



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
DEPARTAMENTO DE MINAS CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS NA FILTRAÇÃO DE REJEITO FOSFÁTICO
DE TAPIRA

RAFAELA GOMES RODRIGUES

Orientadora: Prof^a. Dr^a MICHELLY DOS SANTOS OLIVEIRA

ARAXÁ
2016

RAFAELA GOMES RODRIGUES
AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS NA FILTRAÇÃO DE REJEITO
FOSFÁTICO DE TAPIRA

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Centro de Educação
tecnológica de Minas Gerais, Campus IV
Araxá, como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro de Minas.

Data de aprovação: 09/08/16

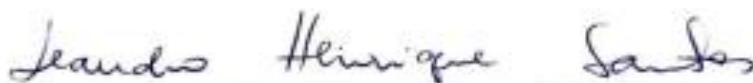
Banca Examinadora:



Presidente da Banca Examinadora - Orientador
Prof^ª. Dr^ª. Michelly dos Santos Oliveira – CEFET MG



Prof. Esp. Francisco de Castro Valente Neto- CEFET MG



Prof. Me. Leandro Henrique dos Santos - CEFET MG

Aos meus pais e minha irmã, que caminharam comigo
nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primordialmente a Deus, por me conceder sabedoria, paciência e perseverança durante os cinco anos em que preparei para chegar até aqui.

Aos meu pais, Vanderli Rodrigues da Silva e Aparecida Gomes Ferreira Rodrigues, por me criarem com tanto amor e me tornarem a pessoa que sou hoje. Especialmente a minha mãe, por me ensinar desde criança a importância da educação e por ter sido a minha calma nos momentos mais difíceis. A minha irmã, Paula, por ser minha professora, por me fazer acreditar no meu potencial.

À minha orientadora, Michelly dos Santos Oliveira, por todos os ensinamentos, apoio e motivação concedida para a realização deste trabalho. Especialmente ao professor Francisco de Castro Valente Neto, pela idealização do suporte utilizado nos testes deste trabalho, sem o qual, seria impossível a realização deste.

Ao técnico do Laboratório de Tratamento de Minérios, João Victor Silva Alves, e aos meus auxiliares, Maria Alice Melo e Gabriel Rizi, que colaboraram com a realização de toda a parte experimental deste trabalho.

A Remae e a Vale Fertilizantes, pela cortesia ao cederem, respectivamente, as amostras de meio porosos e minério, empregadas nos testes executados.

A todos aqueles, que, de alguma maneira, me ajudaram a alcançar a meta de me formar em Engenharia de Minas, e que, hoje, realmente celebram esta conquista.

O sucesso nasce do querer, da determinação e da persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. José de Alencar

RESUMO

O beneficiamento de minérios, em sua grande maioria, encerra-se com as operações de separação sólido-líquido, responsáveis pela recuperação da água empregada no processo. Dentre essas, inclui-se a filtração, a qual deve permitir a retenção dos sólidos e a passagem de líquido através de um meio poroso. O sucesso dessa etapa depende primordialmente da escolha desse elemento filtrante através de testes laboratoriais. Neste trabalho foram avaliados diferentes meios filtrantes empregando-se o rejeito fosfático de Tapira/MG, visando a escolha daquele que contribua para a maior eficiência de filtração. Pois, atualmente, a disposição de rejeitos do processamento mineral é um grande problema, devido ao impacto ambiental acarretado. O resultado final foi gerado comparando-se importantes parâmetros operacionais, como a umidade da torta, turbidez do filtrado e taxa unitária de filtração. Sob essas condições, o tecido 4400-T, fabricado pela Remae, foi eleito o melhor, com umidade da torta igual a 32,31%, filtrado clarificado com 0,00% de sólidos e elevada taxa unitária de filtração, 0,097 t/h/m².

Palavras-chave: Meio poroso; Filtração; Rejeito fosfático.

ABSTRACT

Ore beneficiation, for the most part, ends with the liquid-solid operations, responsible for the recovery of water used in the process. Among these, it includes the filtration, which should allow for the retention of the solids and liquid flow through a porous media. The success of this stage depends primarily on the choice of this element through laboratory tests. This study evaluated different filter media employing the phosphatic tailing from Tapira/MG, aiming to choose the one which contributes to more efficient filtration. Because, nowadays, the arrangement of mineral processing tailings is a major problem due to the environmental impact entailed. The final result was generated by comparing important operating parameters, such as the cake moisture, filtrate turbidity and filtering unit rate. Under these conditions, 4400-T fabric, manufactured by Remae, was chosen the best, with cake moisture of 32,31%, clarified filtered with 0,00% solids and high filtering unit rate, 0,097 t/h/m².

Key-words: Porous media; Filtration; Phospatic tailing.

ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 3.1- Mapa da localização de Tapira. Fonte: Reis, 2010..... | 4 |
| Figura 3.2- Chaminé ultramáfico-carbonatítica de Tapira. Fonte: Ferrari, 2000..... | 6 |
| Figura 3.3- Localização da Mina de Tapira na chaminé ultramáfico-carbonatítica. Fonte: Reis, 2010..... | 8 |
| Figura 3.4- Mina do CMT desenvolvida a céu aberto. Fonte: Reis, 2010. | 9 |
| Figura 3.5- Diagrama de blocos das etapas de beneficiamento do CMT. Fonte: Silva (2016). | 10 |
| Figura 3.6- Visão externa do filtro de discos. Fonte: Amarante, 2002. | 15 |
| Figura 3.7- Principais componentes de um filtro de discos. Fonte: Chaves, 2013. ... | 15 |
| Figura 3.8- Visão externa do filtro de tambor. Fonte: Amarante, 2002. | 16 |
| Figura 3.9- Filtro de mesa (plano) externamente. Fonte: Oliveira, 2015a. | 17 |
| Figura 3.10- Funcionamento de um filtro de mesa (plano). Fonte: Chaves, 2013..... | 17 |
| Figura 3.11- Filtro correia. Fonte: Amarante, 2002. | 18 |
| Figura 3.12- Principais pontos de operação do filtro de correia. Fonte: Guimarães, 2011..... | 19 |
| Figura 3.13- Filtro prensa horizontal (placas verticais). Fonte: Amarante, 2002. | 20 |
| Figura 3.14- Funcionamento do filtro prensa. Fonte: Oliveira, 2015a. | 20 |
| Figura 3.15- Filtro prensa vertical. Fonte: Amarante, 2002..... | 21 |
| Figura 3.16- Principais matérias primas e suas características. Fonte: Stauch, 2013. | 23 |
| Figura 3.17- Tessituras básicas. Fonte: Chaves (2013). | 24 |
| Figura 3.18- Fio monofilamentar. Fonte: Stauch, 2013..... | 25 |
| Figura 3.19- Fio multifilamentar. Fonte: Stauch, 2013. | 25 |
| Figura 3.20- Fio felpudo. Fonte: Stauch, 2013. | 26 |
| Figura 3.21- Fio monomultifilamentar. Fonte: Stauch, 2013. | 26 |
| Figura 3.22- Conjunto de ensaio de filtração. Fonte: Chaves, 2013. | 28 |
| Figura 3.23- Teste de folha com alimentação por cima. Fonte: Guimarães, 2011. ... | 28 |
| Figura 3.24- Etapa de formação da torta do teste de folha com alimentação por baixo. Fonte: França & Casqueira, 2007. | 29 |
| Figura 3.25- Etapa de secagem da torta do teste de folha com alimentação por baixo. Fonte: França & Casqueira, 2007. | 29 |
| Figura 3.26- Planilha de laboratório utilizada em práticas laboratoriais, no CETEM, para controle de parâmetros operacionais do teste de folha. Fonte: França & Casqueira, 2007..... | 30 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.27- Testes de filtração com concentrado fosfático. Fonte: Stauch, 2013. ... | 32 |
| Figura 3.28- Construção dos gráficos conforme método estabelecido por Dahlstrom e Silverblatt. Fonte: Guimarães, 2011. | 34 |
| Figura 4.1- Estufa utilizada para secagem da amostra. Fonte: Autoria própria. | 37 |
| Figura 4.2- Peneiramento manual com peneira de malha 6 mesh. Fonte: Autoria própria..... | 38 |
| Figura 4.3- Britador de mandíbulas de 1 eixo. Fonte: Autoria própria..... | 38 |
| Figura 4.4- Rolo de madeira utilizado para desagregação manual. Autoria própria.. | 39 |
| Figura 4.5- Pistilo e almofariz cerâmicos. Fonte: Autoria própria..... | 39 |
| Figura 4.6- a) Moinho de jarros; b) Moinho de bolas. Fonte: Autoria própria. | 40 |
| Figura 4.7- Peneiras circulares Granutest. Fonte: Autoria própria. | 40 |
| Figura 4.8- Interface entre partículas finas e grossas. Autoria própria..... | 41 |
| Figura 4.9- Célula de flotação. Fonte: Autoria própria. | 42 |
| Figura 4.10- Flotigam e amido de milho. Fonte: Autoria própria. | 43 |
| Figura 4.11- pHmêtro utilizado nos testes. Fonte: Autoria própria. | 44 |
| Figura 4.12- a) Concentrado; b) rejeito da flotação. Fonte: Autoria própria. | 45 |
| Figura 4.13- Peneiramento à úmido. Fonte: Autoria própria. | 46 |
| Figura 4.14- Amostra (prato) para picnometria. Fonte: Autoria própria..... | 47 |
| Figura 4.15- Picnometria: a) picnômetro vazio; b) picnômetro com minério; c) picnômetro com minério e água; d) picnômetro com água. Fonte: Autoria própria. .. | 48 |
| Figura 4.16- Amostras de meio filtrante cedidos pela Remae. Fonte: Autoria própria. | 48 |
| Figura 4.17- Conjunto típico de testes de folha. Fonte: Autoria própria. | 50 |
| Figura 4.18- Papel filtro e tecido filtrante. Fonte: Autoria própria. | 50 |
| Figura 4.19- Suporte para o meio filtrante acoplado ao kitassato. Fonte: Autoria própria..... | 51 |
| Figura 4.20- Principais itens utilizados para os testes de filtração. Fonte: Autoria própria..... | 52 |
| Figura 4.21- Polpa sob agitação manual. Fonte: Autoria própria. | 53 |
| Figura 4.22- Balanças. Fonte Autoria própria. | 54 |
| Figura 4.23- a) Anel de para fixação do tecido ao tubo; b) Conjunto montado. Fonte: Autoria própria. | 55 |
| Figura 4.24- Papel filtro antes e depois do uso. Fonte: Autoria própria. | 55 |
| Figura 4.25- Água e sólidos para as três diferentes porcentagens de sólidos. Fonte: Autoria própria. | 58 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.1- Redução de tamanho das partículas com a moagem. Fonte: Autoria própria..... | 59 |
| Figura 5.2- Curva granulométrica. Fonte: Autoria própria..... | 61 |
| Figura 5.3- Tecido 4390-T. Fonte: Autoria própria..... | 62 |
| Figura 5.4- Filtrado turvo obtido com o tecido 4390-T. Fonte: Autoria própria. | 63 |
| Figura 5.5- Filtrado do teste 3 com o tecido 4230-T. Fonte: Autoria própria. | 64 |
| Figura 5.6- Tortas secas para o tecido 4230-T. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3. Fonte: Autoria própria. | 65 |
| Figura 5.7- Filtrado obtido através do teste 2. Fonte: Autoria própria. | 65 |
| Figura 5.8- Tortas secas para o tecido 4384-T. Fonte: Autoria própria..... | 66 |
| Figura 5.9- a) Aspecto do filtrado teste 3; b) Volume de 98 ml filtrado. Fonte: Autoria própria..... | 66 |
| Figura 5.10- Tortas secas para o tecido 4400-T: a)Teste 1; b) Teste2 e c)Teste 3. Fonte: Autoria própria. | 67 |
| Figura 5.11- a) Aspecto do filtrado teste para o tecido 4520-T 2; b) Volume de 195 ml. Fonte: Autoria própria | 68 |
| Figura 5.12- Tortas úmidas para o tecido 4520-T. a)Teste 1; b) Teste 2 e c) Teste 3. Fonte: Autoria própria. | 68 |
| Figura 5.13- Aspecto dos tecidos antes e após os usos: a) 4230; b) 4384; c) 4400 e d) 4520. Fonte: Autoria própria..... | 68 |
| Figura 5.14- a) Filtrado e b) Torta obtida com papel filtro. Fonte: Autoria própria. | 69 |
| Figura 5.15- Tortas formadas com as diferentes porcentagens de sólidos: a) 20%; b) 40% e c) 60%. Fonte: Autoria própria. | 71 |
| Figura 5.16- Filtrados coletados com as diferentes porcentagens de sólidos: a) 20%; b) 40% e c) 60%. Fonte: Autoria própria. | 72 |
| Figura 5.17- Tortas geradas com os quatro tecidos. Fonte: Autoria própria. | 74 |
| Figura 5.18- Filtrados coletados para os quatro tecidos. Fonte: Autoria própria. | 75 |
| Figura 5.19- Detalhe da descostura do tecido 4520-T após uso. Fonte: Autoria própria. | 76 |
| Figura 5.20- Tecidos 4520-T e 4400-T após os usos. Autoria própria. | 76 |
| Figura 5.21- Tortas formadas com as três diferentes porcentagens de sólidos. Fonte: Autoria própria. | 78 |
| Figura 5.22- Filtrados coletados com as três diferentes porcentagens de sólidos. Fonte: Autoria própria. | 78 |

TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1- Mecanismos de filtração e os principais fornecedores. Fonte: Guimarães, 2011..... | 14 |
| Tabela 3.2- Em ordem decrescente de preferência: efeito da trama sobre a filtração. Fonte: Chaves, 2013..... | 24 |
| Tabela 3.3- Em ordem decrescente de preferência: efeito das características do fio sobre o desempenho da tela. Fonte: Chaves, 2013. | 26 |
| Tabela 4.1- Parâmetros operacionais adotados para a execução da flotação. Fonte: Silva, 2015..... | 43 |
| Tabela 4.2- Especificações técnicas das amostras de meios filtrantes. | 49 |
| Tabela 4.3- Condições para realização dos testes de filtração..... | 58 |
| Tabela 5.1- Análise granulométrica do rejeito. | 60 |
| Tabela 5.2- Resultados dos testes de picnometria..... | 62 |
| Tabela 5.3- Testes preliminares de filtração..... | 63 |
| Tabela 5.4- Parâmetros operacionais quantificados com papel filtro..... | 69 |
| Tabela 5.5- Resultados dos testes com papel de filtro. | 70 |
| Tabela 5.6- Resultados dos testes de folha para os tecidos..... | 73 |
| Tabela 5.7- Resultados dos testes para o tecido 4400-T. | 77 |
| Tabela A 1- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4230-T..... | 86 |
| Tabela A 2- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4384T..... | 86 |
| Tabela A 3- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4400-T..... | 87 |
| Tabela A 4- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4520T..... | 87 |
| Tabela A 1- Parâmetros operacionais quantificados com papel filtro..... | 88 |
| Tabela B 1- Variação das porcentagens de sólidos para o papel filtro..... | 89 |
| Tabela C 1- Avaliação de meios porosos..... | 90 |
| Tabela D 1- Varredura das porcentagens de sólidos para o 4400-T..... | 91 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 3 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 COMPLEXO ALCALINO CARBONATÍTICO DE TAPIRA: LOCALIZAÇÃO, CONTEXTO GEOLÓGICO E MINERALÓGICO..... | 4 |
| 3.2 DA ROCHA FOSFÁTICA AO FERTILIZANTE: O BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO E A PRODUÇÃO | 7 |
| 3.3 A FILTRAÇÃO COMO UMA OPERAÇÃO UNITÁRIA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS..... | 11 |
| 3.4 OS EQUIPAMENTOS DE FILTRAÇÃO..... | 13 |
| 3.5 MEIOS FILTRANTES..... | 21 |
| 3.6 TESTES LABORATORIAIS..... | 27 |
| 4. METODOLOGIA | 36 |
| 4.1 OBTENÇÃO DA AMOSTRA GLOBAL..... | 36 |
| 4.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA FINAL | 36 |
| 4.2.1 Secagem e homogeneização | 36 |
| 4.2.2 Operações de cominuição | 37 |
| 4.2.3 Deslamagem | 41 |
| 4.2.4 Concentração via flotação | 42 |
| 4.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA FINAL | 46 |
| 4.3.1 Análise granulométrica | 46 |
| 4.3.2 Determinação da massa específica dos sólidos | 47 |
| 4.4 TESTES PRELIMINARES DE FILTRAÇÃO | 48 |
| 4.4.1 Parâmetros de análise dos tecidos..... | 55 |
| 4.4.2 Determinação da porcentagem de sólidos ideal para a filtração .. | 57 |
| 4.5 TESTES DE FILTRAÇÃO | 58 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 59 |
| 5.1 AMOSTRA GLOBAL DE MINÉRIO FOSFÁTICO | 59 |
| 5.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA FINAL | 59 |
| 5.2.1 Operações de cominuição | 59 |
| 5.2.2 Deslamagem | 60 |
| 5.2.3 Flotação | 60 |
| 5.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA | 60 |
| 5.3.1 Análise granulométrica | 60 |
| 5.3.2 Determinação da massa específica dos sólidos | 61 |
| 5.4 TESTES PRELIMINARES DE FILTRAÇÃO | 62 |
| 5.4.1 Definição da porcentagem de sólidos ideal para a filtração | 70 |
| 5.5 TESTES DE FILTRAÇÃO: AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS | 72 |
| 5.6 TESTES DE FILTRAÇÃO: AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS PARA O MEIO POROSO 4400-T | 77 |
| 6. CONCLUSÃO | 80 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 81 |

| | |
|--|-----------|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 82 |
| ANEXO A - RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES | 86 |
| ANEXO B-VARIAÇÃO DAS PORCENTAGENS DE SÓLIDOS | 89 |
| ANEXO C-AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS | 90 |
| ANEXO D-VARREDURA DAS PORCENTAGENS DE SÓLIDOS PARA O TECIDO 4400-T..... | 91 |

1. INTRODUÇÃO

O tratamento de minérios normalmente é realizado por meio de operações que requerem o emprego de grandes quantidades de água, a qual, deve ser recuperada e, se possível, reempregada ao processo. Desta maneira, gera-se economia, além de contribuir para o não desperdício de um recurso cada vez mais escasso. Esta função é atribuída às operações de separação sólido-líquido, constituídas principalmente pelo espessamento seguido da filtração (Amarante, 2002).

