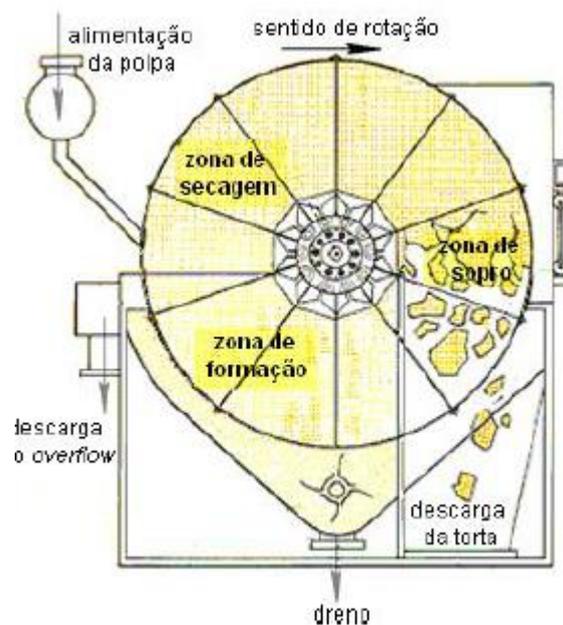
Figura 9: Armação das Paletas do Filtro a Disco.



Fonte: Chaves (2006).

A Figura 10 esquematiza a operação do filtro a disco, cujo material passa pela polpa, e em seguida passa pelas zonas de filtragem até a descarga do sistema.

Figura 10: Esquema de operação do Filtro a Disco.



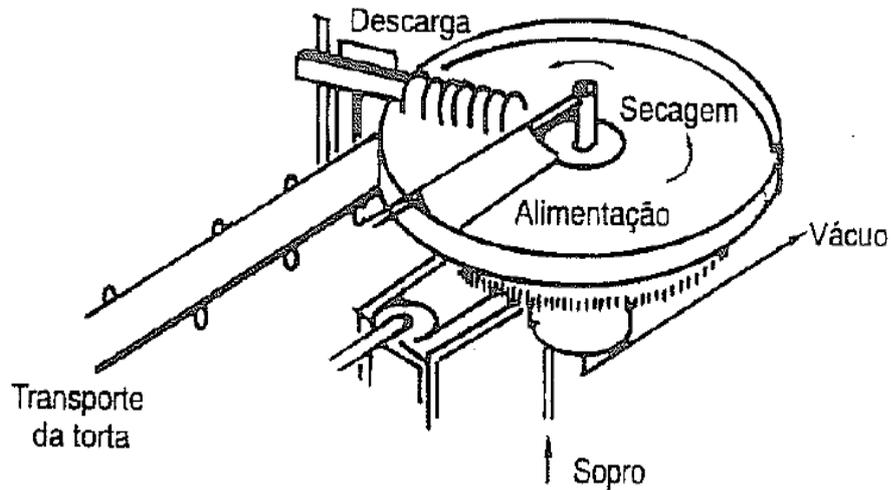
Fonte: Guimarães (2011).

#### 4.4.2 Filtro plano

De acordo com Amarante (2002), o filtro plano utiliza da gravidade como meio de alimentação da polpa, a qual passa por distribuição de forma uniforme por todos

os setores da superfície circular do filtro, conforme Figura 11, na mesa circular de secagem, e em seguida, passa pela descarga.

Figura 11: Esquema de operação do filtro plano.



Fonte: Chaves e Peres (2006).

Essa superfície gira em torno de um eixo vertical onde são apoiadas as telas (Figura 12). O filtro conecta-se a uma câmara de vácuo, que está posicionada na porção inferior da máquina, através dos diversos setores que a bandeja possui. Esses filtros possuem um bom rendimento para o desaguamento de rejeitos mais grosseiros (CHAVES, 2006).

Figura 12: Filtro de mesa em operação.



Fonte: Guimarães (2011).

#### 4.4.3 Filtro de tambor

De acordo com Guimarães (2011), os filtros a tambor se assemelham muito com os filtros a disco, a diferença é que no lugar das abas do disco há um cilindro onde as telas são fixadas (Figura 13). Internamente, o cilindro é dividido por setores que se ligam as tubulações de vácuo e de ar comprimido.

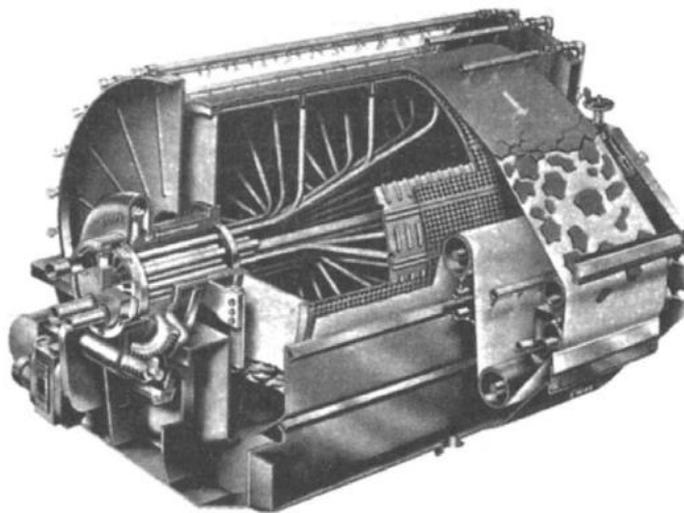
Figura 13: Modelo real de filtro de tambor.



Fonte: Guimarães (2011).

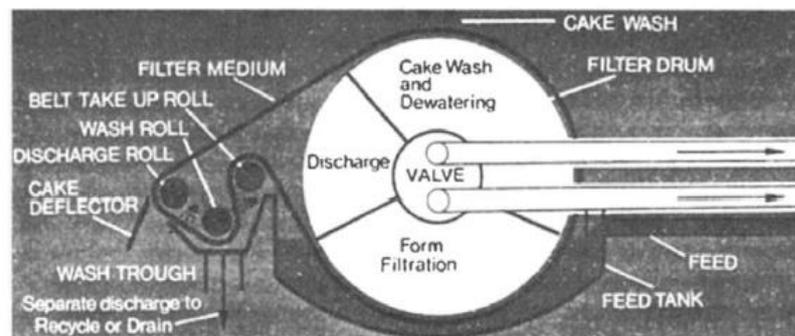
Há vários métodos utilizados para descarregar os filtros. A forma mais comum é utilizar um soprador de ar, de baixo para cima, ao final da rotação, de forma que a torta possa ser removida através de um raspador. O mais avançado é a descarga por correias, ilustrado na Figura 14 e Figura 15, onde o meio filtrante passa por rolos externos que permite, após a remoção da torta, a lavagem do tecido (tanto a parte interna como a externa) antes mesmo de retornar ao tambor e ser realimentado, e sem paralisar a operação (CHAVES, 2006).

Figura 14: Filtro de Tambor.



Fonte: Chaves (2006).

Figura 15: Esquema de operação do Filtro de tambor.

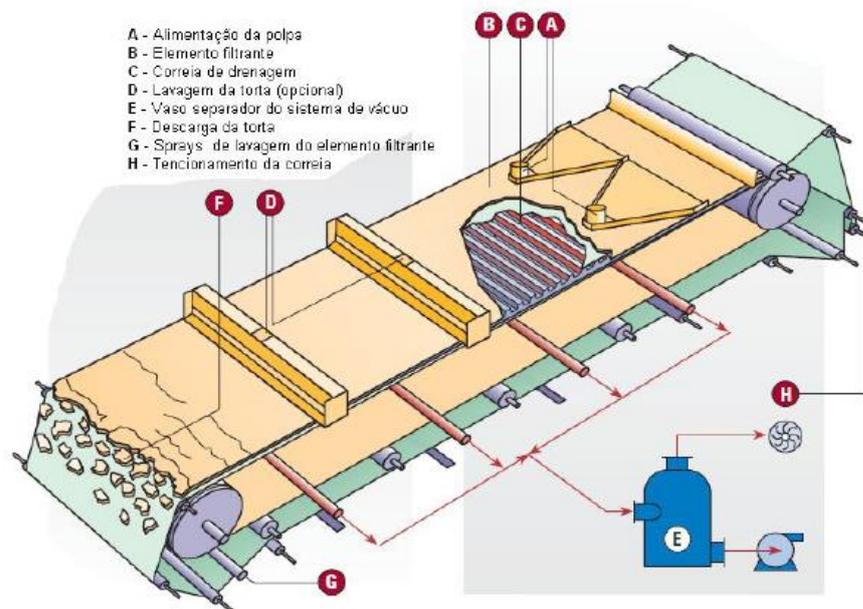


Fonte: Guimarães (2011).

#### 4.4.4 Filtro de correia

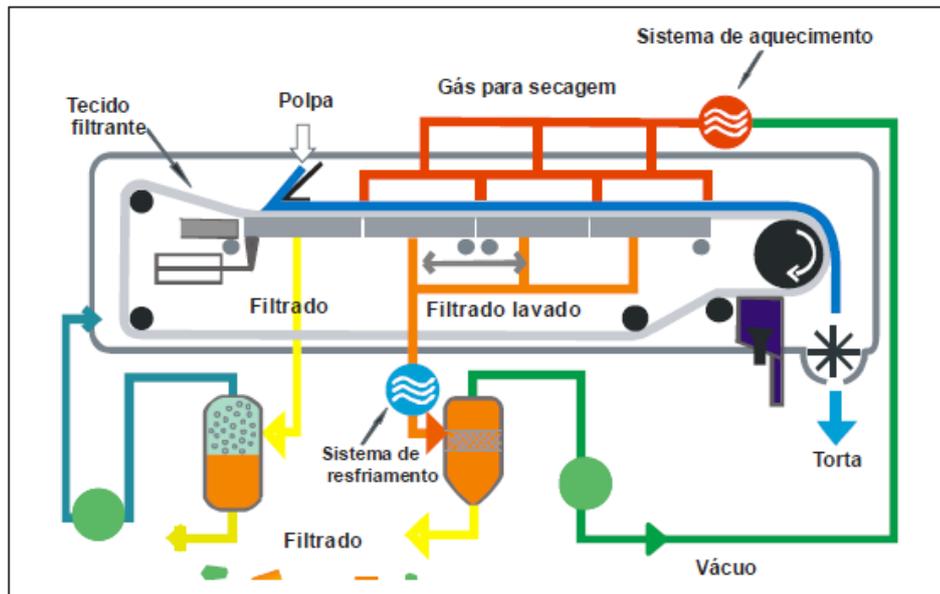
De acordo com Guimarães (2011), o filtro contém um transportador de correia que serve de suporte para o elemento filtrante e permite o escoamento do ar através da tela (Figura 16 e Figura 17). A polpa é alimentada numa extremidade, em seguida passa pelo elemento filtrante, e segue até o ponto de descarga do transportador onde ela é desaguada.

Figura 16: Modelo de filtro de correia.



Fonte: Guimarães (2011).

Figura 17: Esquema operacional do filtro de correia.



Fonte: Guimarães (2011).

De acordo com Amarante (2002), esse tipo de mecanismo combina operação de sedimentação gravitacional com filtração na zona de formação da torta. Há a possibilidade de filtrar e secar o que gera tortas com umidades super reduzidas, abaixo de 1%. De certo modo é fácil aumentar o comprimento da correia de forma a aumentar a área de filtragem e atender a demanda necessária.