Oliveira *et al.* (2004) relatam que, a filtração, responsável pela retenção de sólidos e passagem de líquido através de um meio poroso, tem sido cada vez mais alvo de grandes estudos, pois é através desta que a água contida nos rejeitos é retirada. Estes produtos da concentração de minérios oferecem uma série de problemas ambientais. São comumente dispostos sob a forma de barragens, as quais são suscetíveis a rompimentos quando há uma grande quantidade de líquido percolando em suas estruturas, além de demandarem grandes áreas, contaminam os recursos hídricos e possuem elevado custo de construção, complementa Vaz *et al.* (2014).

Guimarães (2011) apresentou em seus estudos, que as principais tecnologias de filtração diferem entre si, pelo mecanismo de sucção do líquido a ser filtrado, sendo as existentes atualmente: a vácuo, sob pressão, capilar e hiperbárica (pressão e vácuo juntos). Através de ensaios de bancadas, seus resultados mostraram que os rejeitos de flotação podem ser filtrados aplicando as tecnologias mais usuais de filtração a vácuo: filtro de disco convencional e filtro horizontal de correia. Tais ensaios de bancada, conhecidos como testes de folha destinam-se ao dimensionamento de filtros industriais, bem como a avaliação dos meios porosos empregados na operação.

O elemento filtrante, geralmente fabricado por indústrias de tecidos técnicos que utilizam algodão, lã, linho, juta, nylon, seda, fibra de vidro, carbono poroso, metais, naylon e outros produtos sintéticos em sua composição, possui funções primordiais

na filtração. Dentre elas, a capacidade de reter sólidos sem cegamento dos poros que permitem a passagem do líquido, além de ser mecanicamente forte e resistente à corrosão (Vaz et. al., 2014).

A escolha do meio filtrante trata-se então de um dos aspectos mais importante para que se tenha uma filtração eficiente. E justamente neste contexto que se insere o propósito fundamental deste trabalho. Diferentes elementos foram avaliados quanto à umidade final do produto gerado, clarificação do filtrado, dentre outros parâmetros que fundamentalmente levam à escolha do meio poroso que melhor se adeque ao cenário trabalhado.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar as amostras de meios porosos cedidos pela fabricante Remae em testes de filtração de polpa de rejeito proveniente da concentração de minério fosfático fornecido pela Vale Fertilizantes S/A, Complexo de Mineração de Tapira-MG (CMT).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar testes preliminares de filtração com os meios porosos visando-se obter conhecimento geral destes, e selecionar aqueles a serem empregados nos testes de filtração;
- Realizar testes de filtração utilizando-se papel filtro visando determinar a porcentagem de sólidos que forneça as melhores condições para avaliação dos meios porosos;
- Realizar testes de filtração com os meios porosos selecionados nos testes preliminares, empregando-se a porcentagem de sólidos anteriormente escolhida a fim de se definir o tecido que fornece as melhores condições de filtração quanto à umidade da torta gerada, turbidez do filtrado e taxa unitária de filtração;
- Realizar testes finais de filtração utilizando-se o meio poroso escolhido com as porcentagens de sólidos utilizadas preliminarmente, a fim de se definir a melhor condição de utilização deste elemento;
- Avaliar a viabilidade da realização de testes laboratoriais empregando-se o patamar operacional, porcentagem de sólidos na polpa, idêntico ao patamar industrial (acima de 60% de sólidos).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPLEXO ALCALINO CARBONATÍTICO DE TAPIRA: LOCALIZAÇÃO, CONTEXTO GEOLÓGICO E MINERALÓGICO

O município de Tapira, localizado na região do Alto Paranaíba no estado de Minas Gerais, possui como principal item de sua economia o setor mineral representado pela extração de fosfato. Operado atualmente pela empresa Vale Fertilizantes, o complexo de mineração de Tapira – CMT situa-se a cerca de 400 km da capital mineira Belo Horizonte, e 35 km a SE de Araxá. Através do mapa representado na Figura 3.1, visualiza-se a localização da região, bem como a ligação rodoviária com outras grandes cidades mineiras, Uberaba, Uberlândia, Patrocínio e Patos de Minas, Catalão no estado de Goiás e a capital nacional, Brasília (Pinto *et al.*, 2011; Reis, 2010).

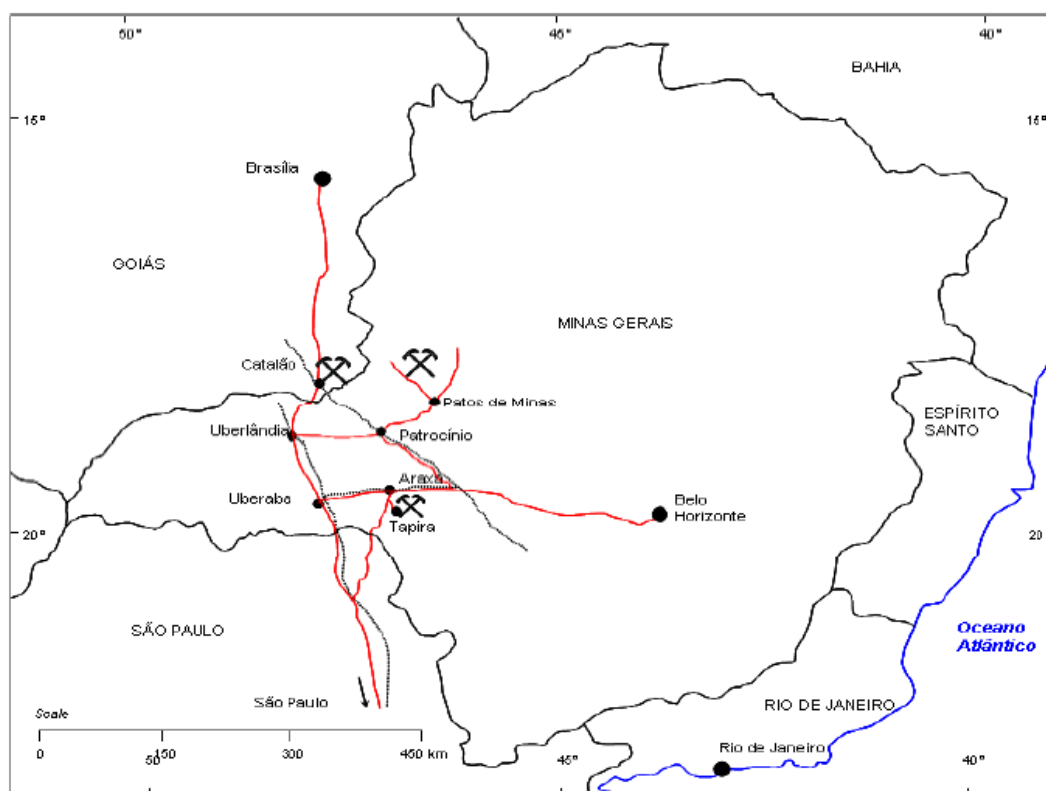


Figura 3.1- Mapa da localização de Tapira. Fonte: Reis, 2010

A ocorrência de materiais fosfáticos no Brasil está relacionada a seis ambientes geológicos distintos segundo Loureiro *et al.* (2008), magmáticos; ortomagmáticos; metassedimentares; sedimentogênicos; lateríticos e orgânicos, sendo o primeiro, responsável pela mineralização de Tapira. Ambientes como esses, complexos alcalino-carbonatíticos mesozóicos, formam-se por enriquecimento supergênico de carbonatitos apatíticos e/ ou piroxenitos apatíticos, resultando em minérios com elevados teores. Nesses processos, complementa Silva (2016), os mecanismos de subtração predominam e, por meio deles, dá-se a lixiviação dos elementos de maior mobilidade, tendo como resultado uma acumulação residual de minerais não lixiviados, concentrando além de fosfato, o titânio e o nióbio.

Localmente, o complexo alcalino-carbonatítico de Tapira insere-se na Província do Alto Paranaíba, que também compreende as ocorrências de Catalão I e Catalão II em Goiás e Serra Negra, Salitre I e Salitre II em Minas Gerais. Trata-se de um corpo intrusivo elíptico, com dimensões aproximadas de 6,5 por 5,5 km, nos eixos NS e EW, respectivamente (Figura 3.2), constituindo assim uma chaminé ultramáfico-carbonatítica. Sua formação relaciona-se a um evento magmático do final do período jurássico ao terciário inferior e que se iniciou com os derrames basálticos da bacia do Paraná. É ainda encaixado em quartzitos do Grupo Canastra, constituído também por um conjunto de metassedimentos detríticos, em grande parte carbonosos e com contatos tectônicos com as demais unidades geológicas da região, por meio de zonas de cisalhamento (Cruz, 1973).

Em sua dissertação de mestrado, Reis (2010) detalha ainda mais a geologia do complexo. Este é resultado da amalgamação de, pelo menos, cinco episódios de intrusões carbonatíticas dominadas por rochas ultrabásicas (80%), em grande parte representadas por piroxenitos/bebedouritos, dunitos/foscoritos e peridotitos, rochas intermediárias entre os piroxenitos e os dunitos. Na porção centro oeste da chaminé, tem-se também a presença de glimeritos, que são rochas ultramáficas compostas essencialmente por micas e caracterizadas pela predominância da flogopita. As rochas ultrabásicas apresentam como minerais principais, piroxênio ou olivina, e como

minerais acessórios, magnetita, apatita, perovskita, melanita, biotita, flogopita, calcita, pirita e ilmenita.

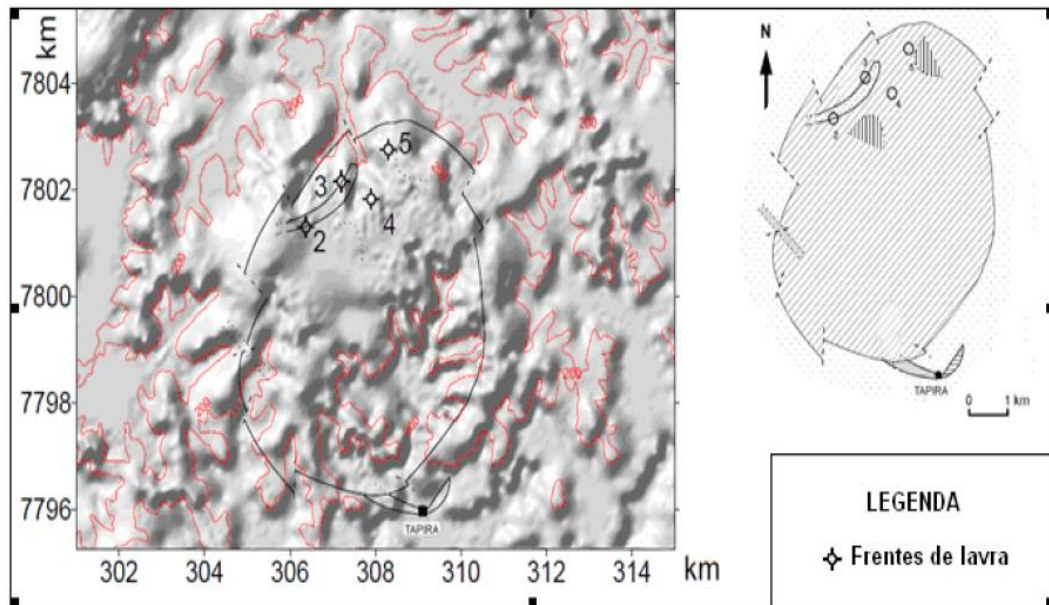


Figura 3.2- Chaminé ultramáfica-carbonatítica de Tapira. Fonte: Ferrari, 2000.

Ainda segundo a mesma obra, o minério de fosfato ocorre sob a forma de uma camada ou nível sobre a rocha matriz, encontrando-se sempre sotoposto ao titânio, sendo o contato entre esses geralmente caracterizados por uma faixa de transição entre ambos. Encontram-se na região, traquitos e lamprófiros sob a forma de diques, além de bolsões de silexitos, nos níveis de fosfato e, em geral, abaixo do minério de titânio e sob o nível freático. E também, corpos de carbonatito, em forma de veios ou massas contínuas que ocorrem nas porções centrais do complexo, correspondendo ao protominério de nióbio. Raros afloramentos (quase sempre envolvendo rochas em avançado estágio de decomposição) ocorrem ao longo da área de cerca de 35 km² da chaminé, devido à presença local de uma espessa cobertura ou manto laterítico (com profundidade média de 30 m), essencialmente argiloso, que mascara completamente o substrato.

A apatita, de fórmula química geral $M_{10}(YO_4)_6(X_2)_5$, constitui o único mineral-minério de fósforo (P) de Tapira. A fluorapatita $[Ca_5(PO_4,CO_3,OH)_3.(F,OH)]$, hidroxiapatita $[Ca_5(PO_4)_3.(OH,F)]$ e, mais raramente, a cloroapatita

[Ca₅(PO₄)₃(Cl,OH)] tratam-se das variedades mais comuns encontradas em carbonatitos. Nesses, o cálcio (Ca²⁺), pode ser substituído, em parte, por íons positivos tais como: ETR (elementos de terras-raras), como o cério, ou até mesmo por urânio e chumbo. O radical fosfato (PO₄), pode também ser substituído, por pequenas quantidades de óxido de urânio (UO₄), arsênio (AsO₄), ou silício (SiO₄) (Loureiro *et al.* 2008).

A apatita ocorre como mineral primário na rocha matriz, de acordo com Silva (2016), formando níveis de enriquecimento disseminados ou concordantes com a rocha encaixante (porcentagens entre 5% a 10% em volume). Por ser fracamente solúvel sob condições ácidas e oxidantes, acima do nível freático, ocorre a dissolução da mesma e a hidrólise ácida dos silicatos. A partir do lençol freático e abaixo deste, tende a ocorrer a concentração de apatita, facilitada com a neutralização do pH das águas freáticas, o que inibe seu processo de dissolução. Bezerra & Brod (2011) destacam ainda que, a concentração econômica de mineral apatítico deve-se ao intemperismo tropical predominante na região, que também favorece a ocorrência do nióbio, titânio, terras raras, vermiculita e barita, que ainda não são aproveitados comercialmente.

3.2 DA ROCHA FOSFÁTICA AO FERTILIZANTE: O BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO E A PRODUÇÃO

O fósforo, elemento químico simbolizado pela letra “P” nas tabelas periódicas, existe com abundância na natureza, sendo encontrado em minérios que se formam em ambientes geológicos variados. Normalmente, eles contêm mais de um tipo de fosfato (grupo de minerais enriquecidos com fósforo), entretanto, os mais recorrentes são os fosfatos de cálcio do grupo da apatita, com principal utilização na agricultura, como fertilizante. Para que se torne adequado para a sua aplicação final, o fósforo proveniente das rochas fosfatadas segue várias rotas de tratamento em função da distribuição geográfica das jazidas, da tipologia do minério, das substâncias fabricadas, das características do parque industrial e da recuperação de subprodutos

com valor comercial a que se associa e da redução/eliminação de agentes causadores de impactos ambientais (Loureiro *et al.* 2008).

A mina de Tapira, considerada a maior produtora de concentrados fosfáticos do Brasil, localiza-se na borda noroeste da chaminé carbonatítica, ocupando uma área de mais de 78.000.000 m² (Figura 3.3). Suas operações contemplam atividades de decapeamento para retirada de estéril e titânio, lavra a céu aberto (Figura 3.4), beneficiamento de minério por flotação, operações de mineroduto e instalações de suporte (Silva *et al.* 2004).

Concluída a lavra, que contempla as operações de perfuração, carregamento e desmonte, todo minério é transportado para a etapa de fragmentação, onde é submetido à britagem primária e secundária. Com a granulometria devidamente reduzida, o material é levado então ao pátio de homogeneização. Posterior a esse, inicia-se efetivamente o beneficiamento do minério fosfático. Entretanto, o mesmo é dividido em dois processos, a partir do qual são gerados dois produtos distintos: o concentrado fosfático convencional e o ultrafino, ambos com teor de 35% de P₂O₅, entretanto, o primeiro é obtido através do minério com teor de P₂O₅ em torno de 8,0% e o segundo, a partir das lamas do processo. O processo aplicado a cada um será descrito conforme Reis (2010) *apud* Silva (2016).

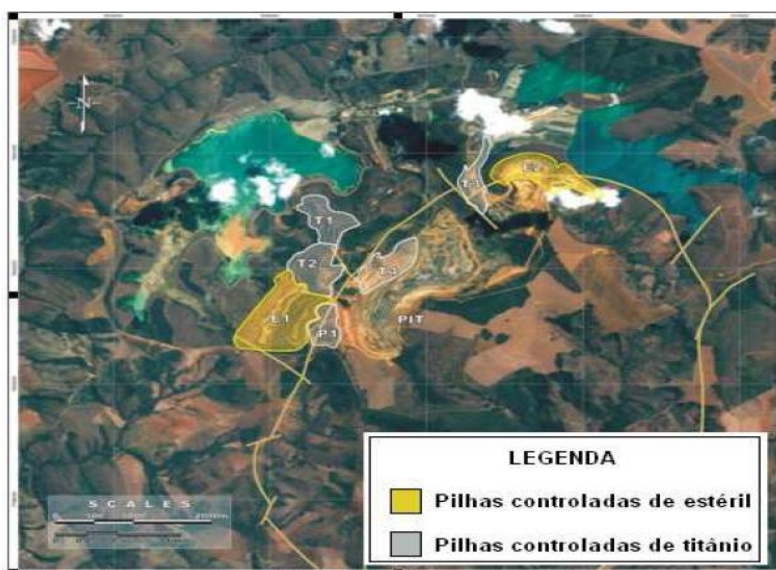


Figura 3.3- Localização da Mina de Tapira na chaminé ultramáfica-carbonatítica. Fonte: Reis, 2010.