#### 4.4.5 Filtro prensa horizontal

Segundo Guimarães (2011), esse tipo de filtro (Figura 18) difere dos outros em dois aspectos: o primeiro, por seus ciclos serem descontínuos, ou seja, opera por bateladas; o segundo, por utilizar a pressão e não o vácuo, como nos outros filtros analisados. Ele é constituído por um número grande de placas, que são revestidas por tela (meio filtrante), conforme Figura 19.

As etapas do seu ciclo se resumem em:

- As placas são juntadas e travadas;
- A polpa é bombeada para dentro dos espaços vazios entre as placas. Inicialmente usa-se bomba centrífuga, para acelerar o processo, que é possível até atingir a pressão máxima dessa bomba. A partir daí, usa-se bomba de pistão para completar o enchimento.

- As placas possuem um diafragma que é inflado com água pressurizada de forma a aumentar a pressão lateral contra a torta. A pressão que o conjunto exerce sobre a polpa, faz com que ela seja forçada entre o meio filtrante e o filtrado, tendo a água de processo como retorno;
- Interrompem-se os bombeamentos, liga-se o sistema de sopro de ar comprimido, a fim de se obter algum desaguamento adicional e limpar as tubulações do filtro;
- As placas iniciam sua abertura, uma a uma, para não sobrecarregar o *shut* de alimentação da correia transportadora, e a torta cai para ser empilhada;
- O transportador de correia é coberto, as telas são lavadas (quando necessário), as placas juntadas e travadas, e o filtro estão liberados para iniciar um novo ciclo.

Esse sistema de filtragem possui uma quantidade de operações para controle superior aos demais podendo comprometer o rendimento operacional do equipamento. De acordo com Luz, Sampaio e França (2010), pg. 580, o desempenho do filtro prensa pode ser expresso por:

$V_f$  volume filtrado, em metros cúbicos;

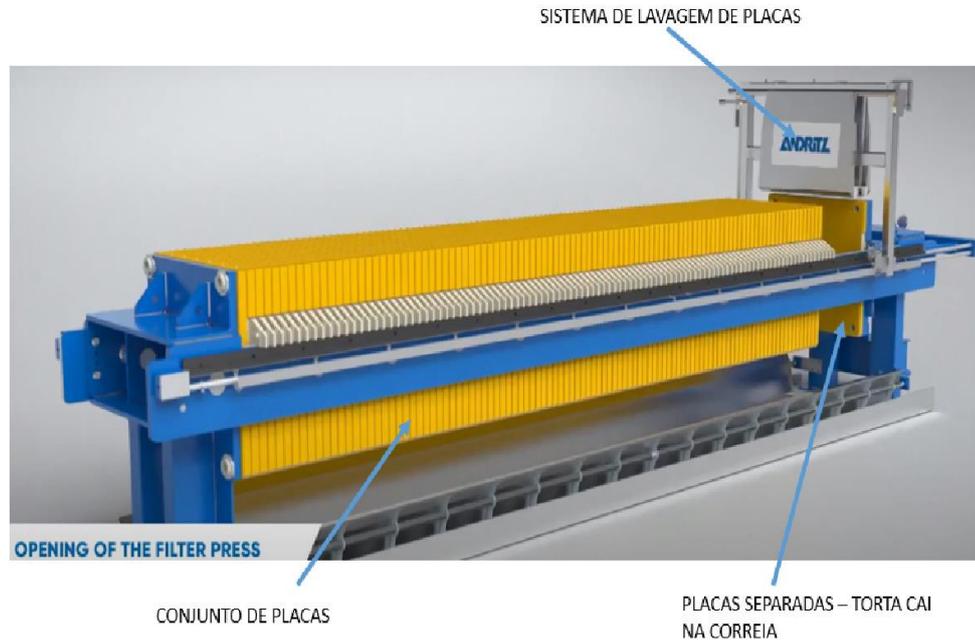
$t_f$  tempo de filtração, em segundos;

$t_l$  tempo de lavagem da torta, em segundos;

$t_d$  tempo de desmantelamento, limpeza e montagem do filtro, em segundos;

$$P = \frac{V_f}{t_f + t_l + t_d}$$

Figura 18: Filtro Prensa Horizontal *Andritz*.



Fonte: Andritz (2021).

Figura 19: Placa com o meio filtrante do filtro prensa.



Fonte: Andritz (2021).

#### 4.5 MEIOS FILTRANTES

Os meios filtrantes, mais conhecidos como telas de filtragem, são bastante diversificados. Para a indústria química e metalúrgica existe um grande número de materiais, como por exemplo, plásticos porosos, vidro sintetizado, membranas porosas. Mas, para a indústria mineral utiliza-se, basicamente, telas feitas em tecidos (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A escolha não se limita ao material de confecção da tela, mas, também, da forma em que elas são tecidas. A Tabela 2, retiradas de Purchas (1) mostram as composições químicas e as propriedades físicas das fibras.

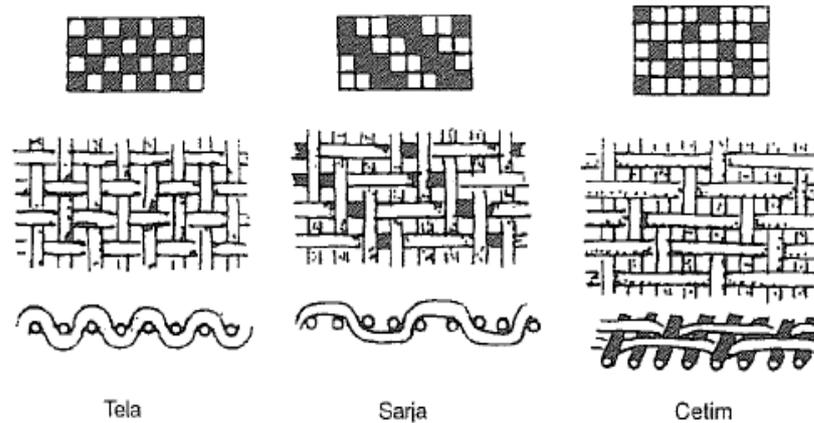
Tabela 2: Meios filtrantes e suas características.

Tipo de Fibra	Temperatura Máxima (°F)	Densidade (gm/cm <sup>3</sup> )	Absorção de Água (%)	Tenacidade a Seco (gm/cm <sup>3</sup> )	Alongamento na ruptura	Resistência ao desgaste
Acetato	210	1,3	9 a 14	0,8 a 1,2	30 a 50	Pobre
Acrílico	275 - 300	1,14 - 1,17	3 a 5	1,8 a 3	25 a 70	Boa
Algodão	200	1,55	16 a 22	3,3 a 6,4	5 a 10	Razoável
Fluocarbono	400	2,3	-	1 a 2	13 a 27	Razoável
Vidro	550 - 600	2,50 - 2,55	0,3	3 a 6	2 a 5	Pobre
Modacrylic	160 - 180	1,31	0,04 a 4	2 a 4	14 a 34	Razoável
Nomex	400 - 450	1,38	-	4,1	14	Excelente
Nylon	225 - 250	1,14	6,5 a 8,3	3 a 8	30 a 70	Excelente
Poliéster	300	1,38	0,04 a 0,08	3 a 8	10 a 50	Excelente
Poliétileno baixa Densidade	150 - 165	0,95	0,01	1 a 3	20 a 80	Boa
Poliétileno Alta Densidade	200 - 230	0,92	0,01	3,5 a 7	10 a 45	Boa
Polipropileno	250	0,91	0,01 a 0,1	4 a 8	15 a 35	Boa
PVC	150 - 160	1,3	-	1 a 3	-	Razoável
Rayon	210	1,50 - 1,54	20 a 27	0,7 a 4	6 a 40	Pobre
Saran	160 - 180	1,7	0,1 a 1	1,2 a 2,3	15 a 30	Razoável
Lã	180 - 200	1,3	16 a 18	0,7 a 1,6	25 a 35	Razoável

Fonte: Chaves e Peres (2006).

De acordo com Chaves (2006), as principais formas de tecer as telas são: Trama simples ou tela (*plain*), trama de sarjas (*twill*) e de cetim (*satín*), conforme Figura 20. O formato simples tem fios que passam alternadamente para cima e para baixo, o aspecto é o de um tabuleiro de xadrez. A trama em sarja exibe um desenho em diagonal. E a trama do cetim resulta numa superfície mais lisa, de aspecto brilhante, sem diagonais. A trama de filtragem também afeta o resultado da operação, como mostrado na Tabela 3.

Figura 20: Tessituras básicas.



Fonte: Chaves (2006).

Tabela 3: Efeito da trama sobre a filtragem.

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Umidade mínima na torta	Mais fácil descarga da torta	Máxima vida da tela	Mínima tendência a cegar
tela	cetim	cetim	tela	cetim	cetim
sarja	sarja	sarja	sarja	tela	sarja
cetim	tela	tela	cetim	sarja	tela

Fonte: Chaves (2006).

As características do fio que o tecido é feito também são importantes. Elas podem ser monofilamentar, multifilamentar ou felpudo. A Tabela 4 mostra os efeitos das características dos fios sobre o desempenho da tela.

Tabela 4: Efeitos das características dos fios (em ordem decrescente de preferência).

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Umidade mínima na torta	Mais fácil descarga da torta	Máxima vida da tela	Mínima tendência a cegar
felpudo	mono	mono	mono	felpudo	mono
multi	multi	multi	multi	multi	multi
mono	felpudo	felpudo	felpudo	mono	felpudo

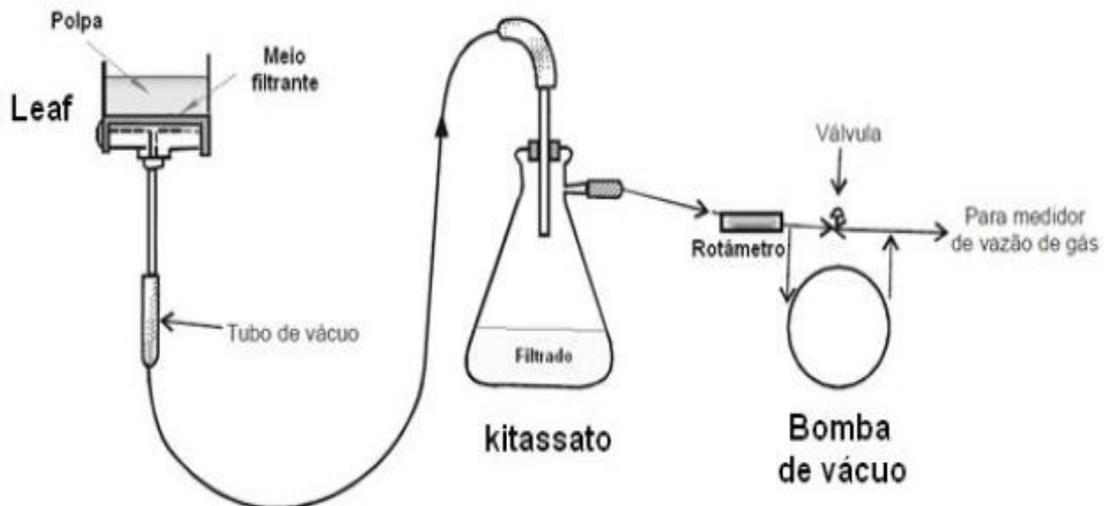
Fonte: Chaves (2006).

O meio filtrante ideal para utilização deve garantir que as partículas sólidas se mantenham sobre os poros de forma a minimizar a obstrução deles. As telas devem, também, ser resistentes o suficiente para não rasgar com a pressão de filtragem, e devem ter um custo compatível com a operação (ALVES, 2020).

#### 4.6 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO

De acordo com Guimarães (2011), o dimensionamento de filtro costuma se basear nos resultados de ensaios denominado *filter leaf test*. Esse teste utiliza um suporte padrão de área 1/10 ft<sup>2</sup> que é revestido com a tela mais adequada à polpa. O suporte é ligado por meio de mangueiras a um *kitassato*, a uma bomba de vácuo e a um rotâmetro. A Figura 21 ilustra essa montagem.

Figura 21: Representação do *Leaf Test*.



Fonte: Guimarães (2011), pag. 45.

Nesse ensaio, o *leaf* ou o meio filtrante, é introduzido no reservatório de polpa. A polpa é adicionada por cima, a qual permanece sob a ação do vácuo até a torta ser visualizada sem a presença considerável de líquido na superfície (AMARANTE, 2002).

No final do teste, desmontam-se os equipamentos. O filtrado e a torta são recolhidos para pesagem (peso úmido), secagem e posterior pesagem (peso seco). Coleta-se também, a espessura da torta, o volume de filtrado e a vazão de ar medida

pelo rotâmetro. Com isso, determina-se a umidade da torta, a taxa unitária de filtragem e o percentual de sólidos no filtrado (GUIMARÃES, 2011).

Há um método clássico, desenvolvido por Dahlstrom e Silverblatt que se utiliza dos dados do *leaf test* para a construção de três gráficos que a partir deles irão ser determinados o ciclo da filtragem, e a área necessária do filtro, mediante a aplicação de um fator de escala de 0,8 (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A Figura 22 ilustra esses gráficos. O Gráfico 1 relaciona a massa da torta seca por unidade de área ( $w$ ) em função da espessura da torta. O Gráfico 2 utiliza o log da massa da torta seca por unidade de área ( $w$ ), em função do log do tempo de formação da torta. E o Gráfico 3 relaciona a umidade da torta com um fator de correlação ( $F_c$ ) definido com o tempo de secagem dividido por  $w$ .

Figura 22: Modelo de gráfico conforme Dahlstrom e Sliverblatt.



Fonte: Guimarães (2011), pag. 46.

## 4.7 ESPESSADOR

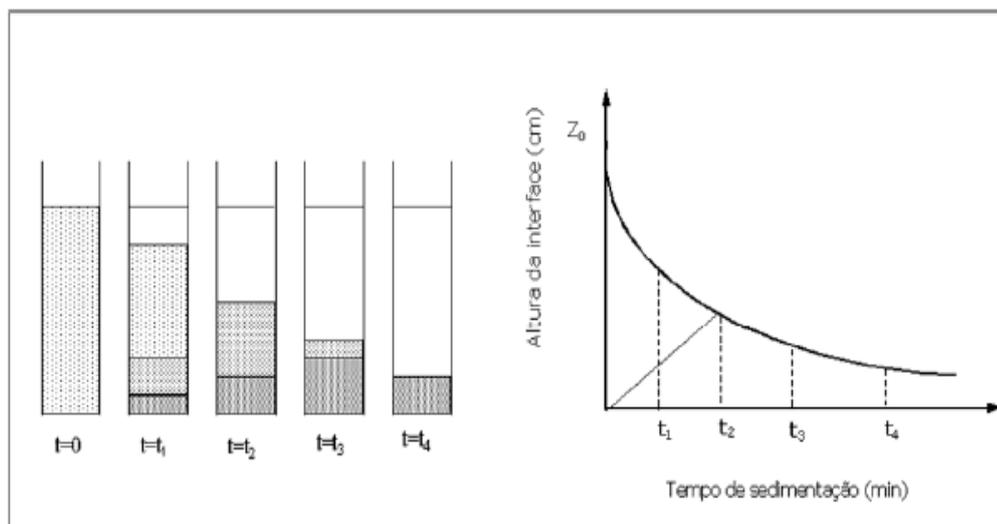
Segundo Alves (2020), o espessador, no beneficiamento de minério, é o responsável pelo processo de separação sólido-líquido de polpa. A finalidade pode ser para desaguar o produto da usina ou o rejeito. Independentemente de qual seja o fim, a separação é baseada na diferença de densidade e a ação gravitacional possibilita esse processo.

O espessamento é caracterizado pela produção de material com alta taxa de concentração de sólidos e eles, geralmente, operam continuamente. Além disso, é possível a recuperação de água de processo o que impacta positivamente no consumo de água nova da usina de beneficiamento (WILLS; MUNN, 2006).

O teste da proveta permite uma melhor descrição no que diz respeito ao processo de sedimentação. Durante esse teste, coexistem três regiões diferentes, são elas: Na parte superior da proveta, encontra-se o líquido clarificado, no meio, a sedimentação livre, e no fundo, a região de compactação (ALVES, 2020).

No início do teste (Figura 23),  $t_0$ , a polpa é homogênea e a concentração de sólidos é constante. Em  $t_1$ , as partículas maiores iniciam a sedimentação, e torna-se perceptível uma fina camada de sólidos se formando no fundo da proveta. A região intermediária da proveta é composta pelas partículas mais finas, que sedimentam mais lentamente. À medida que a sedimentação vai ocorrendo a fração superior torna-se isenta de sólidos, e, por isso, é chamada de líquido clarificado.

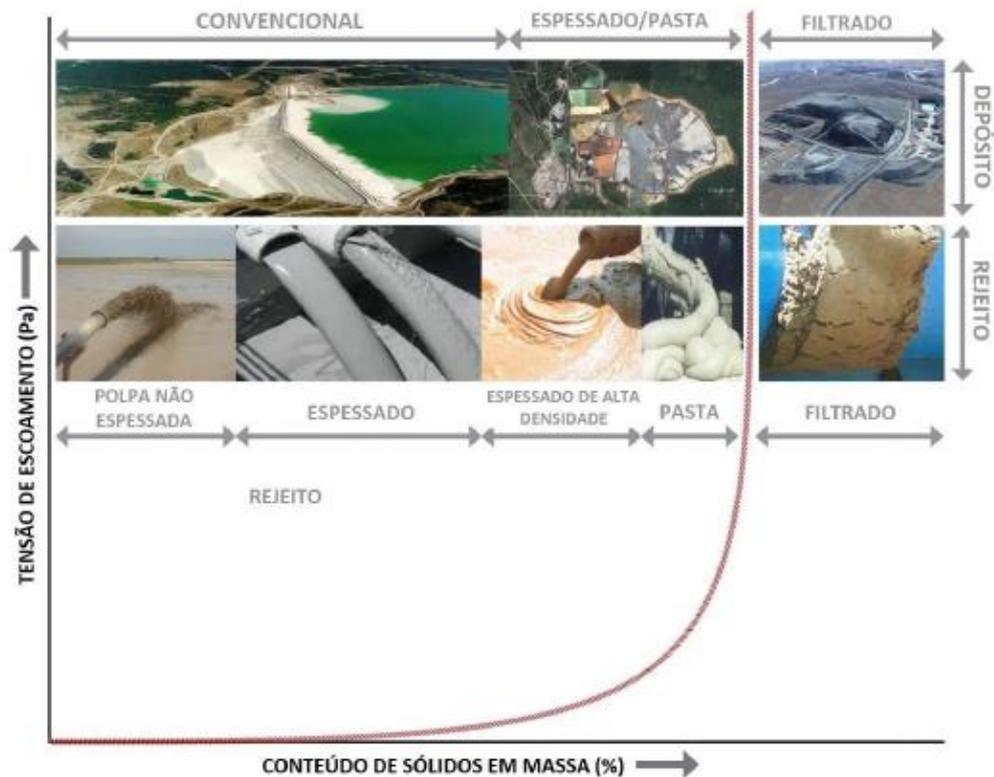
Figura 23: Etapas do teste de proveta.



Fonte: Luz Sampaio e França (2010).

A Figura 24 ilustra graficamente o percentual de sólidos existentes conforme o aumento da tensão de escoamento. No gráfico encontra-se o sólido convencional, a polpa não espessada, o espessado, a pasta, o filtrado, e o rejeito, cuja localização no gráfico varia conforme a tensão e o conteúdo de sólido em massa.

Figura 24: % de sólidos VS Tensão de escoamento.



Fonte: Alves (2020).

#### 4.7.1 Tipos de espessadores

A escolha do tipo de espessador vai depender das características do material e do nível de adensamento desejado. Os espessadores convencionais são compostos pelos tanques cilíndrico-cônicos feitos em concreto ou aço e equipados com mecanismos de direcionamento e raspagem do material sedimentado no fundo, chamado *rakes* (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

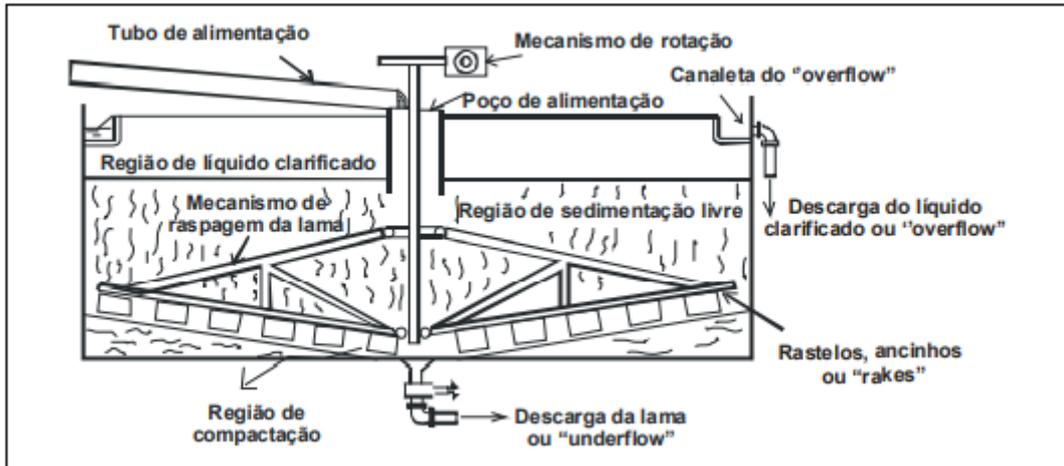
##### 4.7.1.1 Espessador contínuo convencional

O espessador contínuo é composto de um tanque alimentado no centro superior. O equipamento necessita de um sistema de retirada de *underflow*, de forma que o material não compacte no fundo, para isso são utilizados os raspadores, mais conhecido como *rake*. O *rake* gira em torno do eixo central do cilindro (CHAVES; PERES, 2006).

Na Figura 25 é possível verificar esquematicamente a vista frontal do espessador convencional, onde é possível observar a posição dos rastelos *rakes*, e

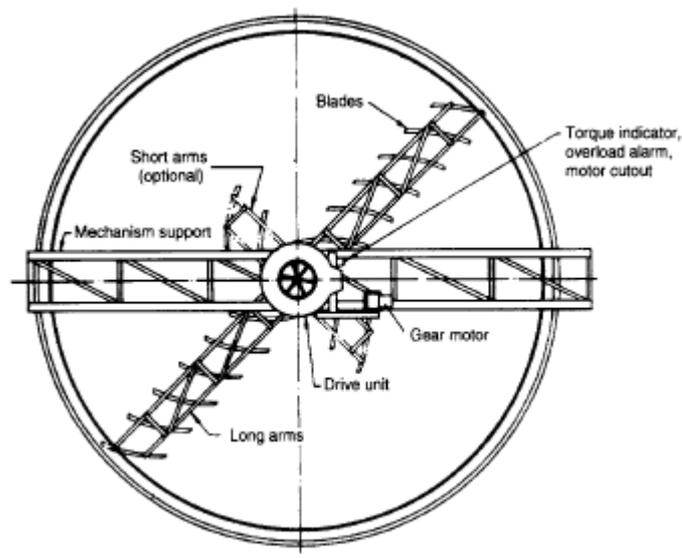
os demais componentes do espessador. A Figura 26 trata-se da vista superior do espessador convencional.