Figura 3.4- Mina do CMT desenvolvida a céu aberto. Fonte: Reis, 2010.

O processo do qual origina-se o fosfato convencional é subdividido em dois circuitos, granulado e friável, ambos contemplando: moagem em moinhos de barras, seguida de uma fase de separação magnética de baixa intensidade. Dessa, o produto não magnético é classificado e submetido a uma nova moagem, agora em moinho de bolas, possibilitando a correta adequação granulométrica do material para as fases seguintes de deslamagem, condicionamento e flotação (realizada em várias fases). Ambos os produtos de cada circuito constituem o concentrado fosfático convencional, o qual necessita remoagem em moinho de bolas e espessamento, para adequação ao transporte. Bombeado via mineroduto, esse atinge o Complexo Industrial de Uberaba (CIU), onde são utilizados para a produção de ácidos (especialmente ácido fosfórico) e fertilizantes.

Já o concentrado fosfático ultrafino, provém do processo denominado circuito ultrafinos. Neste, o material proveniente de algumas etapas de deslamagem citadas no circuito anterior, é submetido à microdeslamagem, condicionamento e bombeamento para a flotação de ultrafinos. O concentrado é espessado, filtrado e

estocado. Por fim, é expedido por meio de transporte rodoviário até o Complexo Industrial de Uberaba, onde é consumido como matéria-prima básica na produção de fertilizantes de baixa concentração.

A Figura 3.5 apresenta o diagrama de blocos resumido do beneficiamento do minério fosfático em Tapira. Em síntese, o seu objetivo principal é a separação do mineral de interesse (apatita) de suas impurezas (minerais de ganga) e materiais não fosfatados. Atualmente, somente 14,7% da alimentação da usina torna-se um dos produtos citados, sendo o restante considerado perdas no processo, divididas em 33,7% para lamas naturais e geradas, 9,3% para os rejeitos da separação magnética e 42,3% para os rejeitos da flotação.

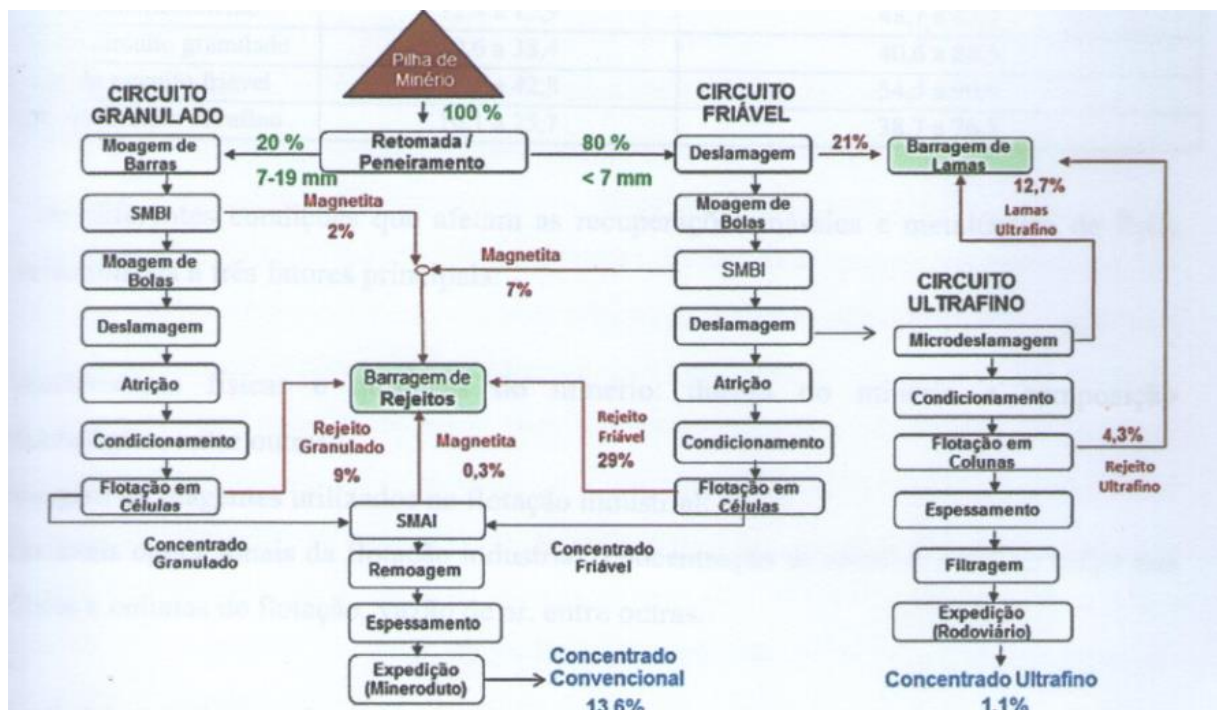


Figura 3.5- Diagrama de blocos das etapas de beneficiamento do CMT. Fonte: Silva (2016).

Além dos concentrados citados, são gerados também rejeito magnético, de flotação e lamas. Alguns dados importantes, segundo a versão digital da revista MINÉRIOS & MINERALES (2012), informam que no ano de 2012, foram lavradas e processadas no britador (ROM - *Run of Mine*) mais de 14.474.201 toneladas, e a produção final da mina situou-se em torno de 2.000.000 toneladas, no mesmo ano. A

revista destaca ainda que as reservas provadas estão em torno de 243.931.219 toneladas de minério fosfático com um teor de 7,29% de P_2O_5 .

3.3 A FILTRAÇÃO COMO UMA OPERAÇÃO UNITÁRIA DO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Os minérios geralmente requerem processamento a úmido, sendo, então, necessário que se recupere a maior parte da água utilizada durante a condução do processo industrial. Como etapa final desse, insere-se a separação sólido-líquido, um conjunto de operações destinadas à recuperação/recirculação de água, ajuste de porcentagem de sólidos na polpa, escoamento final de concentrados e preparação de rejeito para o descarte. Chaves (2013) designa esta etapa como desaguamento:

“O objetivo das operações de desaguamento é reduzir a umidade de produtos de outras operações unitárias de Tratamento de Minérios, para a sua utilização final (venda) ou para atingir as condições exigidas pelas operações subsequentes... Essas operações são também muito utilizadas na indústria química e na metalurgia extrativa, nas quais, em geral, o produto de interesse é a fase líquida, ao contrário da indústria mineral, na qual o interesse está sempre centrado na fase sólida.”

A primeira avaliação quantitativa do fenômeno da filtração foi dada pela lei de Darcy, que estudou através de uma série de equações o fluxo de líquido através de um meio poroso. Porém Chaves (2013), atenta que nenhuma delas é suficientemente conclusiva nem fornece uma descrição completa do processo. Portanto, não cabe a um trabalho como esse, que estuda especificamente a filtração mineral, aprofundar em demonstrações matemáticas como as citadas.

A mesma literatura classifica os métodos de desaguamento de duas maneiras:

1. Pelo movimento relativo das fases: o sólido move-se por meio do líquido em repouso (decantação), que tem como melhor exemplo o espessamento; ou o líquido é que se movimenta através de um sólido estacionário, o que acontece na filtração;

2. Pelo uso de forças auxiliares à separação: centrífugas, gravitacionais, de pressão ou vácuo.

A filtragem/filtração, operação unitária do tratamento de minérios enfocada neste estudo, pode ser definida como a separação de sólidos contidos em uma polpa na qual a fase líquida, denominada filtrado, é forçada a passar através de um meio poroso, enquanto a fase sólida, chamada de torta, bolo ou *cake*, forma uma camada sobre a superfície do meio poroso (França & Massarani, 2004). Simplesmente, trata-se da passagem da polpa através de um meio filtrante para o fluxo do líquido e a consequente retenção dos sólidos.

Normalmente, apenas a pressão exercida pelo próprio líquido (hidrostática) sobre o meio filtrante é suficiente para que a filtração ocorra. Neste caso, diz-se que a operação foi feita por gravidade. Quando há a utilização de alguma força externa costuma-se distinguir (Valadão, 2012):

- Filtração a vácuo: cria-se uma pressão negativa (subatmosférica) debaixo do meio filtrante. Trata-se do método mais utilizado na indústria mineral;
- Filtração sob pressão: aplica-se uma pressão positiva do lado da torta, sendo comum no desaguamento de argilas e de cimentos;
- Filtração hiperbárica: combinação de vácuo e pressão;
- Filtração centrífuga: utiliza-se força centrífuga para impelir a passagem do líquido;
- Filtração capilar: aproveita-se a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento.

A estabilidade da polpa é um parâmetro de fundamental importância para o desempenho da filtração. Os sólidos devem estar devidamente aglomerados para que a produtividade da filtração seja mantida em patamares aceitáveis. Por esse e outros motivos, muitas vezes, a operação de filtração requer o uso de auxiliares. Esses podem ser definidos como reagentes que aumentam a velocidade de filtração, por

funcionarem como floculantes, aumentando a permeabilidade da torta, ou por acarretarem diminuição da tensão superficial da água. Dentre os reagentes mais comuns, encontram-se os tensoativos, os floculantes, os coagulantes e os surfactantes (Turrer *et al.* 2010).

Dias *et al.* (2004) considera que a utilização de reagentes auxiliares na filtração é de grande importância para a indústria mineral, visto que, quando se trata da filtração de finos, esses reagentes tornam-se capazes de influenciar importantes parâmetros medidos na filtração (taxa unitária de filtração, porosidade, resistência específica e umidade da torta).

Os tensoativos são convenientes quando há a necessidade de diminuir a viscosidade do filtrado, facilitando o seu escoamento e passagem entre os poros do elemento filtrante. Os floculantes, por sua vez, devem fornecer flocos pequenos, fortes e regulares, que não aprisionem água em seu interior, evitando assim, que a torta fique muito úmida. Já os surfactantes, atuam com a função de diminuir a pressão do capilar (pressão mínima para que haja drenagem do poro) (Dias *et al.* 2004; Chaves, 2013).

3.4 OS EQUIPAMENTOS DE FILTRAÇÃO

A operação de filtração é industrialmente, realizada de maneira contínua. Ou seja, um mesmo equipamento de filtração recebe o material a desaguar, o filtrado é succionado através do elemento filtrante e o sólido fica retido, sendo descarregado em sequência. Assim, pode-se perceber a não interrupção das etapas, constituindo um processo, que além de contínuo, é também cíclico. Basicamente, o circuito de filtração é formado pelo filtro, sistemas de transporte de torta e filtrado, bomba e linha de vácuo. Um filtro contínuo pode ser entendido como um equipamento que executa as seguintes tarefas (Chaves, 2013):

- Realiza o ciclo de filtração: formação de torta, secagem e descarga;
- Suporta a torta e o meio filtrante;

- Transporta a torta do local de alimentação ao de descarga;
- Permite a passagem do filtrado e o remete ao ponto de destino;
- Mantém a pressão diferencial necessária entre os dois lados do meio filtrante;

A Figura 3.6 relaciona os principais tipos de filtros e seus fornecedores de acordo com o mecanismo de filtração. Cabe informar que os filtros também diferem entre si devido a posição de alimentação da polpa (por baixo ou por gravidade) e do meio filtrante, sendo alimentação por baixo mais vantajosa operacionalmente, entretanto restrita a polpas homogêneas ou heterogêneas que possam ser mantidas em suspensão em agitação moderada (Guimarães, 2011; Chaves, 2013).

Tabela 3.1- Mecanismos de filtração e os principais fornecedores. Fonte: Guimarães, 2011.

| Tipos | Características | Modelos de filtros | Principais fornecedores |
|-------------|--|---|---|
| Vácuo | Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante | Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e de correia | Andritz, FLSmidth, Larox, Gaudfrin e Delkor |
| Pressão | Uma pressão positiva é aplicada na polpa | Filtros prensa horizontal e vertical | Andritz, FLSmidth e Larox |
| Centrífuga | Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido | Centrífugas verticais e decanters | Andritz, GEA e Alfa Laval |
| Hiperbárica | Em que se combina vácuo e pressão | Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico | Andritz, Bokela e Guadfrin |
| Capilar | Utiliza a ação de capilares de meios porosos para efetuar o desaguamento | Ceramec | Larox |

O filtro de discos é formado por uma série de painéis (discos) comunicantes com tubulações de vácuo e ar comprimido, e que se conectam a um eixo central (Figuras 3.6 e 3.7). Ao realizar movimento de rotação, em um tanque contendo a polpa a desaguar, o eixo percorre todo o ciclo de filtração. A formação da torta dá-se por meio

da aspiração da polpa às telas filtrantes que recobrem os discos, e ocorre conseqüente passagem do filtrado. Após a formação, há a secagem da torta e a descarga da mesma por meio de calhas contidas no próprio tanque (Valadão, 2012).



Figura 3.6- Visão externa do filtro de discos. Fonte: Amarante, 2002.

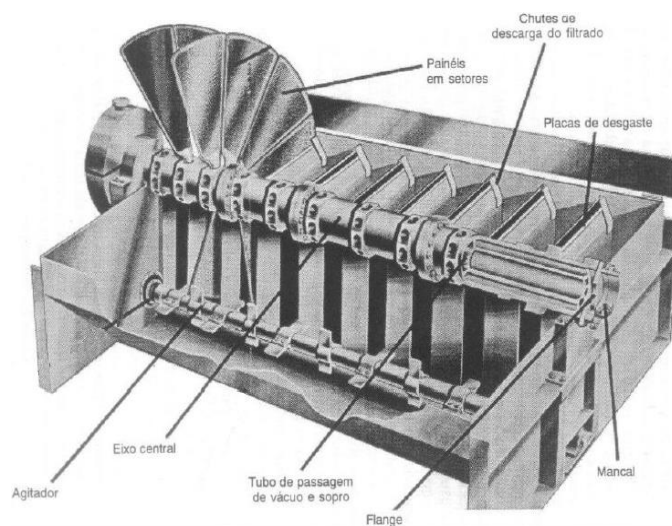


Figura 3.7- Principais componentes de um filtro de discos. Fonte: Chaves, 2013.

Valadão (2012) descreve o mecanismo de filtração do filtro de tambor como semelhante ao de discos. Constituído por um cilindro que gira solidário a um eixo

horizontal, imergindo e emergindo de uma bacia de polpa posicionada de forma que a porção inferior desse cilindro fique submersa (Figura 3.8). Este filtro possui como vantagem a função de lavagem do meio filtrante, que se encontra apoiado sobre a superfície do tambor, permitindo assim, a sua desobstrução.

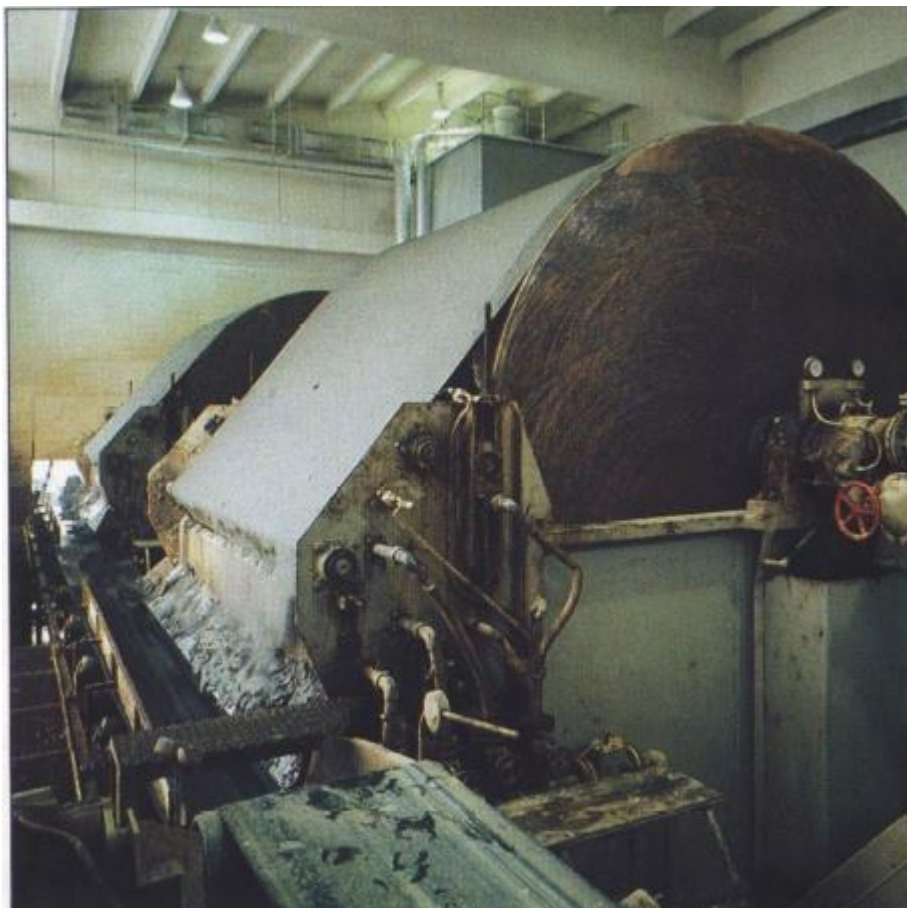


Figura 3.8- Visão externa do filtro de tambor. Fonte: Amarante, 2002.

O filtro de mesa ou plano, é caracterizado por Amarante (2002), como uma superfície circular que dispõe de movimento giratório em torno de um eixo vertical. A medida que o equipamento trabalha, a polpa é alimentada sobre a mesa, recoberta pelo meio filtrante, o filtrado o atravessa, e a torta é desaguada no ponto de descarga por uma espiral. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, a aparência de um filtro plano e o seu mecanismo de filtração. A câmara de vácuo, necessária para a formação da torta, assim como a de ar comprimido, fundamental a descarga, encontram-se na parte inferior do filtro.