Figura 25: Vista frontal do espessador convencional.



Fonte: Luz Sampaio e França (2010).

Figura 26: Vista superior do espessador convencional.



Fonte: Luz Sampaio e França (2010).

#### 4.7.1.2 Espessador de alta capacidade (super espessadores)

De acordo com Amarante (2002), esse tipo é bastante semelhante ao convencional (Figura 27). Diferenciando-se do espessador convencional por

pequenas modificações estruturais, seja devido à inserção de lamelas ou a modificação do posicionamento da alimentação, onde é adicionado o floculante via poço de alimentação, que melhora a capacidade de espessamento. A vantagem é que ele aumenta a área de espessagem sem aumentar o diâmetro do equipamento.

Figura 27: Modelo de espessador de concreto armado.

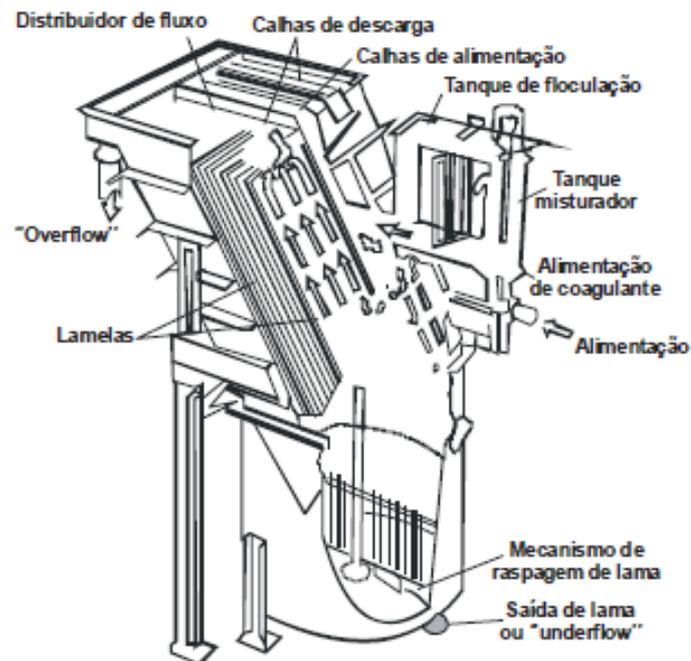


Fonte: Alves (2020), pg. 34.

#### **4.7.1.3 Espessadores de Lamelas**

O espessador de lamelas (Figura 28) é uma versão de alta capacidade melhorada. O espessador possui placas inclinadas, formando canais, cujas paredes são formadas por placas colocadas lado a lado. Tem como vantagem a economia de espaço, pois, a área de sedimentação efetiva é calculada pela soma da área das lamelas. Nesse modelo, a polpa pode ser introduzida no canal de alimentação ou numa câmara de mistura de floculação, aumentando a eficácia do floculante (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Figura 28: Espessador de Lamelas.



Fonte: Luz; Sampaio e França (2010).

## 4.8 MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO

Segundo Wolff (2009), a geração e disposição de resíduos são fatores críticos na mineração, setor que corresponde a um dos principais produtores mundiais de descartes. Esses resíduos acarretam tanto em um custo, pois seu correto manejo implica em despesas, quanto em um passivo ambiental, que deva ser disposto de maneira correta e sempre monitorado, para evitar acidentes e contaminações.

O beneficiamento de minério produz o rejeito, que é a parte associada ao minério descartada durante ou após o processamento mineral. Em geral, esse tipo de resíduo é disposto através de métodos convencionais em barragem, o que requer um monitoramento constante para garantir a estabilidade e segurança da sua estrutura.

Segundo a ANM (2021), estima-se que, no período entre 2010 e 2019, produziu-se no Brasil aproximadamente 3,4 bilhões de toneladas de rejeito. E, após os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciou a necessidade de dar destinação sustentável a esse tipo de resíduo.

### 4.8.1 Método Convencional

O método convencional utilizado são as famosas barragens de rejeito. Segundo Prince e Walsh (2005), a construção dessa estrutura inicia através do dique de partida, e ele é construído, geralmente, com drenos em seu interior, de modo que a água retida no barramento possa ser conduzida até o fundo e através do material drenante seja escoada para fora, garantindo, assim, a sua estabilidade.

A medida que se enche esse reservatório de rejeito inicia-se o alteamento. O intuito dele é de se ganhar mais espaço para acomodar mais rejeito. Os alteamentos têm seu nome relacionado com a direção tomada pela crista, na medida que vão aumentando a capacidade do barramento. E eles podem ser descritos como alteamento a montante, alteamento a jusante e alteamento de linha de centro. O material de alteamento é, normalmente, o estéril da lavra (WOLFF, 2009).

#### 4.8.2 Método Alteamento a Montante

O método a montante, ilustrado na Figura 29, tem o seu eixo de alteamento em direção a montante com relação à topografia do terreno. À medida que o rejeito é lançado forma-se uma praia, que servirá de fundação para a construção de um novo alteamento.

Figura 29: Barragem de rejeito a montante.



Fonte: IBRAM (2021).

De acordo com Gomes (2017), as vantagens desse tipo de construção é um baixo custo, velocidade de alteamento alta, pouco uso de equipamentos para terraplanagem. Como desvantagem esse tipo estrutura possui baixo coeficiente de

segurança, elevado risco de liquefação da massa de rejeito, podendo sofrer influência de sismos naturais, e abalos provenientes de detonações.

Vale lembrar que, foi publicado no diário oficial, a Resolução Nº 4, de 15 de fevereiro de 2019, que estabelece medidas regulatórias objetivando a estabilidade de barragens. Nessa resolução fica proibida a utilização de método a montante em todo território nacional. Para as barragens que já existem fica obrigatório o seu descomissionamento (DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2019).

#### 4.8.3 Método Alçamento a Jusante

Nesse método, ilustrado pela Figura 30, a linha de centro se desloca a jusante aos processos de alçamento e eles podem ser projetados para grandes alturas, incorporando sempre, os sistemas de impermeabilização e drenagem. A vantagem desse método em relação ao de montante é a maior segurança contra vibrações e a menor chance de ocorrer liquefação por não apoiar o alçamento no próprio rejeito. As desvantagens são um maior custo, necessitando de um elevado volume de material para se alçar (GUIMARÃES, 2011).

Figura 30: Barragem de rejeito a jusante.



Fonte: IBRAM (2021).

#### 4.8.4 Método de Linha de Centro

Dentre os três métodos de alçamento esse é o intermediário entre eles. De acordo com Alves (2020), o comportamento estrutural aproxima-se do método a jusante. Nele, o eixo vertical do dique de partida coincide com eixo dos alçamentos seguintes, como mostra na Figura 31. Esse método permite utilizar zonas de

drenagem interna em todas as fases o que permite um melhor controle da linha de saturação e ajuda a dissipar as poropressões.

Figura 31: Barragem de rejeito em linha de centro.



Fonte: IBRAM (2021).

#### 4.8.5 Métodos Alternativos

Dentre os métodos alternativos para disposição de rejeito, estão a:

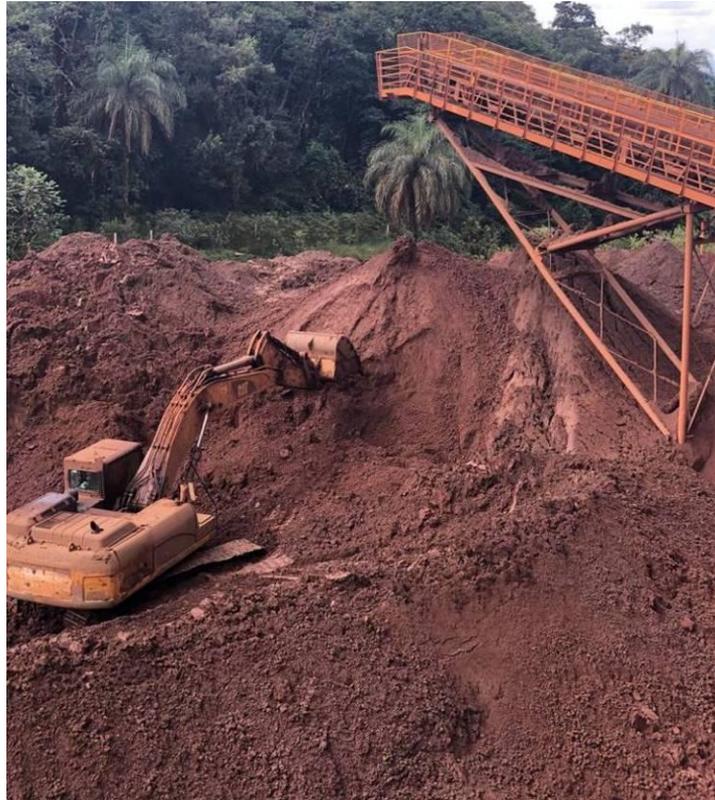
- Co-disposição: Consiste em misturar rejeito e estéril de mina em um mesmo espaço físico de forma que diminua a umidade e se tenha segurança;
- Disposição compartilhada: Esse método acontece quando o rejeito e o estéril são dispostos no mesmo espaço físico, mas sem a necessidade de misturá-los.

Suas vantagens são a melhoria das características geotécnicas e de densidade do rejeito, a redução do comprometimento ambiental e acompanhamento intenso, o aproveitamento de áreas já utilizadas para dispor o estéril. As suas desvantagens são a capacidade de comprometer as características de resistência e deformabilidade quando composto por resíduos muito finos, comprometimento ambiental quando o rejeito for quimicamente tóxico (ALVES, 2020).

#### 4.9 Empilhamento de Rejeito

A proibição dos alteamentos na legislação brasileira ocasionou o aumento do investimento das empresas em adquirir filtros que filtrem o rejeito, e entregue o mesmo com uma umidade que seja viável o seu empilhamento. A Figura 32 traz uma imagem de rejeito filtrado sendo carregado e transportado para a pilha.

Figura 32: Rejeito filtrado.



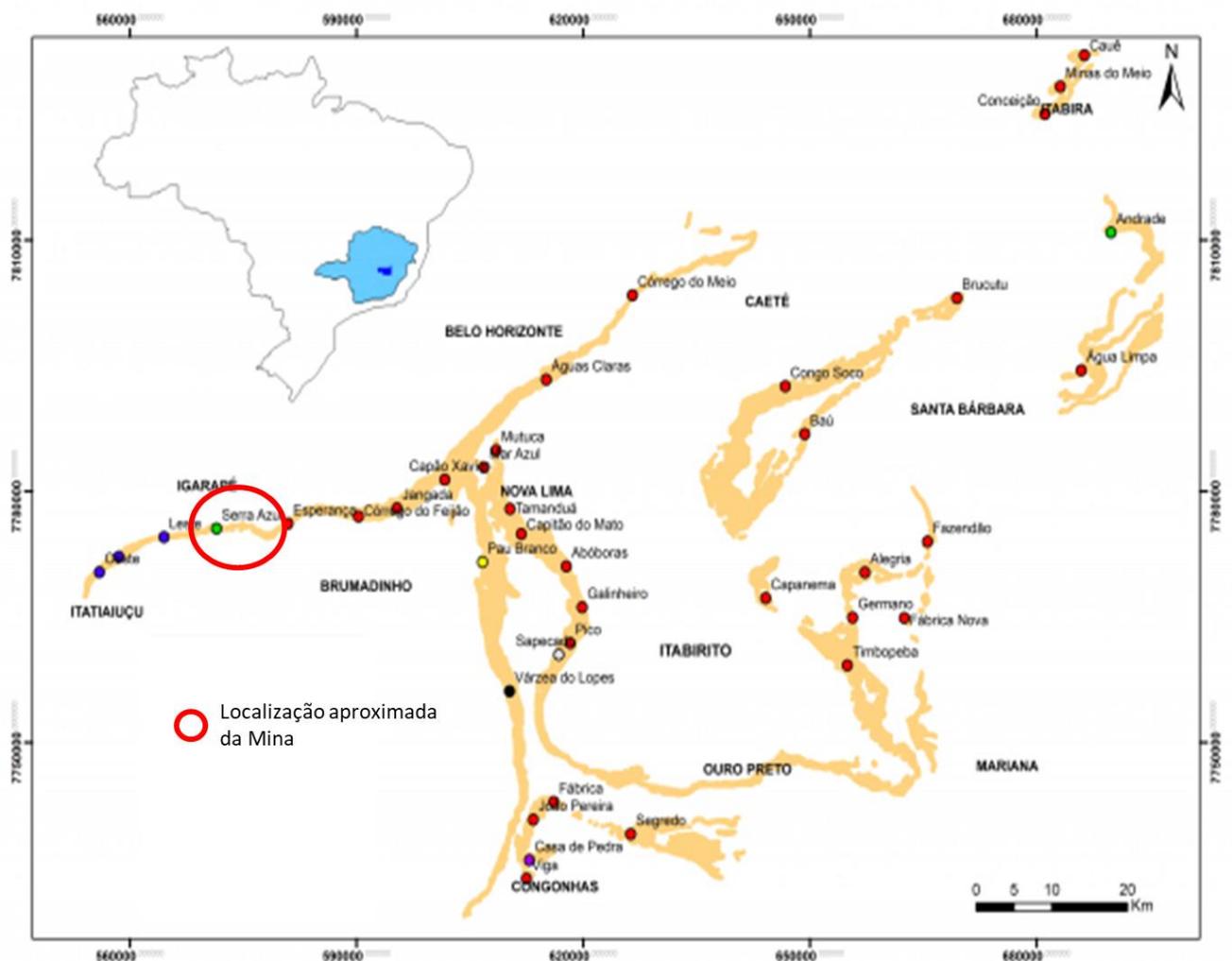
Fonte: Acervo do autor (2021).

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 LOCALIZAÇÃO

A empresa analisada situa-se no estado de Minas Gerais e suas operações são realizadas na cidade de Brumadinho (Figura 33). Ela faz parte do quadrilátero ferrífero e se encontra a aproximadamente 60 quilômetros de Belo Horizonte.

Figura 33: Localização aproximada da mineradora.



Fonte: Modificado de Ruchkys, Castro e Miranda (2019).

## 5.2 FLUXOGRAMA DO PROCESSO

O fluxograma da usina possui duas linhas de alimentação, a linha A e a linha B. O que difere as duas rotas é que a linha A não possui cominuição de material. Nela, o material que é retido na primeira peneira se torna rejeito grosso e apenas o fino é processado.

A linha B é alimentada e o material é transportado para o britador primário de mandíbulas. Em seguida o minério britado alimenta a peneira 01 de 2 decks, e nela, as partículas mais grossas que são retidas entram em um circuito fechado com um britador cônico, até passarem do primeiro deck da peneira.

O passante da peneira 01 alimenta o segundo deck e as partículas retidas ali se tornam o produto *Lump*. O passante do segundo deck da peneira 01 alimenta a peneira 02. O retido nela se torna o *sinterfeed*, que é comercializado, e o passante, por serem partículas finas, é direcionado a uma caixa de polpa e é bombeado para a usina de processamento.

Na usina, tanto para a linha A quanto para a linha B, o material rico é concentrado através de separadores magnéticos WHIMS (*Wet High Intensity Magnetic Separator*), por rolos magnéticos e por uma série de espirais *Rougher*, *cleaner* e *re-cleaner*.

Entre essas etapas de separação do material economicamente interessante há hidrociclones que retiram as partículas extrafinas e realimentam-nas no início do processo ou as descartam como rejeito.

Outro tipo de equipamento essencial, que entra antes ou depois das etapas de concentração, são as peneiras. As peneiras que antecedem os separadores magnéticos têm como objetivo evitar que partículas que possam obstruir os pacotes entrem nesse equipamento. Além dessas, existem peneiras com o objetivo de desaguar o produto para após isso ele ser estocado e comercializado com a umidade adequada.

Há também, peneiras que recebem o rejeito das etapas de separação, de forma que as partículas grossas sejam retidas e estocadas como rejeito grosso e as finas sejam direcionadas para o espessador para após a espessagem serem encaminhadas aos filtros prensa.

Figura 34: Fluxograma de processos.

## **5.3 MATERIAIS E MÉTODOS**

O estudo desenvolvido nesse trabalho utiliza os resultados dos testes disponibilizados pelas empresas, tanto dos desempenhos atuais dos dois filtros prensas que estão em operação quanto dos valores nominais de desempenho que esses filtros deveriam operar, dimensionados pela fabricante.

### **5.3.1 OBTENÇÃO DOS DADOS TEÓRICOS**

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização da amostra de lama. Após esses ensaios, fizeram-se testes com filtros prensa piloto de 470x470mm. Esses testes tiveram o objetivo principal de verificar a filtrabilidade das amostras, a taxa de filtração, a espessura da torta ótima, a área de filtração necessária e a umidade ideal da torta.

#### **5.3.1.1 Características - Filtro Prensa Piloto**

Filtro Prensa horizontal 470 x 470mm, tipo câmara e diafragma misto, com duas câmaras. Seu fechamento era através de cilindro hidráulico com retorno por mola. Acionamento por unidade hidráulica compacta, com bomba de alta pressão, válvulas e instrumentação de segurança. Pressão máxima de projeto foi 16 *bar*.

O tecido filtrante é responsável por revestir a placa em ambos os lados, devendo elas serem travadas lado a lado, formando uma série de câmaras. As placas contidas no filtro prensa ilustrado pela Figura 35 possuem uma porta de alimentação central, a qual transpassa por todo o filtro prensa, possibilitando a conexão entre todas as câmaras do conjunto de placas. As placas são conectadas por quatro aberturas de canto, de forma a coletar os filtrados de lavagem.

Figura 35: Modelo de filtro prensa piloto.



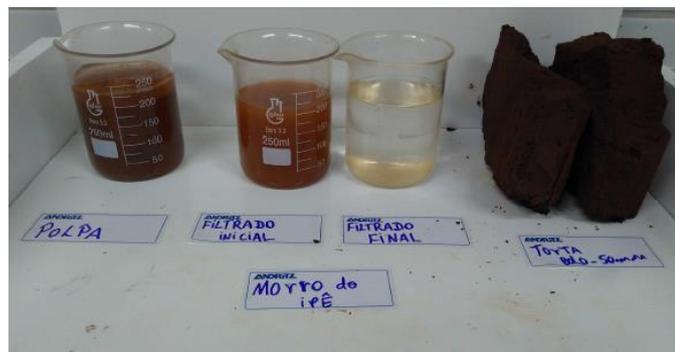
Fonte: Michelin (2019).

### 5.3.1.2 Caracterização das amostras de lama

As amostras testadas foram geradas pela empresa mineradora e analisadas pela equipe da fornecedora de filtros, ilustradas pela Figura 36.

A lama era constituída de minério de ferro com argilas. A concentração de sólidos foi de 31, 37 e 44%, peso por peso. A densidade dos sólidos e da polpa eram aproximadamente de 3,40 g/cm<sup>3</sup> e 1,45 g/cm<sup>3</sup> respectivamente.

Figura 36: Polpa, filtrados e torta.



Fonte: Acervo do autor (2021).

### 5.3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS OPERACIONAIS

### 5.3.2.1 Ciclos de Filtragem

Os dados de desempenho dos filtros são extraídos do seu painel de controle e convertidos em planilha no *Microsoft Excel*. O tempo de ciclo, o tempo de alimentação que está contido no tempo de ciclo, e o peso da torta após operação, são mostradas nas Figuras 37 e 38, seguidas pelo modelo de base de dados da Figura 39, abaixo:

Figura 37: Intervalo de tempo dos ciclos e tempo de alimentação contido no tempo de ciclo.

Nr.	Início	Fim	Data	Alimentação	Espera Aliment
01.	4 : 22	5 : 23	20 / 3	1533 seg	137 seg
02.	3 : 28	4 : 22	20 / 3	1493 seg	0 seg
03.	2 : 13	3 : 28	20 / 3	1817 seg	603 seg
04.	1 : 10	2 : 13	20 / 3	1972 seg	190 seg
05.	0 : 11	1 : 10	20 / 3	1709 seg	40 seg
06.	23 : 15	0 : 11	19 / 3	1610 seg	0 seg
07.	21 : 40	23 : 15	19 / 3	1396 seg	2015 seg
08.	19 : 59	21 : 40	19 / 3	3785 seg	644 seg
09.	18 : 34	19 : 59	19 / 3	2675 seg	580 seg
10.	17 : 14	18 : 34	19 / 3	2326 seg	567 seg

Fonte: Acervo do autor (2021).

Figura 38: Peso de cada ciclo realizado.

Nr.	Peso	Horário	Data	Nr.
01.	38010 Kg	5 : 33	Pesagem	11.
02.	35940 Kg	4 : 39	20/3/2021	12.
03.	34870 Kg	3 : 42		13.
04.	31690 Kg	2 : 39		14.
05.	30170 Kg	1 : 40		15.
06.	35530 Kg	0 : 26		16.
07.	0 Kg	0 : 0		17.
08.	0 Kg	0 : 0		18.
09.	0 Kg	0 : 0		19.
10.	0 Kg	0 : 0		20.

Fonte: Acervo do autor (2021).

Figura 39: Modelo de base de dados da operação dos filtros.

Data	Turno	Início	Fim	Tempo Alim.	Tempo de Ciclo	Ciclos	Peso (Kg)
20/02/2021	2	14:03	14:49	867	00:46:00	9889	35.290
20/02/2021	3	14:49	15:48	1177	00:59:00	9890	38.920
20/02/2021	3	15:48	16:42	1549	00:54:00	9891	38.760
20/02/2021	3	16:42	17:31	1236	00:49:00	9892	38.900
20/02/2021	3	17:49	18:32	673	00:43:00	9893	37.100
20/02/2021	3	18:32	19:12	766	00:40:00	9894	34.780
20/02/2021	3	19:12	20:02	1388	00:50:00	9895	37.520
20/02/2021	3	20:02	20:56	1231	00:54:00	9896	36.490
20/02/2021	3	20:56	21:52	1513	00:56:00	9897	40.990
20/02/2021	3	21:52	22:36	991	00:44:00	9898	34.450
20/02/2021	3	22:36	23:25	1276	00:49:00	9899	35.600

Fonte: Acervo do autor (2021).

## 5.4 PARÂMETROS ANALISADOS

Parâmetros discutidos:

**Taxa unitária de filtração:** É utilizada para medir a produtividade da operação por metro quadrado de área filtrante. É calculada dividindo a massa seca filtrada por metro quadrado, por hora ( $\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ ).