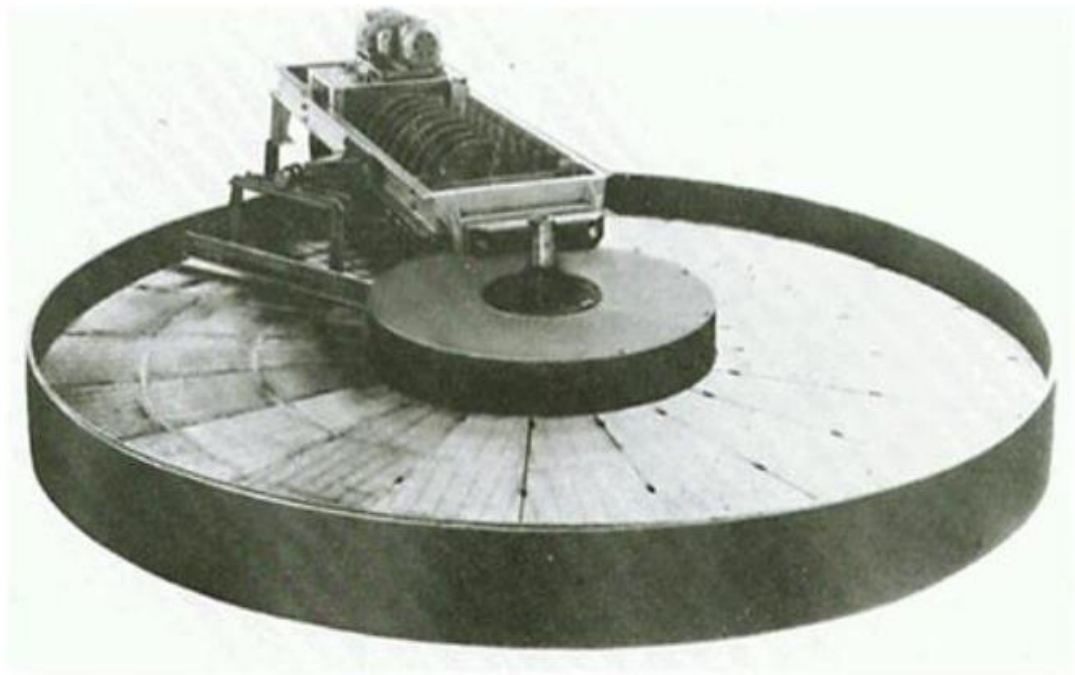


Figura 3.9- Filtro de mesa (plano) externamente. Fonte: Oliveira, 2015a.

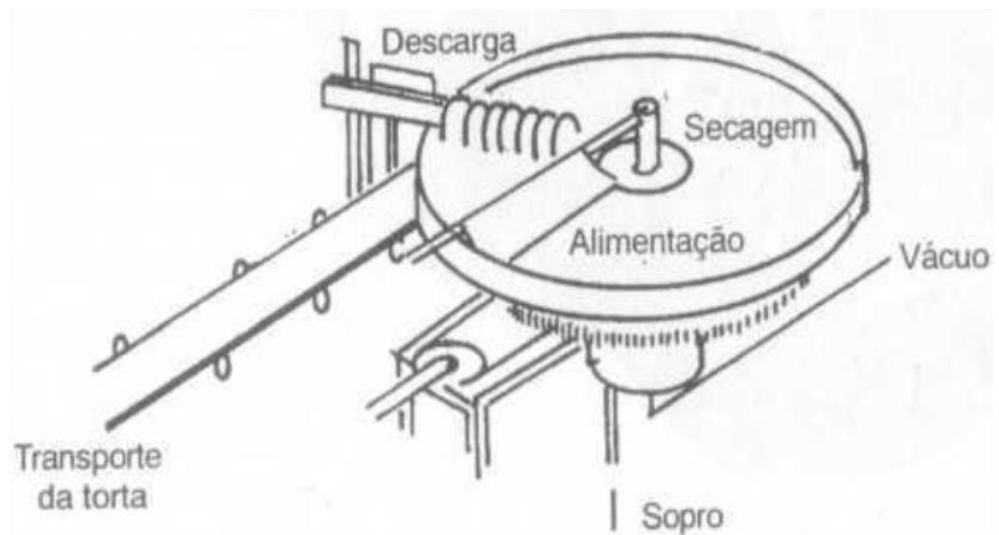


Figura 3.10- Funcionamento de um filtro de mesa (plano). Fonte: Chaves, 2013.

O filtro de correia trata-se simplesmente, de um transportador de correia projetado para tal função (Figura 3.11). Valadão (2012) explica que, a polpa é

alimentada numa extremidade do transportador e, ao movimentar-se até o ponto de descarga, é desaguada. Durante o percurso pode, se necessário, efetuar a lavagem da torta uma ou mais vezes, como também, a do meio filtrante, realizada na parte inferior da correia. A Figura 3.12 evidencia a localização dos principais pontos do ciclo de filtração neste equipamento.

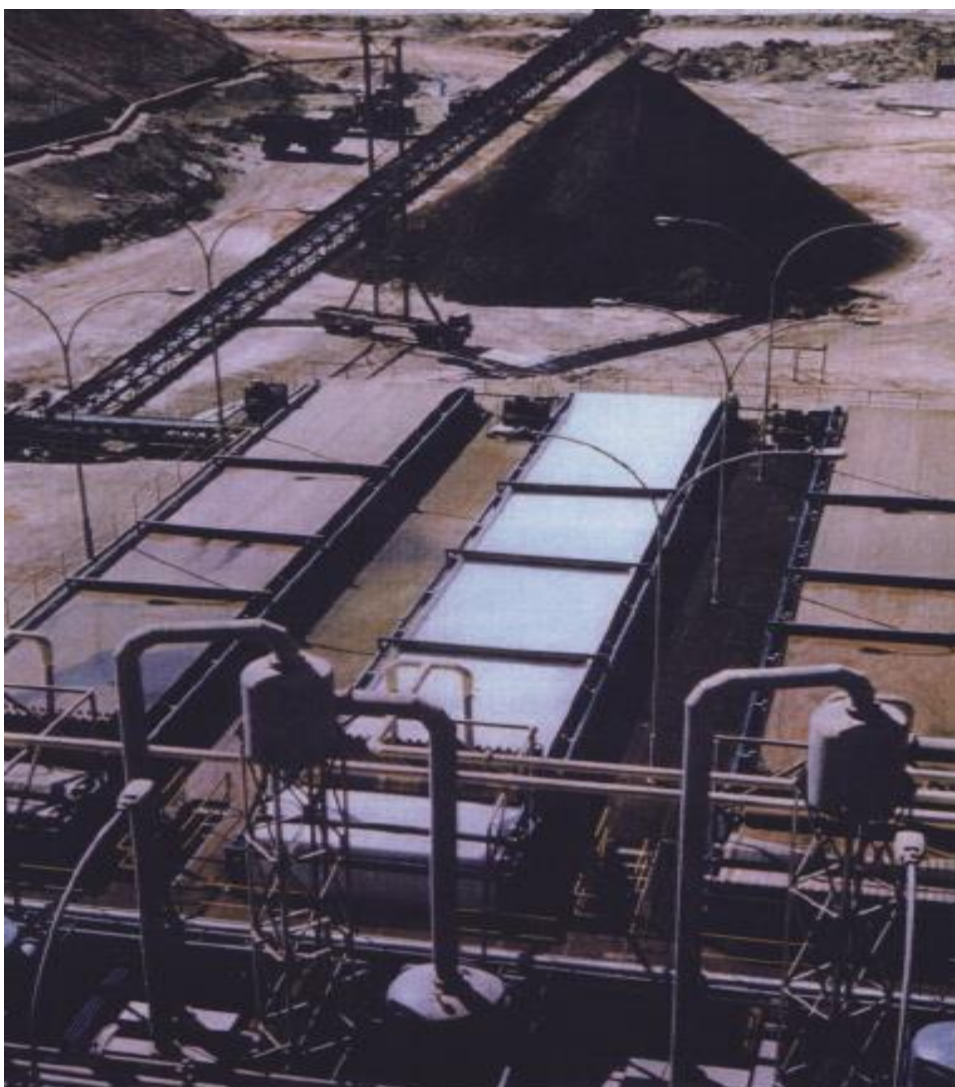


Figura 3.11- Filtro correia. Fonte: Amarante, 2002.

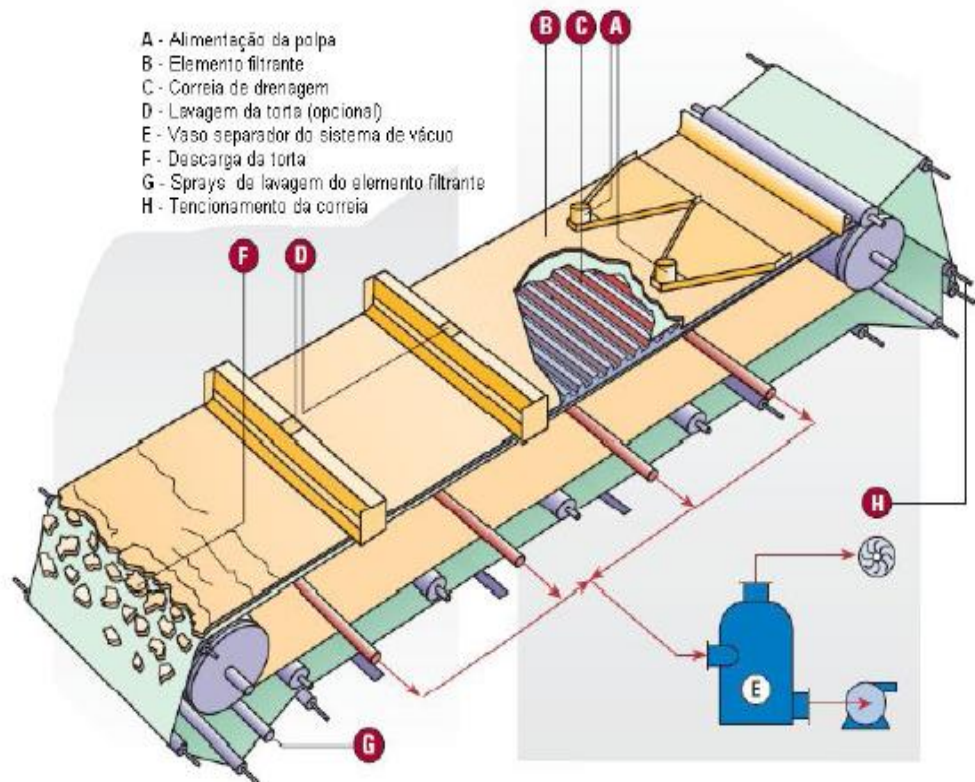


Figura 3.12- Principais pontos de operação do filtro de correia. Fonte: Guimarães, 2011.

Até agora, foram apresentados os equipamentos de filtração a vácuo, que conforme citado anteriormente, são os mais utilizados no desaguamento de polpas de minério. Entretanto, cabe apresentar aqui também o filtro prensa. Equipamento que difere dos outros por ser operado descontinuamente e mediante aplicação de pressão como mecanismo de filtração. Valadão (2012) relata que apesar de ser problemático, devido ao funcionamento descontínuo, o filtro prensa apresenta a grande vantagem de produzir tortas com as mais baixas taxas de umidade.

O filtro prensa é formado por um grande número de placas verticais, revestidas com telas e espaçadas uma das outras, constituindo câmaras (Figura 3.13). A polpa a desaguar preenche estes espaços vazios e, mediante aplicação de pressão, o filtrado atravessa os meios filtrantes e são coletados em calhas. A torta é formada, lavada (opcionalmente) secada e descarregada em um transportador de correia, por

meio da abertura de cada placa individualmente. A Figura 3.14 mostra o funcionamento deste filtro. As telas de filtração são também lavadas individualmente. Aproximadas e travadas as telas, diz-se que o filtro está fechado, e pronto para um novo ciclo de filtração (Guimarães, 2011).

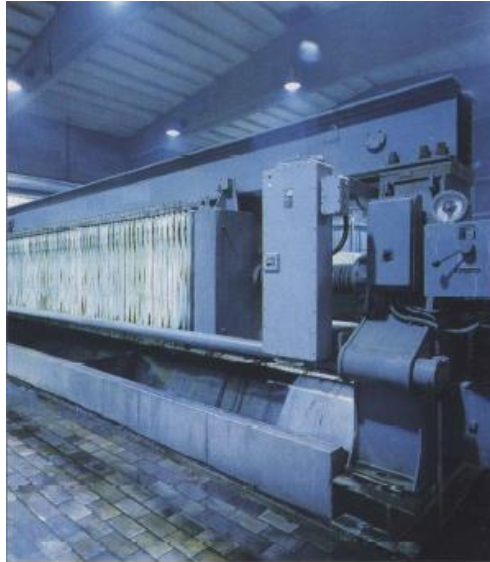


Figura 3.13- Filtro prensa horizontal (placas verticais). Fonte: Amarante, 2002.

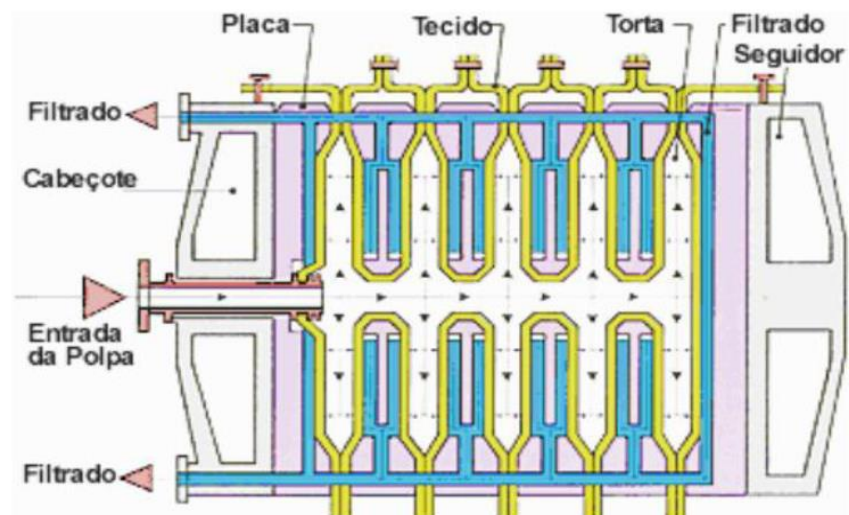


Figura 3.14- Funcionamento do filtro prensa. Fonte: Oliveira, 2015a.

Existem também as variações do filtro prensa, conforme relatam as literaturas aqui citadas. Dentre elas, tem-se o filtro prensa de placas horizontais, ou filtro vertical (Figura 3.15), caracterizado por ocupar um espaço menor, e possuir um funcionamento mais automatizado em relação ao anterior.

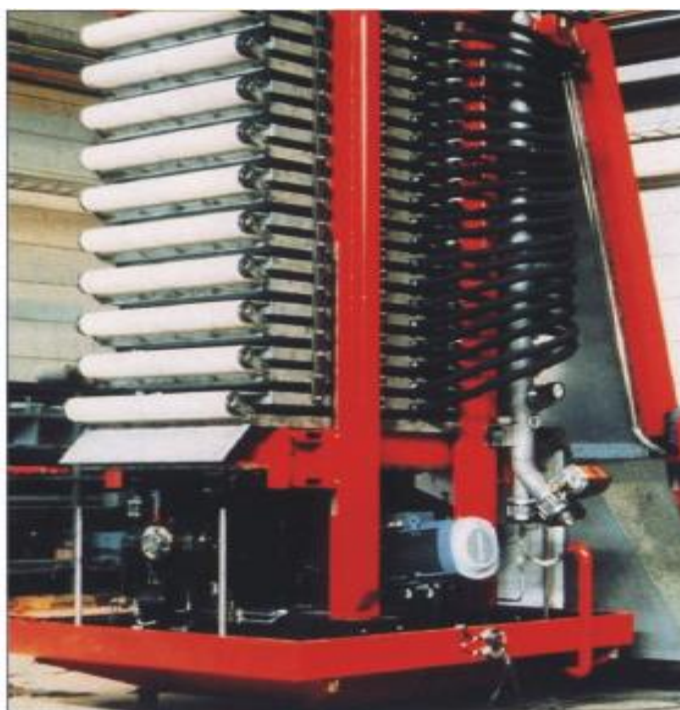


Figura 3.15- Filtro prensa vertical. Fonte: Amarante, 2002.

3.5 MEIOS FILTRANTES

Conforme observado no item anterior, são diversos os tipos de filtros usados no tratamento de minérios, sendo os mais comuns os contínuos e os a vácuo. Contudo, independentemente do tipo de filtro utilizado, uma das variáveis mais influentes no processo de filtração é o meio filtrante. Neste contexto, a ABINT- Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos (1991) define um importante termo para a conceituação de meio filtrante:

“Têxteis Técnicos são materiais constituídos de matérias-primas na forma de fibras, fios, filamentos, etc., nos mais diferentes arranjos (flocos, fios, cabos, tecidos e não tecidos) com aplicações que necessitem *performance* bem determinada, visando praticidade, segurança, economia e

durabilidade definidas (exceto os têxteis que são utilizados em moda, cama, mesa e banho). ”

Logo, um tecido, elemento ou meio filtrante pode ser entendido como um tecido técnico específico para o tratamento de minérios. Amarante (2002) cita que esses meios devem atender a duas condições básicas: propiciar baixa concentração de sólidos no filtrado (limpidez) e oferecer mínima resistência ao fluxo, permitindo assim, a obtenção de baixas umidades finais com elevadas taxas de filtração. Devem também, não ter tendência ao bloqueio progressivo (obstrução dos poros por partículas sólidas, também chamado “cegamento”); oferecer boas características de descarga da torta; permitir a limpeza por água ou ar e ter boa resistência mecânica, química e biológica (contra microorganismos).