**Tempo de ciclo:** Consiste no tempo de enchimento do filtro, pressurização do diafragma, sopros, despressurização e descarga das placas.

**Umidade da torta:** Porcentual de água no rejeito.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 TESTES FILTRO PRENSA PILOTO

As tabelas 5, 6 e 7, abaixo, mostram os resultados dos testes que foram utilizados para dimensionar o filtro prensa. Observa-se que, os filtros que utilizaram o tipo de câmara recesso (que não possui pressurização interna na sua câmara) não obtiveram a sua descarga de torta fácil. Além disso, nesse tipo de câmara, umidade

mais baixa alcançada foi de 15,80%. O que inviabilizou, principalmente pela difícil descarga, o tipo de filtro prensa com câmaras Recesso.

Entretanto, todos os filtros mistos, que possuem câmaras com diafragmas de pressurização interna, obtiveram fácil descarga de torta. obtendo uma porcentagem de umidade adequada de 13,08%.

Tabela 5: Teste de filtração.

TEST	1	2	3	4	5	6	7
PULP TEMPERATURE (°C)	Ambiente						
pH	6	6	6	6	6	6	6
% SOLIDS PULP:	44	44	44	44	44	44	44
PACKAGE TYPE	MISTO	MISTO	MISTO	MISTO	RECESSO	RECESSO	RECESSO
CHAMBER THICKNESS (mm)	40	40	40	40	40	40	50
FEED PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	6	6	6	6	6	6	6
MEMBRANE PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	8	15	8	15	0	0	0
WET CAKE WEIGHT (kg)	18,80	18,70	18,30	18,30	21,00	21,00	26,30
CAKE MOISTURE (%)	14,80	13,99	12,16	11,75	15,90	16,40	16,33
FILTER MEDIA TYPE	259	259	259	259	259	259	259
CAKE BULK DENSITY (kg/l) MEASURED	2,37	2,32	2,28	2,32	2,25	2,22	2,46
CAKE BULK DENSITY (kg/l) CALCULATED	2,74	2,77	2,66	2,76	2,41	2,41	2,68
CAKE BULK DENSITY (kg/l) THEORITICAL	2,64	2,69	2,79	2,81	2,59	2,56	2,57
CAKE DISCHARGE	FACIL	FACIL	FACIL	FACIL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL

Fonte: Empresa fabricante de filtros prensa (2017).

Tabela 6: Teste de filtração.

TEST	8	9	10	11	12	13	14
PULP TEMPERATURE (°C)	Ambiente						
pH	6	6	6	6	6	6	6
% SOLIDS PULP:	44	44	44	37	37	37	37
PACKAGE TYPE	MISTO	MISTO	MISTO	RECESSO	RECESSO	RECESSO	RECESSO
CHAMBER THICKNESS (mm)	50	50	50	50	40	40	40
FEED PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	6	6	6	6	6	6	6
MEMBRANE PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	15	8	8	0	0	0	0
WET CAKE WEIGHT (kg)	25,30	25,30	25,40	23,80	18,20	19,63	19,84
CAKE MOISTURE (%)	13,08	13,70	14,20	17,00	16,23	15,80	15,87
FILTER MEDIA TYPE	259	259	259	259	259	259	259
CAKE BULK DENSITY (kg/l) THEORITICAL	2,59	2,70	2,67	2,54	2,57	2,59	2,59
CAKE DISCHARGE	FACIL	FACIL	FACIL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL

Fonte: Empresa fabricante de filtros prensa (2017).

Tabela 7: Teste de filtração.

TEST	11	12	13	14	15	16	17
PULP TEMPERATURE (°C)	Ambiente						
pH	6	6	6	6	6	6	6
% SOLIDS PULP:	37	37	37	37	31	31	31
PACKAGE TYPE	RECESSO	RECESSO	RECESSO	RECESSO	RECESSO	MISTO	MISTO
CHAMBER THICKNESS (mm)	50	40	40	40	50	50	50
FEED PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	6	6	6	6	6	6	6
MEMBRANE PRESSURE (kgf/cm <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0	15	8
WET CAKE WEIGHT (kg)	23,80	18,20	19,63	19,84	26,80	26,00	26,00
CAKE MOISTURE (%)	17,00	16,23	15,80	15,87	15,49	13,15	14,15
FILTER MEDIA TYPE	259	259	259	259	259	259	259
CAKE BULK DENSITY (kg/l) THEORITICAL	2,54	2,57	2,59	2,59	2,61	2,73	2,68
CAKE DISCHARGE	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	RAZOAVEL	FACIL	FACIL

Fonte: Empresa fabricante de filtros prensa (2017).

## 6.2 FILTRO DIMENSIONADO

O filtro prensa dimensionado pela empresa fornecedora desse equipamento seguiu as características da Tabela 8 abaixo. Os principais pontos de atenção para o adequado funcionamento é a pressão de alimentação, de 6 bar, a pressão de pressurização do diafragma das câmaras, entre 12 e 15 bar, a densidade da polpa, de 1,45 t/m<sup>3</sup>. Além disso, para cumprir a capacidade da planta, os filtros devem obter uma taxa unitária de filtração de 97,2 kg/h.m<sup>2</sup>.

Tabela 8: Modelo de filtro sugerido pela empresa.

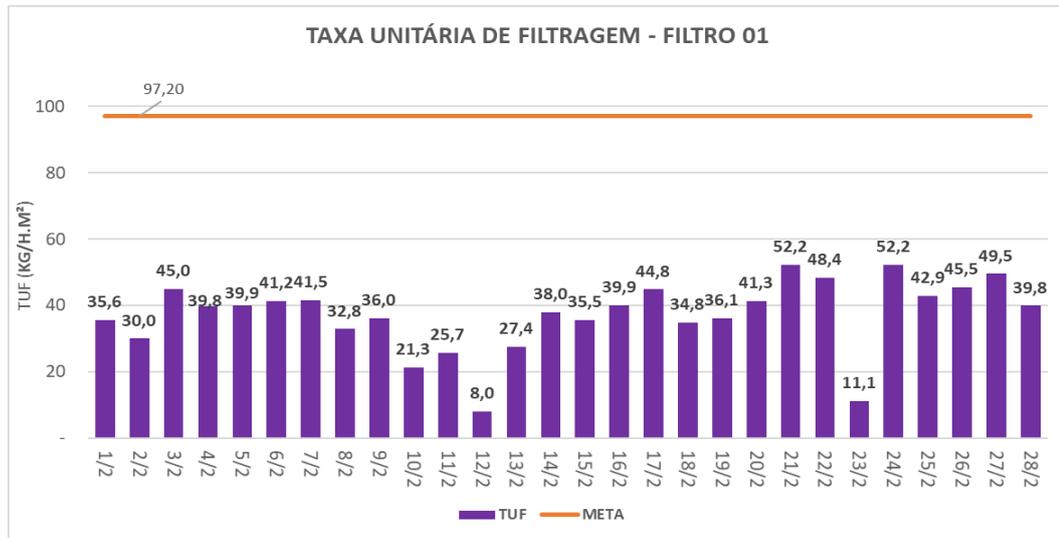
Capacidade da Planta Projeto	150 tph
Dias por ano operação	365 dias
Disponibilidade Mecânica	92%
Densidade da Suspensão	1,45 t/m <sup>3</sup>
% de sólidos na alimentação	40%
pH	6
Espessura de torta	50 mm
Umidade na torta	< 17%
Teor de Sólidos na Torta	83%
Tipo de filtro recomendado	OVERHEAD
Lona recomendada	Andritz 259
Pressão de alimentação	6 bar
Pressão de pressurização	12 – 15 bar
Tamanho do filtro indicado	2000 x 2000 mm
Quantidade de câmaras	128 por filtro prensa
Quantidade de filtros	2 (Operacionais)
Qualidade do Primeiro filtrado	Turva
Qualidade do Segundo filtrado	Incolor
Turbidez	< 100 NTU
Área de filtração	845 m <sup>2</sup> por filtro prensa
Taxa Unitária de Filtração	97,2 kg/h.m <sup>2</sup>
Placas do Filtro Prensa	Diafragma Misto

Fonte: Empresa fabricante de filtros prensa (2017).

### 6.3 DESEMPENHOS ATUAIS DOS FILTROS

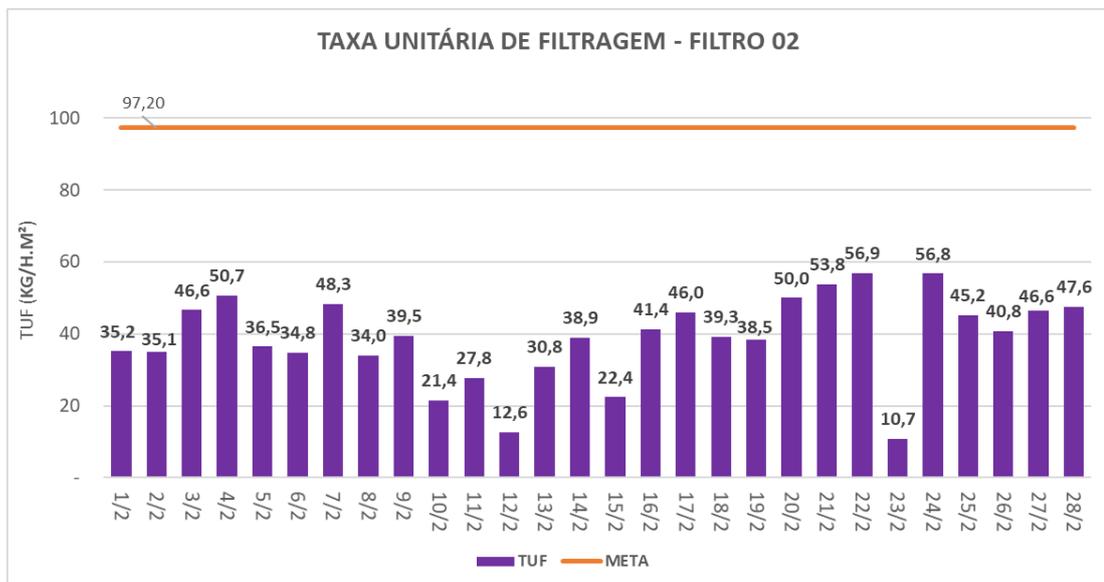
A Taxa unitária de filtração, medida por dia e desconsiderando as horas de paradas por manutenção, foi calculada dividindo a produção dos filtros pela área de filtração, pelos Gráficos 1 e 2, percebe-se que os filtros não estão conseguindo atingir o desempenho almejado pela fabricante de 97,2 kg/h.m<sup>2</sup>. A TUF mínima medida dentro do mês de fevereiro foi de 8 kg/h.m<sup>2</sup> no filtro 1 e a máxima foi de 56,9 kg/h.m<sup>2</sup> no filtro 02.

Gráfico 1: TUF - Filtro 01.



Fonte: Acervo do autor (2021).

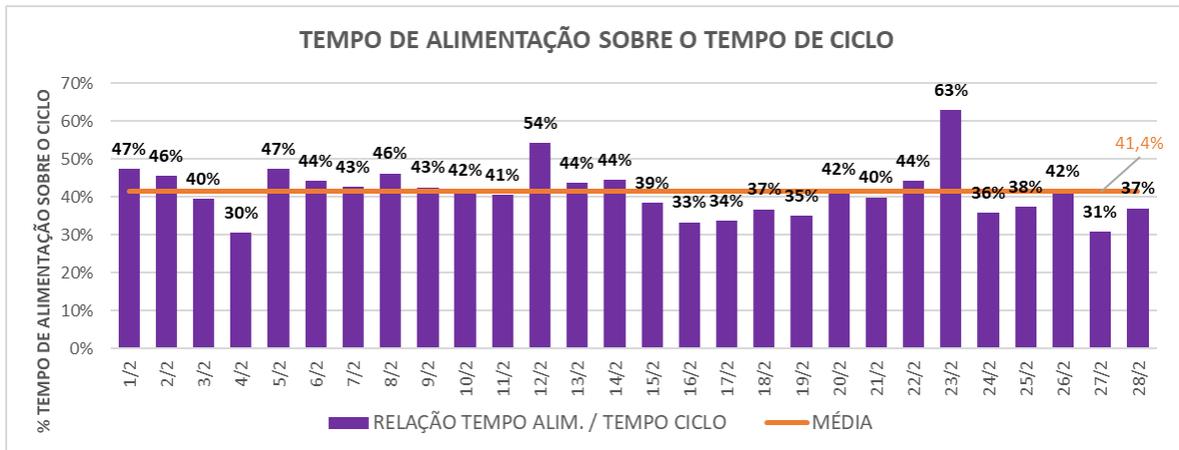
Gráfico 2: TUF - Filtro 02.



Fonte: Acervo do autor

Além disso, ao relacionar o tempo de alimentação médio por dia em relação ao tempo de ciclo da filtragem observa-se que em média, o tempo de alimentação é de 41% do tempo total do ciclo, conforme Gráfico 3.

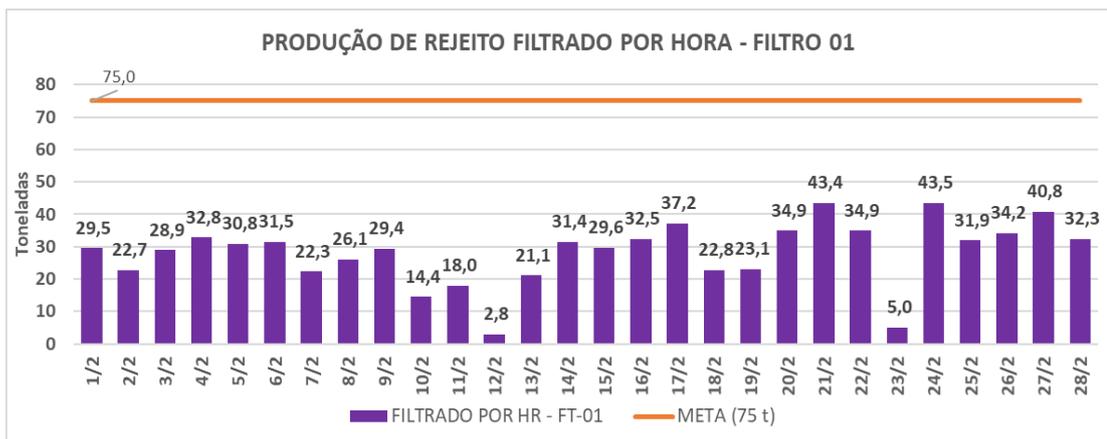
Gráfico 3: Tempo de alimentação em relação ao tempo médio de ciclo.



Fonte: Acervo do autor (2021)

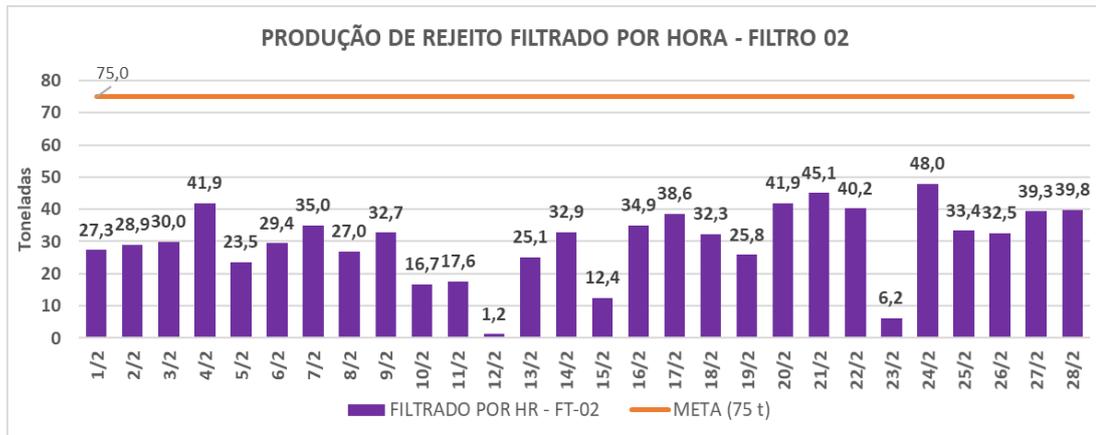
Os Gráficos 4 e o Gráfico 5 mostram as toneladas por hora de cada filtro. A meta de 75 t/h não foi alcançada em nenhum dos filtros durante o mês de fevereiro. O produtividade máxima foi atingida no dia 24/02 e filtrou-se aproximadamente 48 toneladas por hora, no filtro 02. A média para o filtro 01 foi de 28,1 tph e para o filtro 02 foi de 30 tph.

Gráfico 4: Produção média de rejeito por hora.



Fonte: Acervo do autor (2021).

Gráfico 5: Produção média de rejeito por hora.



Fonte: Acervo do autor (2021)

A Figura 40, retirada do *display* de controle dos filtros, mostra, através do gráfico, que a linha azul (peso bruto) alcança a casa das 30 toneladas facilmente. Entretanto, a partir desse ponto, a inclinação dessa curva reduz acentuadamente. Isso ocorre, pois, o filtro foi completamente preenchido, porém, é necessário manter a alimentação até o rejeito colmatar entre as placas e garantir que haverá espessura suficiente que possibilite a prensa do rejeito. Por isso, o enchimento dos filtros prensa, demandaram em média, no mês de fevereiro, aproximadamente, 30 minutos.

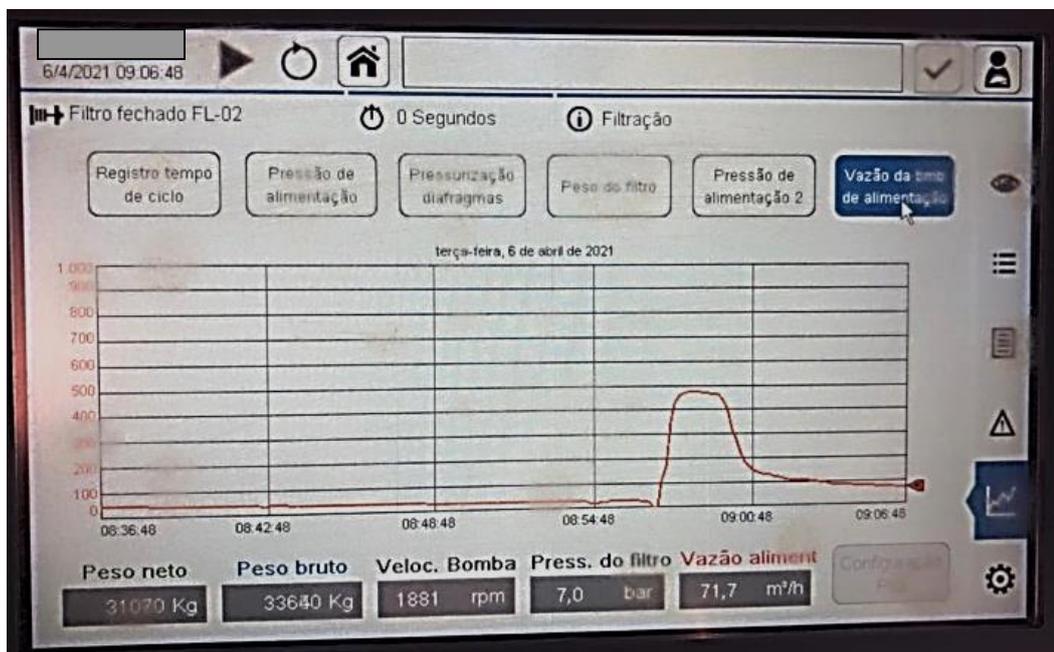
Figura 40: Gráfico mostra a curva de peso do filtro.



Fonte: Acervo do autor (2021).

A queda da inclinação da curva do peso, ilustrada na figura 40, é reforçada através da imagem apresentada na Figura 41, que mostra a curva de vazão de alimentação do filtro. Pode-se observar que o instante que a inclinação do peso reduz é o mesmo momento que a vazão começa a cair consideravelmente. Isso se dá, pois, os filtros atingem o seu volume total, mas com baixa densidade, então, a alimentação é mantida para que os Filtros atinjam o peso ideal de trabalho e se garanta uma porcentagem de sólidos adequada para que haja a formação de torta.

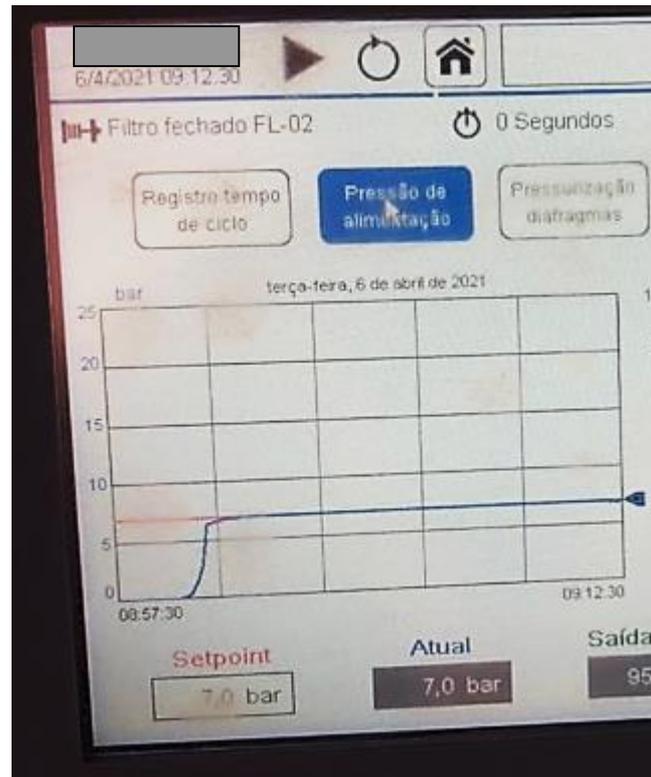
Figura 41: Curva de vazão na alimentação do filtro.



Fonte: Acervo do autor (2021).

A Figura 42 mostra que a pressão de alimentação, linha em azul, do filtro inicia em 7 bar se mantém constante até o completo enchimento do filtro.