Conciliar todas essas condições é praticamente impossível, pois as matérias primas utilizadas para a fabricação dos fios diferem bastante entre si (Figura 3.16). Sendo assim, um mesmo tecido pode possuir, por exemplo, uma boa resistência química, mas uma baixa resistência ao calor. A Remae, uma das principais fabricantes de tecidos técnicos no Brasil, produz tecidos em Poliéster de alta tenacidade, como a poliamida 6.6, polipropileno com tratamento anti UVA, algodão e outros polímeros e fibras sob encomenda.

Na indústria mineral, as fibras mais utilizadas são as de algodão, devido ao baixo custo e grande versatilidade; além das sintéticas, como os polímeros, por serem mais resistentes e possuírem vida útil mais longa. Sendo assim, a escolha do meio filtrante depende do processo de filtração e dos resultados desejados. Segundo o mesmo fabricante, as seguintes características físicas dos tecidos influem nessa escolha:

- Gramatura: representa a massa do tecido por unidade de área do mesmo (normalmente expressa em gramas por metro quadrado (g/m^2), variando de 30 g/m^2 até 3870 g/m^2 . Quanto maior o peso, mais resistente é o meio filtrante, mas, por outro lado, menos flexível (mais duro) e mais facilmente obstrutível;

- Espessura: Os tecidos são majoritariamente finos, com espessuras expressas em milímetros (mm) variando entre 0,10 mm até 5,5 mm de acordo com seu tipo;
- Permeabilidade: refere-se à medida da passagem de ar (volume) em uma unidade de tempo pela área do tecido ($m^3/min/m^2$);
- Contextura/ tessitura: maneira como o tecido é confeccionado, sendo realizada em máquinas de costura com tecnologia avançada, podendo resultar nas configurações exibidas na Figura 3.17.

| Artigo/Fibra | Tipo de Fio | Contextura | Gramatura | Permeabilidade ao ar com 1/2" CA | Espessura | Resistência Química | Resistência ao calor |
|---|--|--|--|---|-----------------------|---|--|
| Nylon | Multifilamento Monofilamento | Cetim Sarja Tela | de 140g/m ² 410g/m ² | de 0,6m ³ /min/m ² a 25m ³ /min/m ² | de 0,32mm a 1,00mm | Ácido: Ruim Álcalis: Ótima Solvente: Regular | Resistente a temperaturas de até 130°C quando seco |
| Poliéster | Multifilamento Monofilamento Fibra Cortada Misto M/FC | Sarja Tela Feltros Agluhados | de 130g/m ² 4200g/m ² | de 0,6m ³ /min/m ² a 33m ³ /min/m ² | de 0,22mm a 4,5mm | Ácido: Ótima Álcalis: Regular Solvente: Ótima | Resistente a temperaturas de até 150°C quando seco |
| Polipropileno | Multifilamento Monofilamento Fibra Cortada Misto MO/M | Cetim Sarja, Tela Feltros Agluhados | de 280g/m ² 700g/m ² | de 0,5m ³ /min/m ² a 120m ³ /min/m ² | de 0,50mm a 2,00mm | Ácido: Ótima Álcalis: Ótima Solvente: Regular | Resistente a temperaturas de até 100°C quando seco |
| Algodão | Fibra Cortada Monofilamento | Sarja Tela | de 143g/m ² 410g/m ² | de 0,8m ³ /min/m ² a 80m ³ /min/m ² | de 0,2mm a 1,5mm | Ácido: Regular Álcalis: Ótima Solvente: Ótima | Resistente a temperaturas de até 100°C quando seco |
| Tecidos emborrachados em Nylon ou Poliéster | Multifilamento Fibra Cortada | Sarja Tela | de 144g/m ² 800g/m ² | Impermeável revestido de um ou dois lados com PVC, PU ou Silicone | de 0,4mm a 1,00mm | Ácido: Ótima Álcalis: Regular Solvente: Ótima | Resistente a temperaturas de até 130°C quando seco |




Exemplos das Contexturas:  Tela  Sarja  Cetim

Figura 3.16- Principais matérias primas e suas características. Fonte: Stauch, 2013.

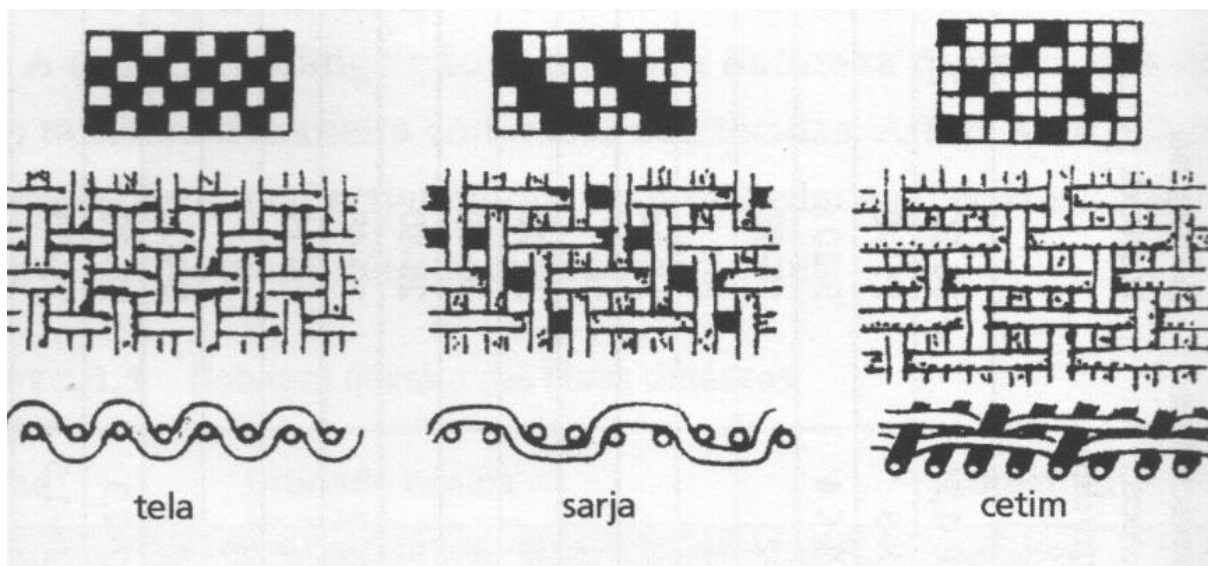


Figura 3.17- Tessituras básicas. Fonte: Chaves (2013).

Observando-se as configurações, pode-se perceber que a tela, também chamada de trama simples, possui fios alternados por cima e por baixo uns dos outros. Na tessitura sarja, ou trama trançada, um mesmo fio passa por cima ou por baixo de dois ou mais outros fios consecutivos, resultando assim em um desenho diagonal. Já o cetim, possui tessitura semelhante ao anterior, entretanto, neste último, quatro ou mais fios são trançados por baixo de um mesmo fio.

Tratando-se dos meios filtrantes, cada uma de suas características representam variáveis influentes no resultado da filtração. A Tabela 3.2 mostra como a tessitura (trama) interfere nos resultados. Com relação à matéria prima escolhida para o fio, os efeitos decorrentes desta também já foram apresentados, como mostrou a Figura 3.16. Mas, deve-se ainda atentar à maneira como o fio é tecido.

Tabela 3.2- Em ordem decrescente de preferência: efeito da trama sobre a filtração. Fonte: Chaves, 2013.

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

Stauch (2013) explica que ele pode ser monofilamentar (Figura 3.18) ou multifilamentar (Figura 3.19). Quando a escolha de matéria prima para a confecção dos tecidos envolve fibras naturais como lã, algodão ou linho são gerados fios com uma grande quantidade de felpas, resultando em um tecido felpudo (Figura 3.20).

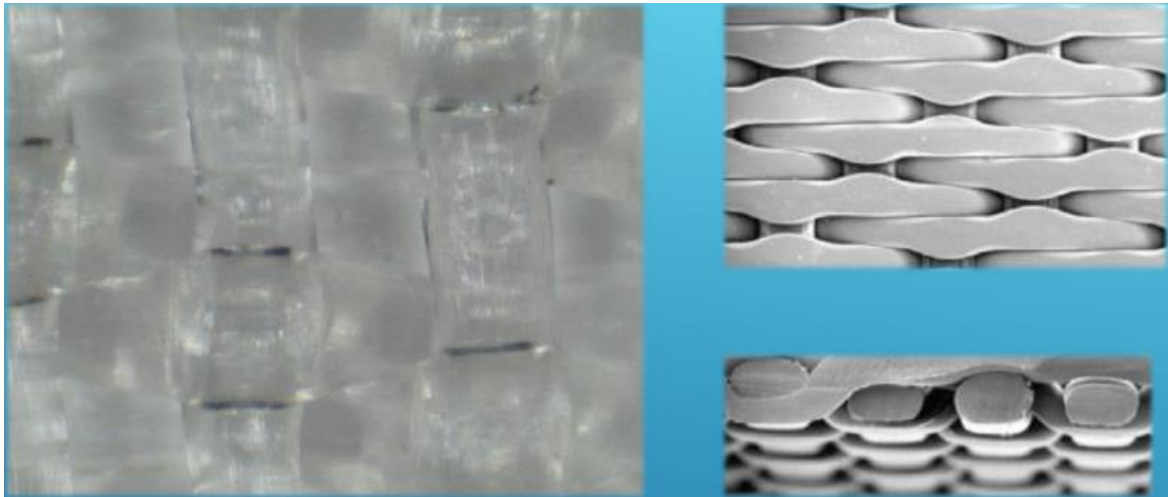


Figura 3.18- Fio monofilamentar. Fonte: Stauch, 2013.



Figura 3.19- Fio multifilamentar. Fonte: Stauch, 2013.

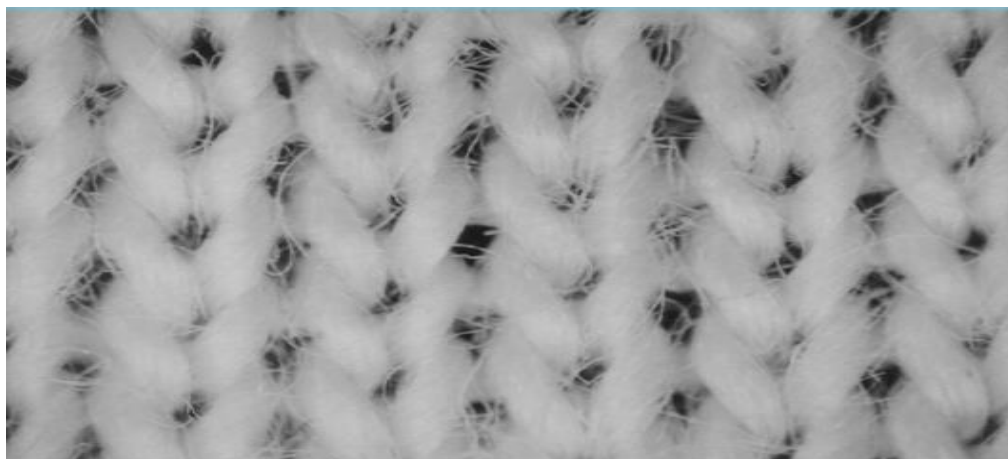


Figura 3.20- Fio felpudo. Fonte: Stauch, 2013.

A Remae fabrica também combinações de dois fios, como o monomultifilamentar, mostrado na Figura 3.21. A Tabela 3.3 mostra o efeito dessas características.

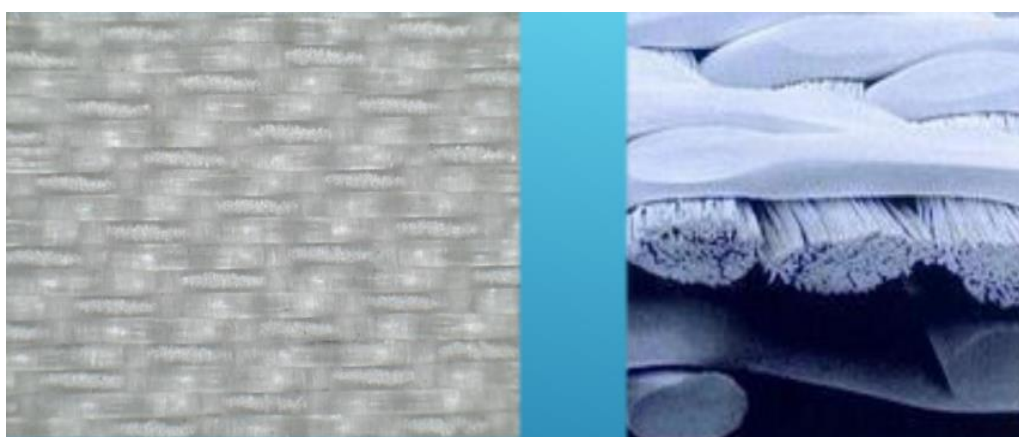


Figura 3.21- Fio monomultifilamentar. Fonte: Stauch, 2013.

Tabela 3.3- Em ordem decrescente de preferência: efeito das características do fio sobre o desempenho da tela. Fonte: Chaves, 2013.

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

Amarante (2002) cita ainda que os elementos filtrantes podem também ser classificados, em três tipos: flexível, material granular (“*filteraids*”) e poroso. Dentro dos meios flexíveis mais utilizados, incluem-se aqueles tecidos por mono ou multifilamento, feitos com material metálico, natural ou sintético.

Em seu catálogo de produtos, a Remae informa que após a confecção dos tecidos, os mesmos são submetidos a processos de acabamento, como reforços com feltros, emborrachamentos, impermeabilização, tratamento ultravioleta (UV), repelência a óleo, costuras e soldas com materiais apropriados, fundamentais para uma boa operação, redução de manutenção e desgaste prematuro dos equipamentos.

Por fim, para a aquisição de uma tela, o comprador deve informar ao fabricante, o material de que é feito o fio, o tipo de trama, o número de série (definido pelo fabricante), de fios e do próprio fio e a gramatura (Chaves, 2013).

3.6 TESTES LABORATORIAIS

A maneira mais prática de se avaliar os parâmetros de uma operação de filtração é através de testes em escala laboratorial. Dentre esses, o mais comum é o teste de folha (*leaf test*), pois o mesmo requer equipamentos relativamente simples, de pequena escala e de fácil montagem, além de seu procedimento experimental não possuir difícil execução. A Figura 3.22 apresenta os equipamentos necessários a uma prática experimental como essa.

De acordo com França & Casqueira (2007), o ensaio de teste de folha deve ser feito usando-se um suporte de filtração padrão, de área $1/10 \text{ ft}^2$, ou funil de *Buchner*, coberto com o meio filtrante mais adequada à polpa que se quer filtrar. Esse conjunto é conectado, por meio de mangueiras de plástico, a um kitassato, que coletará o filtrado, a um rotâmetro e bomba de vácuo.

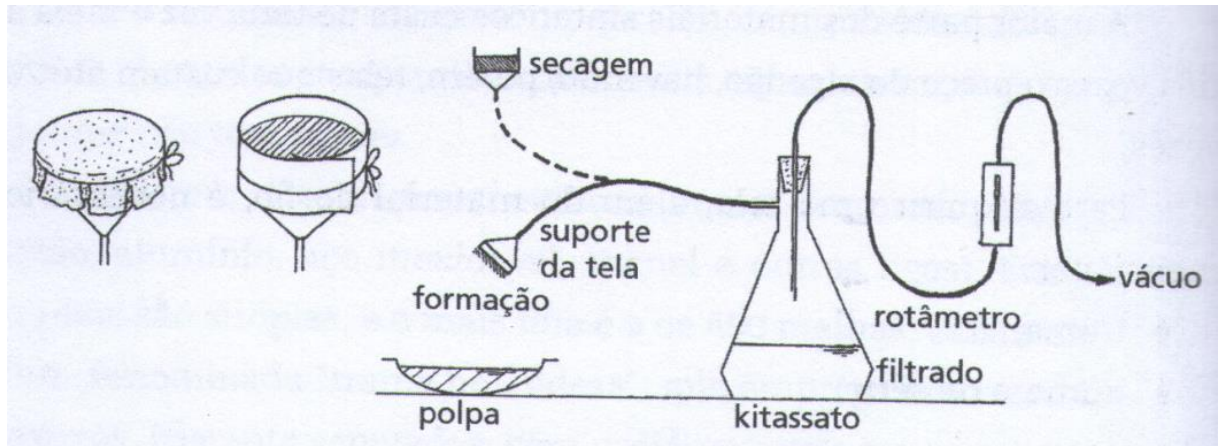


Figura 3.22- Conjunto de ensaio de filtração. Fonte: Chaves, 2013.

Guimarães (2011) relata que o teste pode ser executado de duas formas: com alimentação da polpa por cima ou por baixo. No primeiro caso, o elemento filtrante dispõe de um anteparo (o funil de *Buchner* ou um suporte) que atua como recipiente para contenção da polpa que é alimentada por cima (Figura 3.23). O tempo de formação de torta é considerado como aquele em que a torta pode ser visualizada sem a presença de líquido em sua superfície. E o de secagem, quando resta apenas um fino gotejamento de filtrado no recipiente coletor.

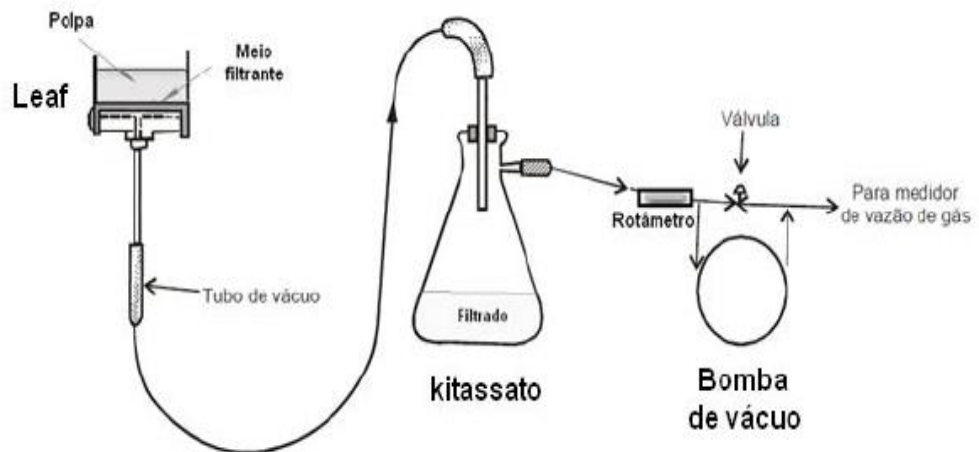


Figura 3.23- Teste de folha com alimentação por cima. Fonte: Guimarães, 2011.

No segundo caso, o ensaio é realizado em duas etapas. Primeiramente, o elemento filtrante é introduzido no recipiente contendo a polpa em agitação durante um tempo fixado, sob a ação do vácuo necessário à formação da torta (Figura 3.24). Após a formação, o dispositivo é retirado da polpa e mantido na posição vertical para secagem, sendo que este tempo também é contabilizado. A torta é então descarregada com o auxílio de um sopro de ar comprimido no tubo de drenagem (Figura 3.25).



Figura 3.24- Etapa de formação da torta do teste de folha com alimentação por baixo. Fonte: França & Casqueira, 2007.

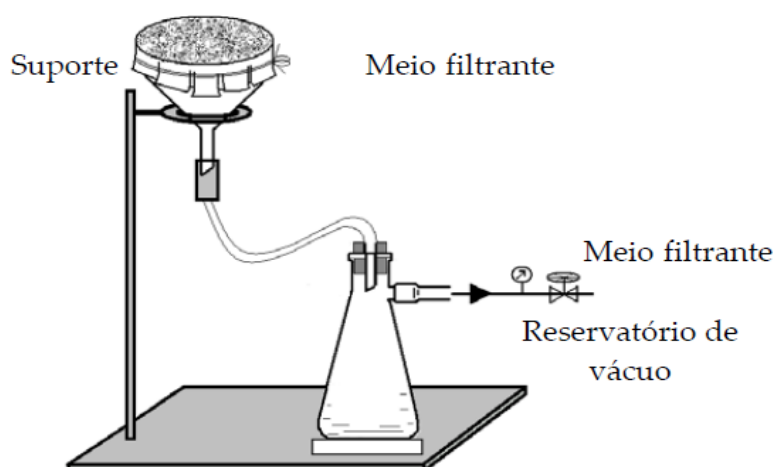


Figura 3.25- Etapa de secagem da torta do teste de folha com alimentação por baixo. Fonte: França & Casqueira, 2007.

Para que o ensaio decorra com sucesso, o operador deve estar atento a (Amarante, 2002):

- Granulometria (tamanho das partículas e sua distribuição);
- Presença ou não de auxiliares de filtração (agregantes, surfatantes e outros);
- Concentração de sólidos da polpa;
- Espessura da torta;
- pH da polpa;
- Estado de dispersão da polpa (coagulação, floculação e seu condicionamento);
- Idade da polpa (tempo decorrido desde o seu preparo, sobretudo para aquelas com regentes com degradação acelerada, como os amidos);
- Viscosidade do líquido;
- Temperatura da polpa e da torta;
- Agitação ou não e sua atuação (velocidade do agitador);
- Tipo de elemento filtrante e sua condição;
- Vácuo ou pressão aplicada para formação e secagem;
- Tempo de ciclo: formação, secagem e total.

Testes de folha prestam-se a diferentes objetivos. Efetuando-se ensaios precisos com diferentes meios filtrantes, pode-se selecionar o mais adequado, levando-se em conta a conciliação entre limpidez de filtrado e baixa umidade da torta, condições tratadas no item 3.5 MEIOS FILTRANTES. A Figura 3.27, por exemplo, mostra as tortas obtidas para diferentes testes de meios filtrantes com amostra de concentrado fosfático.

O teste de folha também é o método de filtração, em escala de bancada, empregado universalmente para o dimensionamento de filtros contínuos industriais. Os parâmetros quantificados neste caso são a velocidade de filtração (l/h); os tempos do ciclo de filtragem e a razão de filtração, expressa em kg/h/ m². Oliveira (2015b) cita que no cálculo do ciclo da filtração, devem ser considerados os tempos de carga, descarga, troca de tecidos, manutenção e previsão de expansão.

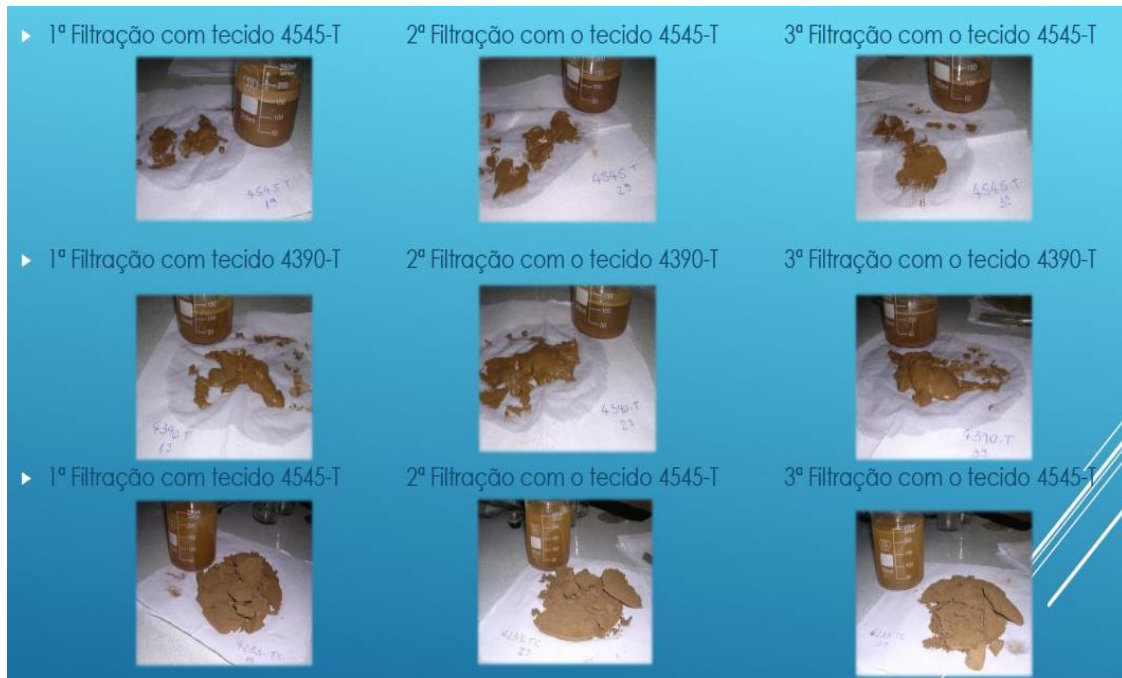


Figura 3.27- Testes de filtração com concentrado fosfático. Fonte: Stauch, 2013.

A velocidade de filtração representa o volume de filtrado que atravessa o meio filtrante na unidade de tempo, sendo dependente da abertura dessa tela, da viscosidade do filtrado, da área de filtração. Outros fatores que também afetam a velocidade de filtração segundo Oliveira (2004) são:

- Temperatura da polpa: o aquecimento da polpa a ser filtrada leva a uma diminuição da viscosidade da mesma, favorecendo a operação de filtração. Entretanto, não se deve alcançar o ponto de ebulição do líquido presente, pois pode acarretar a solubilização dos minerais da torta ou até mesmo danificar o filtro;

- pH da polpa: relacionado ao estado de dispersão das partículas, cuja floculação aumenta a taxa de filtração;
- Granulometria das partículas: polpas constituídas por partículas muito finas dificultam a filtração. Neste caso, pode-se recorrer a uma técnica conhecida como *pre-coating*, que consiste em cobrir a tela com um leito de partículas grosseiras, impedindo assim que as finas a alcancem e causem entupimento. Já as polpas formadas por partículas grossas, possuem maiores velocidade e taxas de filtração, e também, menor umidade;
- Porcentagem de sólidos: no tratamento de minérios, não se filtram polpas diluídas. Em geral, quanto mais densa a polpa, ou seja, maior a quantidade de sólidos e menor a de líquido, maior a razão de filtração;

Para os cálculos específicos do tempo de ciclo, deve-se considerar o equipamento a ser utilizado e os dados anotados na planilha (Figura 3.27). Door-Oliver (1972) recomenda que o ciclo total deve ser formado por uma porcentagem mínima do tempo de cada etapa, a fim de se obter um bom desempenho. Para um filtro de discos, por exemplo, o tempo de formação da torta e o de secagem correspondem, respectivamente, a 33 e 40% do ciclo total. Já para um filtro de tambor, além da formação e secagem, considera-se também o tempo de sopragem, que equivalem na ordem citada a, 25, 50 e 33% do total. Quando se deseja dimensionar um filtro de mesa, o ciclo total pode ser obtido considerando-se o tempo de descarga da torta e nova alimentação correspondente a 25% do ciclo, e os remanescentes 75%, para a secagem.

Obtendo-se os tempos de formação e de secagem para o dimensionamento de um filtro de tambor, por exemplo, adota-se sempre o maior valor para o cálculo do tempo total de ciclo. Chaves (2013) considera que apenas uma das etapas determina o tempo do ciclo completo:

“Os tempos reais de formação e de secagem são fornecidos pelo ensaio. São valores experimentais que traduzem a realidade física da

operação: o tempo de formação para resultar aquela espessura de torta e aquela massa por unidade de área é um valor definido, e isso é um parâmetro que não pode ser mudado. O mesmo acontece com o tempo de secagem medido, e isso não pode ser mudado!”

Guimarães (2011) complementa ainda que o tempo de ciclo também pode ser obtido através da construção de gráficos derivados dos resultados obtidos do teste realizado, um clássico método proposto por Dahlstrom e Silverblatt. A Figura 3.28 abaixo mostra os três gráficos gerados com os dados coletados durante a realização do ensaio experimental.

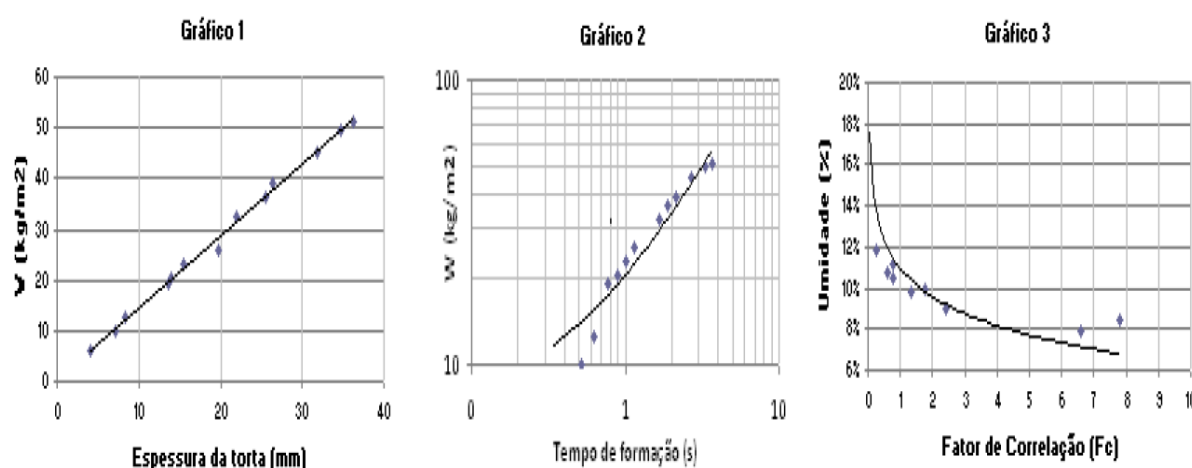


Figura 3.28- Construção dos gráficos conforme método estabelecido por Dahlstrom e Silverblatt. Fonte: Guimarães, 2011.

O primeiro gráfico demonstra a relação linear crescente entre a espessura da torta (mm) e o parâmetro W, que representa o peso da mesma por unidade de área (kg/m²). O segundo relaciona o tempo de formação da torta (s) com o mesmo parâmetro W. Pode-se verificar que quando maior o tempo de formação, maior será o peso da torta por unidade de área. Por fim, o terceiro gráfico, mostra a umidade a torta (%) em função de um fator de correlação (Fc) definido como o tempo de secagem dividido por W. O que significa que, a umidade final da torta não é dependente apenas do tempo de secagem, mas também da quantidade do material que está sendo secado.

Conhecendo-se a espessura e a umidade desejada para determinada torta, através dos gráficos obtém-se além do parâmetro W , os tempos de formação e secagem, o que permite calcular o ciclo total. De posse desses valores, pode-se finalmente, determinar a razão ou taxa unitária de filtração (TUF), conforme a Equação (3.1).

$$TUF = W \times 0,8 \times \frac{3600}{\text{ciclo}} \quad (3.1)$$

Onde:

$TUF =$ taxa unitária de filtração (kg/h)/m²

$W =$ peso seco de torta por metro quadrado de área filtrante (kg/m²);

3.600 = Fator de transformação de segundos para horas;

0,8 = Fator de escala;

Ciclo = tempo total de ciclo para o filtro que se deseja dimensionar (em segundos).

A presença de um fator de escala deve-se ao fato de que, o valor calculado acima refere-se a uma TUF obtida em laboratório. Para a operação industrial é necessário então, uma conversão. Geralmente, admite-se que industrialmente, a razão de filtração equivale a 80% daquela obtida em um ensaio laboratorial (Chaves, 2013).

Oliveira (2015b) explica que os resultados gerados nos testes de folha são expressos em peso de sólido seco ou volume de filtrado, por unidade de área ou por ciclo, que é a razão de filtração. Esse valor, multiplicada pelo número de ciclos por dia, permite o cálculo da área do filtro necessária para processar e obter uma capacidade diária de uma determinada escala de produção. No cálculo do ciclo da filtração, incluem-se também os tempos de carga, descarga, troca de tecidos, manutenção e previsão de expansão.

4. METODOLOGIA

4.1 OBTENÇÃO DA AMOSTRA GLOBAL

O minério fosfático empregado neste trabalho é proveniente da lavra do Complexo de Mineração de Tapira (CMT), operada pela Vale Fertilizantes.

4.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA FINAL

Como a amostra global de minério fosfático ainda não havia sido submetida a nenhuma etapa de beneficiamento, fez-se necessário a realização de etapas prévias de preparação no Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/ MG. Procedida a adequação da amostra, deu-se início aos testes de filtração.

4.2.1 Secagem e homogeneização

A amostra de minério fosfático disponível para a realização deste trabalho encontrava-se armazenada em um galão no Laboratório de Tratamento de Minérios. Com aspecto aparentemente úmido, fez-se necessário submeter o material a secagem em estufa com temperatura de 100° C durante 24 horas. A Figura 4.1 mostra a estufa utilizada para este fim.

Como a amostra apresentava-se em grande quantidade, procedeu-se a separação da mesma em tabuleiros metálicos de modo que se aproveitasse o máximo de espaço disponível na estufa. Separado, o material foi pesado em balança semi analítica (UPX solution, com precisão de 40 g e capacidade máxima de 30 kg) e levado à estufa. Decorrido o tempo de secagem, realizou-se nova pesagem, podendo desta maneira, calcular a umidade inicial do minério fosfático, de acordo com a equação 4.1, bem como determinar a massa total da amostra.

$$Umidade_{base\ úmida}(w) = \frac{\sum massa\ úmida - \sum massa\ seca}{\sum massa\ úmida} \times 100 \quad (4.1)$$

Posteriormente, a amostra foi distribuída em uma lona disposta retangularmente no chão, para homogeneização manual. O método adotado consiste

no dobramento de cada uma das extremidades da lona até a extremidade diagonalmente oposta. Realizado o procedimento para todas as quatro extremidades, completa-se um ciclo de homogeneização. Ao todo, foram realizados oito ciclos.



Figura 4.1- Estufa utilizada para secagem da amostra. Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Operações de cominuição

Logo após a homogeneização, o material foi submetido ao escalpe dos grossos via peneiramento manual a seco por meio de peneiras circulares (Granutest) de malha correspondente a 6 mesh (3,4 mm), pela série Tyler. A operação é retratada na Figura 4.2. Observa-se a presença de uma tampa acima da peneira, utilizada para evitar a perda de partículas para o ambiente, minimizando assim a geração de poeira.

Todo o material que permaneceu retido sobre a peneira do procedimento anterior foi levado a britagem em britador de mandíbulas de 1 eixo (Figura 4.3).



Figura 4.2- Peneiramento manual com peneira de malha 6 mesh. Fonte: Autoria própria.



Figura 4.3- Britador de mandíbulas de 1 eixo. Fonte: Autoria própria.

O produto britado foi distribuído em sacos plásticos e submetido à desagregação manual com o auxílio de um rolo de madeira, mostrado na Figura 4.4.

Desagregadas, as amostras de minério foram retiradas dos sacos e submetidas a um novo escalpe procedido de forma idêntica ao primeiro.



Figura 4.4- Rolo de madeira utilizado para desagregação manual. Autoria própria.

Os produtos passantes de ambos os peneiramentos foram submetidos à moagem visando a redução da granulometria para 65 mesh (0,212 mm), tamanho de partículas necessário para a etapa de flotação. A primeira tentativa foi realizada em moinho de jarros. Entretanto, o produto desta mostrou-se ainda bastante grosseiro, procedendo-se então, a realização de desagregação manual, utilizando-se desta vez, o conjunto pistilo (instrumento moedor) e almofariz cerâmicos, mostrados na Figura 4.5.