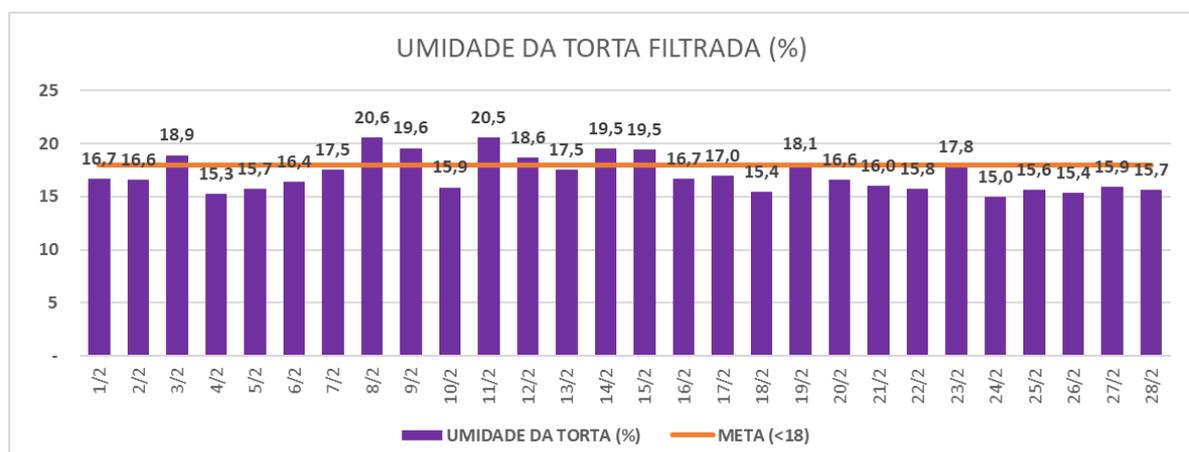
Figura 42: Curva de pressão na alimentação do filtro.



Fonte: Acervo do autor (2021).

A umidade da torta (Gráfico 6), fator primordial para o seu devido empilhamento, deve ser bem controlado. Em média, a maioria dos dias estão abaixo da meta de 18% de umidade, mas ela não está tão abaixo que permita reduzir o tempo de filtração para diminuir o tempo de filtração no ciclo. A umidade mínima atingida foi de 15% e a máxima de 20,6%,

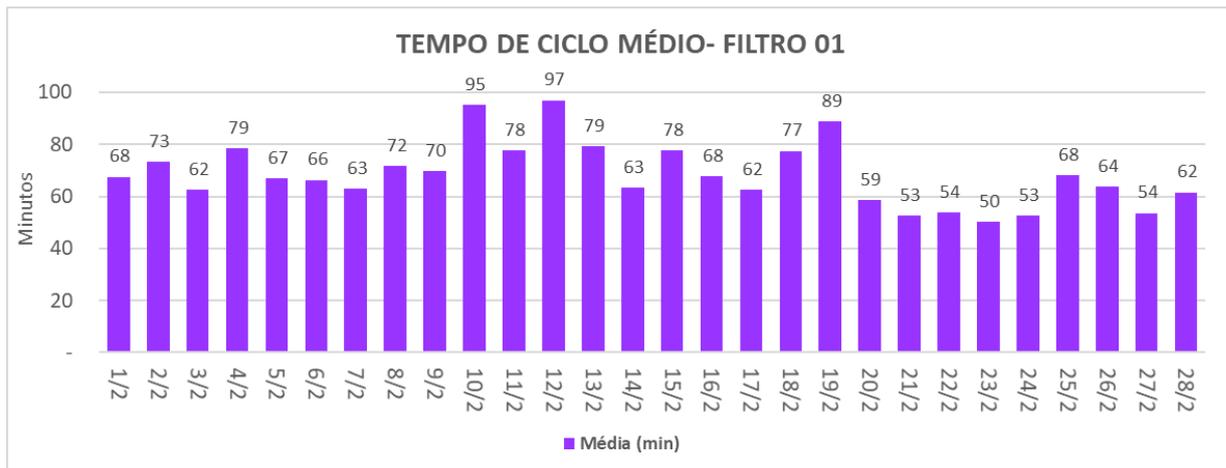
Gráfico 6: Umidade do rejeito filtrado.



Fonte: Acervo do autor (2021).

Os gráficos 7 e 8, abaixo, mostram o tempo médio dos ciclos, tanto para o filtro prensa 01 quanto para o 02. Para o filtro 01, a máxima foi de 97 minutos, no dia 12/02 e o valor mínimo foi de 50 minutos dia 23/02.

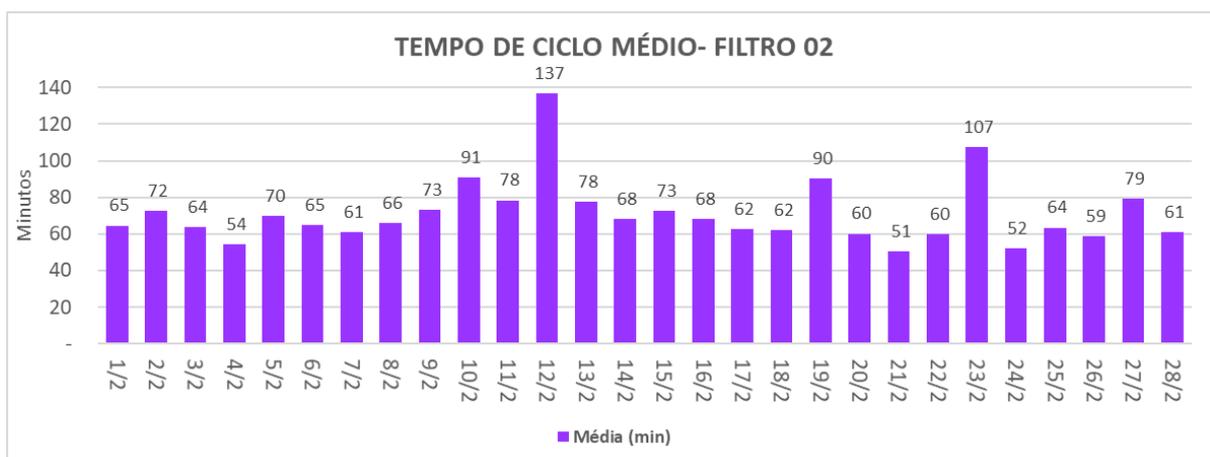
Gráfico 7 – Tempo médio de ciclo do filtro 01, em minutos.



Fonte: Acervo do autor (2021).

No filtro prensa 02, a média máxima foi dia 12/02 de 137 minutos e a menor foi de 51 minutos, dia 21/02.

Gráfico 8 - Tempo médio de ciclo do filtro 02, em minutos.



Fonte: Acervo do autor (2021).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A taxa unitária de filtração realizada atualmente na empresa está relativamente abaixo do dimensionado pela fabricante dos filtros. Tem-se em média, no mês de fevereiro, obtido 38 kg/h.m<sup>2</sup> contra 97,2 kg/h.m<sup>2</sup> planejado para cada filtro. O elevado tempo de alimentação nos ciclos não possibilita que se atinja esse desempenho por hora.

O filtro foi dimensionado pelo fabricante com capacidade de projeto de 150 t/h ou 75 t/h para cada filtro. Entretanto, o valor médio está na faixa das 32 t/h para cada filtro.

Além disso, a fabricante recomenda, de 12 a 15 bar de pressão nos diafragmas, e o praticado no momento tem como *set point* 7 bar, um *déficit* de, pelo menos, 5 bar de pressurização. Entretanto, os 7 bar de pressurização dos diafragmas já são suficientes para atingir a umidade esperada da torta, não havendo necessidade em aumentá-la.

A pressão de alimentação planejada, que é de 6 bar, é atendida e se mantém constante durante todo o ciclo, mesmo havendo uma redução considerável na vazão de alimentação dos filtros, após 30 toneladas alimentadas.

Os dois filtros não operam simultaneamente, e, é recorrente um equipamento estar em espera para ser alimentado, pois, o mesmo conjunto de bomba que alimenta o filtro 01, alimenta também, o filtro 02. O que impacta negativamente, sabendo que já houve tempos de espera superiores a 2000 segundos, como mostrado na figura 37.

É recorrente também, a espera para descarregar a torta, pois, novamente, os dois filtros não podem descarregar ao mesmo tempo, por risco de obstrução dos *shuts* e queda de material dos transportadores de correia. Esse tempo de espera, entre um filtro e o outro, contribui negativamente para a eficiência do sistema de filtração.

Dessa forma, para melhorar o desempenho do sistema de filtração, e, conseqüentemente possibilitar uma taxa maior de produção na usina de beneficiamento, recomenda-se, primeiramente, a melhoria do sistema de alimentação dos filtros. É importante a inserção de um tanque agitador anterior aos filtros. Além de possibilitar um melhor controle da densidade do rejeito a ser alimentado e não permitir o material compactar e sedimentar no fundo, o tanque agitador também possibilitará a utilização de polímeros agregadores que poderão influenciar positivamente nos resultados operacionais.

Pode-se, também, iniciar o bombeamento de rejeito com 6 bar, e no momento em que o filtro for completamente preenchido a pressão aumente de forma que acelere essa correção de densidade em seu interior. Isso poderá reduzir o tempo médio de alimentação, e contribuirá significativamente para o seu melhor desempenho.

Recomenda-se, também, individualizar a tubulação que alimenta os filtros, permitindo, assim, a alimentação simultânea dos equipamentos e se necessário, utilizar bombas de maior capacidade.

Outra alternativa é trocar todas as placas que não dilatam por placas com diafragmas. Ou seja, ao invés de um sistema misto iria-se ter todas as placas sendo pressurizadas internamente. Possivelmente, isso possibilitaria o funcionamento dos filtros com uma espessura de torta menor e conseqüentemente haveria a necessidade de um peso final menor, assim, reduzindo o tempo de alimentação

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado**: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Mineral - PPGEM) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2020.
- AMARANTE, S. C. **Filtragem de minério de ferro – comparação entre métodos de filtragem de laboratório**: teste de folha e de funil de buchner. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2002.
- ANDRIZ. **Filtros prensa Andritz**. Disponível em: <<https://www.andritz.com/separation-en/locations/andritz-pomerode/lonas-de-filtra%C3%A7%C3%A3o-e-filtros-prensa>> Acesso em: 10 de fev. de 2021
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Estatísticas da Mineração no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/mineracao-em-numeros>> Acesso em: 12 de fev. de 2021.
- BRASIL. LEI Nº12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
- CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. V2. São Paulo: Signus, 2006.
- CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. V3. São Paulo: Signus, 2006.
- CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: Structure, properties, reactions, occurrence and uses. Weinheim, VHC, 1996.
- DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019**. Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração. 2019. Disponível em:< [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/63799094/do1-2019-02-18-resolucao-n-4-de-15-de-fevereiro-de-2019-63799056)> Acesso em: 29 de jan. de 2021).
- GOMES, A. C. F. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração**. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2017.
- GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Disponível em: <<https://ibram.org.br/>> Acesso em: 18 de fev. de 2021.

KLEIN, C; DUTROW, B. **Manual de Ciências dos Minerais**. Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. – 23.ed – Porto Alegre: Bookman, 2012.

KLEIN, C. HURLBUT, C. S. J. **Manual of Mineralogy**. New York. John Wiley and Sons. 1999.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. **Tratamento de minérios**. 5ª ed.. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2010.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Editora E-paper, Rio de Janeiro, 2ª Edição, 152p. 2002.

MICHELON. **Filtro prensa**. 2019. Disponível em:  
<<https://www.michelon.ind.br/produtos/br/1/filtro-prensa>> Acesso em: 20 de fev. de 2020.

PRINCE, M.; WALSH, K. **Pocket nature rock and minerals**. Dorling Kindersley, 2005.

RUCHKYS, U. A.; CASTRO, P. T. A.; MIRANDA, M. P. S. **Mineração em Geossistemas Ferruginosos e Questões de Geoética: o Caso do Rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais – Brasil**. 2019. Disponível em:  
<<https://journals.openedition.org/confins/19973>> Acesso em: 15 de fev. de 2020.

WILLS, B. A.; MUNN, T. J. N. **Mineral processing technology**. 7ª ed. Seventh Edition, 2006.

WOLFF, A. P. **Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale**. Dissertação de Mestrado (Pós-graduação em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.