Figura 4.5- Pistilo e almofariz cerâmicos. Fonte: Autoria própria.

O procedimento anterior também não foi capaz de gerar partículas do tamanho necessário (passantes em 65 mesh). Assim, realizou-se uma nova moagem, desta vez empregando um moinho de bolas com dimensões de 590 x 570 milímetros, e volume de 151 litros. A Figura 4.6 mostra ambos os moinhos utilizados. Antes da moagem, uma fração de 510 g de minério fosfático foi utilizada para peneiramento manual a seco, desta vez em peneira com abertura de 65 mesh, a fim de se verificar a porcentagem de material passante nessa abertura.



Figura 4.6- a) Moinho de jarros; b) Moinho de bolas. Fonte: Autoria própria.

A fim de se verificar se a moagem de bolas havia sido suficiente para reduzir granulometricamente as partículas à 65 mesh, o material moído também foi submetido ao peneiramento manual a seco, na mesma peneira anterior (Figura 4.7). O material passante nesta peneira foi encaminhado para as etapas subsequentes, e o retido armazenado em sacos plásticos, para eventuais usos futuros em outros trabalhos.



Figura 4.7- Peneiras circulares Granutest. Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Deslamagem

Todo material foi distribuído em baldes plásticos com volume de 15 litros. Adicionou-se certa quantidade de água, resultando em polpas com 40% de sólidos. Cada uma delas foi mantida sob agitação com auxílio de agitador manual por 30 segundos e ao fim do tempo de agitação deixou-se o material em decantação por 5 minutos. Após o tempo de decantação, as partículas depositadas no fundo do balde formaram uma interface com aquelas que permaneceram em suspensão, as quais, se constituem excessivamente finas (lamas). Na Figura 4.8 é possível visualizar através da mudança de coloração, a interface, destacada em vermelho.



Figura 4.8- Interface entre partículas finas e grossas. Autoria própria.

A deslamagem foi realizada introduzindo-se na região da interface uma das extremidades, tampada, de um segmento de mangueira plástica com água contida em seu interior. A outra extremidade foi direcionada a um balde semelhante (vazio) para a coleta das lamas. Destampando-se primeiro a extremidade imersa na polpa e em

seguida a outra, as lamas foram succionadas devido à diferença de pressão da água contida na mangueira, sendo removidas da polpa.

O material deslamado foi secado na estufa a 100°C por 24 horas e posteriormente pesado em balança semi-analítica.

4.2.4 Concentração via flotação

Para a obtenção da amostra final de rejeito fosfático, fez-se necessário o emprego de um método de concentração utilizado industrialmente, sendo este, a flotação. O processo visa à separação da polpa em produtos concentrado e rejeito, fazendo uso da interação de reagentes depressores e coletores com as partículas da alimentação (Silva, 2016). Sem a deslamagem, este fenômeno não seria possível, pois as partículas minerais estariam recobertas por aquelas excessivamente finas.

A flotação foi realizada em equipamento tipo célula (Darma-Denver, modelo D12) equipada com sistema de sucção de ar para geração de bolhas, mostrada na Figura 4.9. Os parâmetros operacionais adotados para a flotação do minério fosfático encontram-se na Tabela 4.1, e foram obtidos de trabalhos anteriores realizados no laboratório com esse minério.



Figura 4.9- Célula de flotação. Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.1- Parâmetros operacionais adotados para a execução da flotação.
Fonte: Silva, 2015.

| Sólidos no condicionamento (%) | Sólidos na flotação (%) | Massa sólidos (g) | Dosagem coletor (g/t) | Dosagem depressor (g/t) | pH |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|-----|
| 50,0 | 28,8 | 1000 | 250 | 500 | 9,5 |

A realização da flotação deu-se segundo os procedimentos descritos por Oliveira (2015b). Primeiramente, procedeu-se a preparação dos reagentes (Figura 4.10) adotando-se como depressor, o amido de milho, e como coletor aniônico, o Flotigam 5806, fornecido pela Clariant.

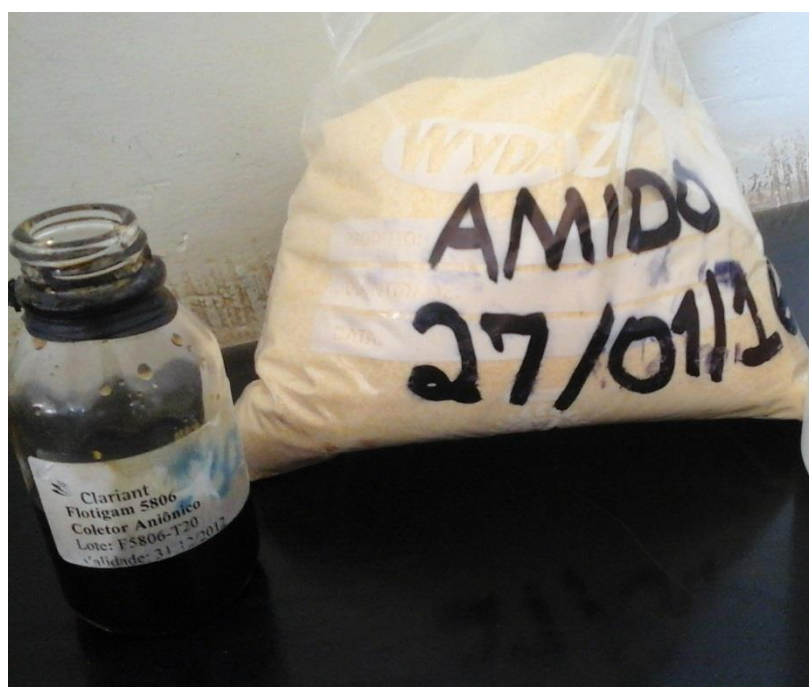


Figura 4.10- Flotigam e amido de milho. Fonte: Autoria própria.

Para a gelatinização do depressor foram pesados em recipientes distintos: 5g de amido de milho, 45 g de H₂O, 12,53 g de NaOH (concentração de 10% p/p) coletada por meio de pipeta graduada. O conteúdo foi misturado em um béquer de 600 ml e levado para agitação em um agitador magnético (Marconi, modelo MA 85) por 10 minutos. Decorrido este tempo, adicionou-se 104,16 g de água de diluição, obtendo-

se assim uma solução com 3% do depressor amido de milho e seguiu-se nova agitação por igual período.

Já para a saponificação do coletor, foram coletadas: 5 g de Flotigam, 7,85 g de água e 7,15 g de NaOH (concentração de 10% p/p). A agitação deste procedeu-se da mesma maneira que para o depressor, entretanto, a quantidade de água de diluição adicionada foi maior, 180 g, obtendo-se uma solução com aproximadamente 2,5% do coletor.

A próxima etapa trata-se do condicionamento. Para isto, adicionou-se à cuba metálica de 2,8l, 1000 g do minério fosfático e 1000 ml de água. Ligou-se a célula e procedeu-se a adequação do pH mediante a adição de gotas de NaOH (concentração 10% p/p) até que o mesmo se estabilizasse em 9,5, valor monitorado com pHmêtro digital (Analyser, modelo pH 300), equipado com um eletrodo específico (Sensoglass, modelo SC 09) (Figura 4.11).



Figura 4.11- pHmêtro utilizado nos testes. Fonte: Autoria própria.

O primeiro reagente a ser adicionado se trata da solução de depressor, com massa igual a 16,66 g, submetendo a polpa a condicionamento por 5 minutos. Após

esse tempo, adicionou-se 10 g de coletor, o qual ficou por 1 minuto sob agitação. Adicionou-se 1467ml de água para diluição e ajustou-se o pH novamente.

Por fim, ligou-se o sistema de aeração e deu-se início à coleta do flotado, mediante a raspagem das bolhas com pá metálica. Quando a formação das bolhas diminuiu notavelmente, considerou-se terminada a flotação, e o material remanescente na cuba, é chamado afundado. Em seguida, ambos os produtos foram armazenados em recipientes distintos, e deu início a um novo teste de flotação, acionando-se o sistema de injeção de bolhas de ar no interior da polpa. Ao todo, foram realizados 12 testes idênticos a este. A Figura 4.12 representa o concentrado (flotado) e o rejeito (afundado).

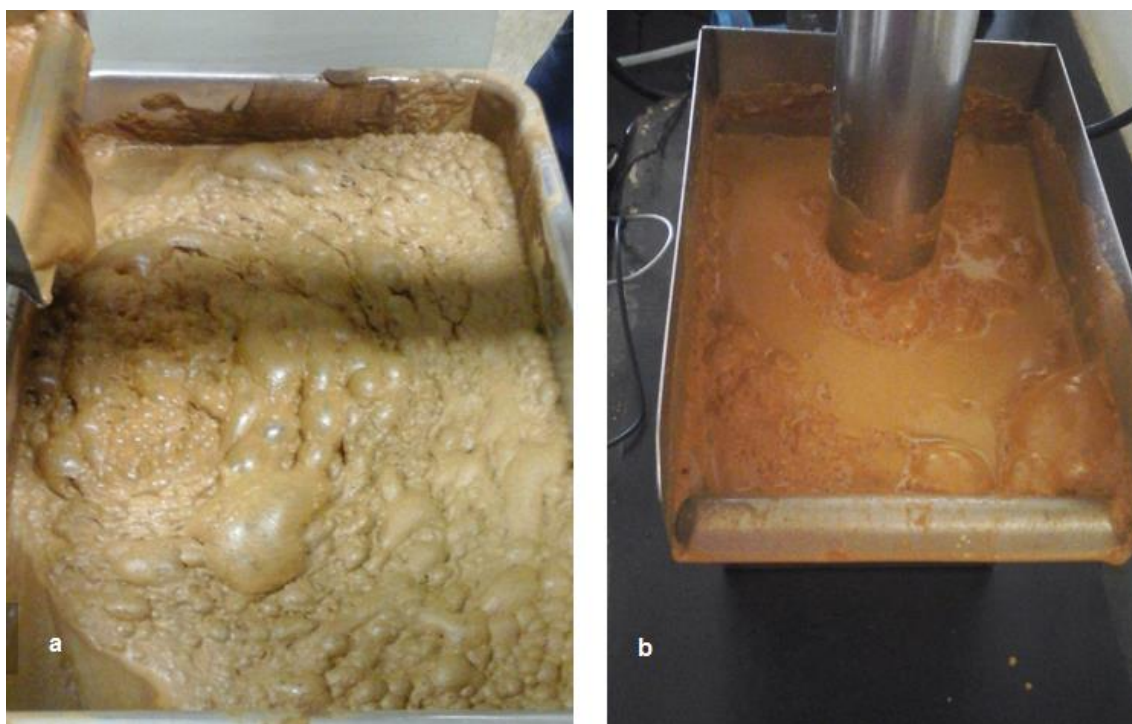


Figura 4.12- a) Concentrado; b) rejeito da flotação. Fonte: Autoria própria.

Cabe ressaltar que, neste caso, o afundado constitui o rejeito fosfático a ser empregado nos testes de filtração.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA FINAL

4.3.1 Análise granulométrica

Para conhecimento da distribuição granulométrica da polpa de rejeito, realizou-se o peneiramento a úmido em um peneirador suspenso (CDC, modelo PV-08). Utilizou-se uma amostra de 350ml de polpa de rejeito e uma série compostas por sete peneiras, com as seguintes aberturas: 0,209 mm (65#); 0,148 mm (100#); 0,105 mm (150#); 0,074 mm (200#); 0,052 (270#); 0,044 (325#) e 0,037 mm (400#). A Figura 4.13 ilustra o peneirador com as respectivas peneiras.



Figura 4.13- Peneiramento à úmido. Fonte: Autoria própria.

Com uma mangueira adicionou-se água no peneiramento até que o passante da última peneira da série se apresentasse um líquido clarificado. O material retido em cada peneira, bem como o passante coletado no balde, foram levados à estufa para secagem a 100° C durante 24 horas e posteriormente pesados em balança semi-analítica (Gehaka, modelo BG 2000, precisão 0,01 g).

4.3.2 Determinação da massa específica dos sólidos

A densidade dos sólidos do rejeito fosfático foi determinada através da picnometria. Para tal fez-se uso de vidrarias do tipo picnômetro e balança semi-analítica (Gehaka, precisão 0,01 g), seguindo-se os procedimentos descritos por Oliveira, 2015b.

Primeiramente pesou-se os picnômetros limpos, secos e tampados. Uma quantidade de sólidos foi secada e retirada da amostra total de rejeito após homogeneização em lona (Figura 4.14), e adicionada ao picnômetro em quantidade suficiente para tampar o fundo, e o conjunto foi pesado. Em seguida, completou-se o volume do picnômetro com água de torneira (evitando-se ao máximo a geração de bolhas de ar no interior do picnômetro) sendo então o conjunto pesado. Descartou-se o conteúdo e encheu-se totalmente os picnômetros com água, realizando novo aferimento de massa. Todas as massas foram anotadas, para o cálculo da densidade segunda a Equação (4.2). A Figura 4.15 mostra a picnometria realizada.

$$Densidade\ sólidos(\%) = \frac{(A2)-(A1)}{(A4+A2)-(A1+A3)} \quad (4.2)$$

Onde:

A1= massa do picnômetro (g);

A2= massa do picnômetro + amostra (g);

A3= massa do picnômetro + amostra + água (g);

A4= massa do picnômetro + água (g)



Figura 4.14- Amostra (prato) para picnometria. Fonte: Autoria própria.

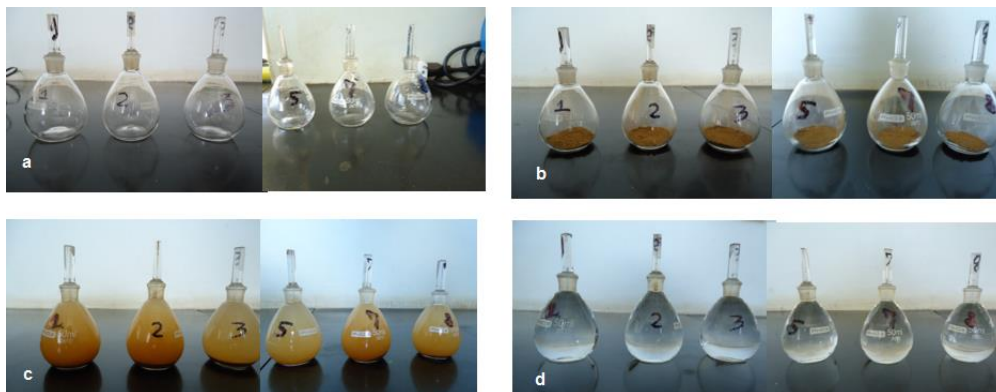


Figura 4.15- Pícnometria: a) picnômetro vazio; b) picnômetro com minério; c) picnômetro com minério e água; d) picnômetro com água. Fonte: Autoria própria.

4.4 TESTES PRELIMINARES DE FILTRAÇÃO

A Remae forneceu oito tipos de meios filtrantes, ilustrados na Figura 4.16 e especificados na Tabela 4.2, em tamanho A4 (210 mm x 297 mm), para realização deste trabalho. Para a seleção do tipo mais adequado para filtração do rejeito fosfático, fez-se necessário a realização de testes preliminares.



Figura 4.16- Amostras de meio filtrante cedidos pela Remae. Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.2- Especificações técnicas das amostras de meios filtrantes.

| Referência | 4230-T | 4384-T | 4390-T | 4400-T |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Fibra | Polipropileno | Polipropileno | Polipropileno | Polipropileno |
| Tipo de fio | Monofilar | Mono Multi | Monofilar | Multifilar |
| Acabamento | Termofixado | Termofixado | Termofixado | Termofixado |
| Permeabilidade ao ar (m ³ /min/m ²) | 50-110 | 3-20 | 30-70 | 0,4-1,5 |
| Espessura (mm) | 0,72 | 0,82 | 0,60 | 0,84 |
| Gramatura (g/m ²) | 312 | 380 | 305 | 385 |
| Resistência à temperatura (seco) | 100°C | 100°C | 100°C | 100°C |
| Resistência química | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima |
| | Solventes: regular | Solventes: regular | Solventes: regular | Solventes: regular |
| | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima |
| Referência | | | | |
| Referência | 4411-T | 4520-T | 4540-T | 4545-T |
| Fibra | Polipropileno | Polipropileno | Polipropileno | Polipropileno |
| Tipo de fio | Monofilar | Multifilar | Monofilar | Mono Multi |
| Acabamento | Tecido duplo | Termofixado | Termofixado | Termofixado |
| Permeabilidade ao ar (m ³ /min/m ²) | 100-140 | 1-5 | 80-120 | 20-40 |
| Espessura (mm) | 1,40 | 1,50 | 1,25 | 1,20 |
| Gramatura (g/m ²) | 432 | 516 | 550 | 577 |
| Resistência à temperatura (seco) | 100°C | 100°C | 100°C | 100°C |
| Resistência química | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima | Ácidos: ótima |
| | Solventes: regular | Solventes: regular | Solventes: regular | Solventes: regular |
| | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima | Álcalis: ótima |

Conforme descrito anteriormente no item 3.6 TESTES LABORATORIAIS, o conjunto utilizado para este fim é composto por um funil de *Buchner*, contendo o meio filtrante, encaixado em um kitassato, o qual por sua vez, é conectado por mangueira de borracha a uma bomba de vácuo (Figura 4.17).



Figura 4.17- Conjunto típico de testes de folha. Fonte: Autoria própria.

Entretanto, a prática experimental revelou que a simples montagem do aparato citado, não seria suficiente para o alcance do objetivo pretendido.

Diferentemente dos papéis de filtro, tipicamente utilizados em experimentos laboratoriais, as amostras de meios filtrantes são tecidos com características específicas para aplicação industrial. Logo, em escala laboratorial, os mesmos não se adaptam totalmente. A Figura 4.18 fornece um comparativo entre um papel filtro e um dos tecidos filtrantes. Fisicamente, nota-se uma elevada diferença de rigidez e espessura.

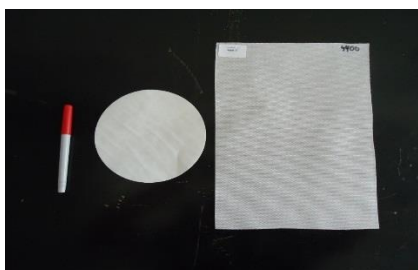


Figura 4.18- Papel filtro e tecido filtrante. Fonte: Autoria própria.

A rigidez e a espessura dos tecidos impedem que estes se encaixem ao fundo do funil de *Buchner*. Como consequência, quando é feita a adição da polpa a ser filtrada, esta passa por baixo do meio filtrante, contaminando o filtrado coletado no kitassato.

A bomba de vácuo disponível no laboratório de tratamento de minérios (Prismatec, modelo 131) alcança até pressões de vácuo da ordem de 760 mmHg. Entretanto, pela mesma razão citada no parágrafo anterior, esta tornou-se incapaz de realizar pressões de sucção elevadas. Logo, a filtração torna-se excessivamente lenta.

Decorridas diversas tentativas mal sucedidas de fixação do tecido ao funil, foi idealizado a utilização de um suporte em detrimento deste. O mesmo possui altura de 665 mm, e foi composto por um conjunto de 5 canos de policloreto de vinila (PVC), cortados com diâmetros internos variáveis entre 17 mm e 100 mm, acoplados entre si, de tal maneira que fosse possível o perfeito encaixe do elemento filtrante, em uma das extremidades e a inserção da outra no kitassato, possibilitando a realização de testes de folha com alimentação por cima. A construção deste projeto ficou a cargo do setor de mecânica do CEFET MG/ARAXÁ, e o resultado pode ser visto na Figura 4.19.

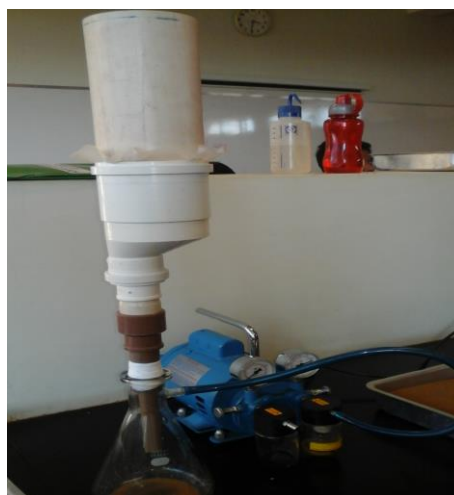


Figura 4.19- Suporte para o meio filtrante acoplado ao kitassato. Fonte: Autoria própria.

A montagem do aparato foi feita utilizando-se o tecido 4390-T, o primeiro submetido aos testes preliminares. Como os tecidos diferem pelas características mostradas na Tabela 4.2, principalmente espessura, não foi possível o encaixe de todos eles entre os canos, outro motivo que também inviabilizou a avaliação de todas as amostras. Além do tecido citado, foi possível testar os tecidos de numeração 4384-T, 4400-T, 4520-T, e 4230-T.

Todas as conexões entre os tubos (exceto a de inserção do meio poroso) foram seladas com cola tipo PVC, sendo que aquela de encontro ao recipiente coletor de filtrado foi revestida com fita veda-rosca, a fim de se evitar o escape de pressão negativa em qualquer ponto do aparato, o qual, eventualmente, poderia encontrar-se parcialmente vedado.

Realizado este cuidado, foram iniciados os testes preliminares de filtração. A Figura 4.20 mostra os principais materiais utilizados para realização dos testes. Programou-se a realização de três testes para cada tecido. Em cada um deles, o aparato foi encaixado no kitassato, já conectado a bomba de vácuo. Esta foi ligada, aplicando-se pressão menor que a atmosférica (vácuo), direcionada ao lado inferior do meio filtrante. Adicionou-se sobre o tubo superior, aberto ao ambiente, 350 mL de rejeito fosfático em polpa (volume representativo em relação a amostra global, contida em um balde) mantida em agitação manual com auxílio de um agitador metálico (Figura 4.21).

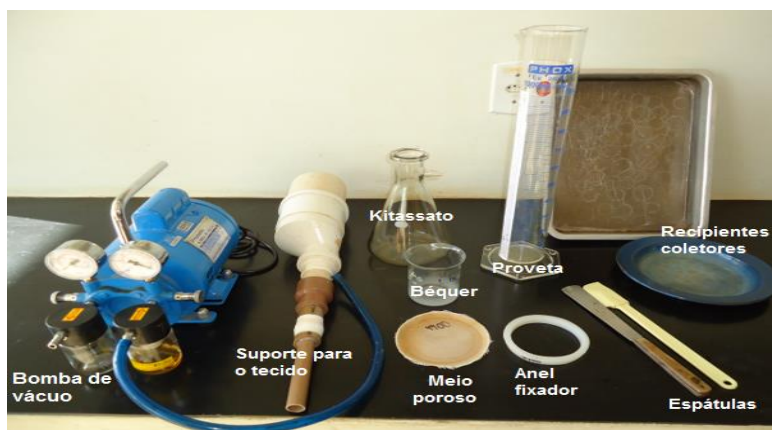


Figura 4.20- Principais itens utilizados para os testes de filtração. Fonte: Autoria própria.

Submeteu-se o material a um tempo de formação de torta de 40 minutos, valor também fixado para os demais testes, durante o qual, registrou-se a pressão de vácuo alcançada. Decorrido o tempo, a bomba foi desligada, e cronometrou-se o tempo de secagem da torta formada sobre o meio filtrante, obtido quando se cessava o gotejamento de filtrado e não havia mais uma lâmina de água sobre a torta.

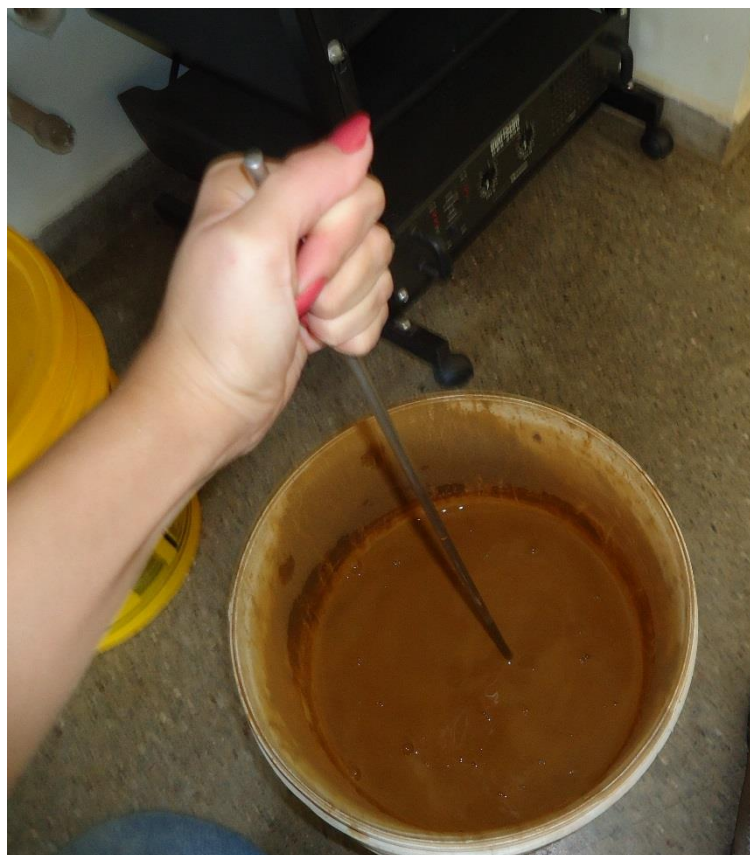


Figura 4.21- Polpa sob agitação manual. Fonte: Autoria própria.

O aparato foi cuidadosamente retirado do kitassato e vertido sobre uma bandeja metálica de massa previamente aferida, para descarregamento da torta. Já o filtrado coletado no kitassato foi transferido para uma proveta de 1000 ml, para determinação de volume, posteriormente, para um béquer de vidro de 600 ml, para verificação de sua turbidez e por fim, para um prato, de massa também conhecida.

Ambos os produtos, torta e filtrado, foram fotografados, pesados em balança analógicas distintas mostradas na Figura 4.22, sendo aquela utilizada para aferimento da massa do filtrado mais precisa (0,01 g) e de menor tamanho e capacidade, e

levados a estufa para secagem a 100° C durante 24 horas. Transcorrida o tempo, os produtos foram retirados da estufa e novamente fotografados e pesados, para cálculos posteriores.



Figura 4.22- Balanças. Fonte Autoria própria.

O aparato de canos, kitassato, proveta e béquer utilizado foram lavados em água corrente, para retirada de partículas residuais de testes anteriores. Realizados os três testes com o mesmo elemento filtrante, o cano superior foi retirado e um novo tecido cuidadosamente encaixado entre este e o subsequente. O conjunto foi novamente montado conforme o procedimento aqui descrito, continuando-se os demais testes preliminares.

Ao proceder-se a realização dos testes com o último tecido, 4520-T, pode-se perceber que o mesmo, devido a sua espessura, não se encaixaria no aparato. Logo, uma mudança neste foi efetuada. O tecido foi cortado em forma circular, e construiu-se um anel feito de plástico tipo naylor, com diâmetro externo idêntico ao tubo, 100 mm, e diâmetro interno de 85 mm. O tecido foi encaixado no tubo, e fixado com o anel citado, conforme a Figura 4.23a). Como este é adaptado externamente, não houve redução da área de filtração ao qual o meio filtrante encontrava-se exposto (Figura 4.23b).

Testes com papel filtro (Unifil, diâmetro 150 mm) utilizando-se a aparelhagem convencional também foram realizados para efeito comparativo. O papel foi cortado, reduzindo-se o seu diâmetro para 125 mm, para adequá-lo ao funil de *Buchner*. A Figura 4.24 mostra um papel novo e após o uso, observa-se que mesmo após lavado, partículas sólidas permanecerem aderidas a este.



Figura 4.23- a) Anel de para fixação do tecido ao tubo; b) Conjunto montado.
Fonte: Autoria própria.



Figura 4.24- Papel filtro antes e depois do uso. Fonte: Autoria própria.

4.4.1 Parâmetros de análise dos tecidos

Os parâmetros analisados durante os testes preliminares incluem:

- Nível de vácuo: traduz a resistência que o tecido impõe a pressão de sucção da água contida na polpa a ser filtrada. Quanto maior o nível de vácuo alcançado, maior será o fluxo de filtrado;
- Aspecto visual do filtrado: A turbidez do filtrado pode ser quantificada através de um aparelho conhecido com turbidímetro. Entretanto, como

este não está disponível no laboratório de tratamento de minérios, avaliou-se apenas a qualidade do filtrado através de seu aspecto visual e da porcentagem de sólidos contida no mesmo. A relação entre a massa seca e a massa úmida dos filtrados coletados, valores também obtidos experimentalmente permite o cálculo da porcentagem de sólidos, expressa pela Equação (4.3). Uma baixa porcentagem de sólidos para o filtrado o torna mais límpido, indicando que o meio filtrante em questão foi capaz de reter uma grande quantidade de sólidos.

$$Sólidos(\%) = \frac{massaseca}{massaúmida} * 100 \quad (4.3)$$

- Umidade da torta: calculada através da Equação (4.1), expressa a porcentagem de água presente nesta. Quanto menor for, maior será a porcentagem de sólidos na torta formada, o que é altamente favorável, pois assim sendo, mais consistente e menos úmida será a mesma;
- Taxa unitária de filtração: o tempo de ciclo, composto pelo tempo de formação (quarenta minutos) acrescido do tempos de secagem e de lavagem de torta (quando houver), não sendo esta última operação realizada neste trabalho. Como o tempo de secagem foi de aproximadamente cinco minutos para todos os tecidos, considera-se constante o tempo de ciclo dos testes preliminares em 45 minutos. De posse destes, da massa seca da torta e da área do tecido filtrante (equivalente a área circular do cano onde o tecido se encaixa (raio de 50 mm), calculada através da Equação (4.4), pode-se quantificar a taxa unitária de filtração (*TUF*) por meio da Equação (4.5).

$$Área (m^2) = \pi r^2 \quad (4.4)$$

$$TUF (t/h/ m^2) = \frac{Massa datortaseca(g)*3600}{1000000*áreadafolha (m2)*tempodociclo(s)} \quad (4.5)$$

Maiores valores para TUF são desejados, pois indicam a produtividade da filtração (produção dividida pela área de filtração). O parâmetro também é utilizado para dimensionamento de filtros, não sendo este, o foco deste trabalho.

- Aspecto visual do tecido após o uso: permite identificar possíveis danos à sua trama e sólidos retidos em seus poros. Quando limpo, o mesmo oferece boas condições de descarga da torta, além de permitir fácil limpeza de sua estrutura. Este procedimento é de extrema importância (quando necessário), pois a obstrução de poros com partículas remanescentes pode levar a quedas de pressões nos próximos testes (Vaz *et al* 2014).

4.4.2 Determinação da porcentagem de sólidos ideal para a filtração

Com o material em polpa, é difícil o controle da quantidade de sólidos retirada em cada amostra para os testes efetivos de filtração. Esta é a razão, pela qual fez-se necessário a secagem de todo rejeito disponível. A porcentagem de sólidos ideal foi conhecida realizando-se filtrações com papel filtro, variando-se a porcentagem de sólidos em 20, 40 e 60% e fixando-se o volume de polpa alimentado em 200 ml. Os valores foram definidos visando-se determinar aquele em que os tecidos apresentavam o melhor desempenho.

Para a determinação das quantidades de sólidos e da água contida em cada polpa a ser alimentada, procedeu-se a determinação da densidade das polpas através da Equação (4.6). A Tabela 4.3 mostra as condições geradas para os testes, de acordo com as porcentagens de sólidos.

$$Sólidos(\%) = \frac{ds(dp-1)}{dp(ds-1)} * 100 \quad (4.6)$$

Onde:

ds= densidade dos sólidos (2,65 g/ml);

dp= densidade da polpa (g/ml);

1= densidade da água (g/ml).

Tabela 4.3- Condições para realização dos testes de filtração.

| Volume de polpa (ml) | Sólidos (%) | Densidade da polpa (g/ml) | Massa de polpa (g) | Massa de sólidos (g) | Massa de água (g) |
|----------------------|-------------|---------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|
| 200 | 20 | 1,14 | 228 | 45,6 | 182,4 |
| 200 | 40 | 1,33 | 266 | 106,4 | 159,6 |
| 200 | 60 | 1,59 | 318 | 190,8 | 127,2 |

A Figura 4.25 mostra a diferença entre as quantidades de água e sólido a serem empregadas na formação das diferentes polpas.



Figura 4.25- Água e sólidos para as três diferentes porcentagens de sólidos.
Fonte: Autoria própria.

4.5 TESTES DE FILTRAÇÃO

Os testes de filtração com os cinco meios poroso, pré-selecionados nos testes preliminares, procederam-se com a melhor porcentagem de sólidos da alimentação, determinada nos ensaios com o papel filtro. A metodologia adota foi a mesma definida nos testes preliminares. A seleção do melhor meio poroso deu-se segundo os critérios expostos no item 4.4.1 *Parâmetros de análise dos tecidos*, somando-se a esses, o monitoramento do pH, da temperatura da polpa e da espessura da torta formada.

Por fim, de posse do tecido escolhido, realizaram-se novas filtrações, em duplicata, com as três porcentagens utilizadas para o papel (20, 40 e 60%), sendo que, a partir daquela que ofereceu as melhores condições, gerou-se o resultado final.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 AMOSTRA GLOBAL DE MINÉRIO FOSFÁTICO

A umidade inicial da amostra global, calculada pela equação 4.1, foi de 13,63%. Havia 48,80 kg de minério fosfático úmido disponível para os testes no laboratório, após secagem, a massa reduziu-se para 42,15 kg.

5.2 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA FINAL

5.2.1 Operações de cominuição

O peneiramento de uma amostra da alimentação da moagem de bolas revelou que 78,82% das partículas encontravam-se retidas em 0,209 mm (65#), fazendo-se necessário a redução granulométrica para que fosse possível a concentração. Após a moagem, este valor decresceu para 43,36%, ou seja, dos 42,15 kg de minério fosfático, 18,28 kg foram retidos em 65# e então, 23,87 kg eram passantes, sendo esse encaminhado a deslamagem. A Figura 5.1 mostra a diferença visível da granulometria antes e depois da moagem.



Figura 5.1- Redução de tamanho das partículas com a moagem. Fonte: Autoria própria.

5.2.2 Deslamagem

Após a deslamagem restaram-se apenas 12,24 kg de minério fosfático, adequados para a flotação, sendo assim, 48,72% (11,63 kg) da amostra era composta por partículas excessivamente finas (provenientes da sobremoagem), que foram eliminadas por meio do procedimento citado.

5.2.3 Flotação

Após a concentração, o concentrado foi secado e pesado, obtendo-se 6,05 kg e o rejeito (aproximadamente 6,19 kg) foi mantido em polpa para a filtração.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

5.3.1 Análise granulométrica

A classificação granulométrica realizada com uma amostra da alimentação dos testes de filtração, via peneiramento á úmido, remeteu aos resultados presentes na Tabela 5.1. A partir desses resultados foi construída a curva granulométrica, apresentada na Figura 5.2.

Tabela 5.1- Análise granulométrica do rejeito.

| Abertura (#) | Abertura (mm) | Massa retida (g) | Retido simples (%) | Retido acumulado (%) | Passante acumulada (%) |
|--------------|---------------|------------------|--------------------|----------------------|------------------------|
| 65 | 0,209 | 0,29 | 0,15 | 0,15 | 99,85 |
| 100 | 0,148 | 25,91 | 13,12 | 13,27 | 86,73 |
| 150 | 0,105 | 20,16 | 10,21 | 23,48 | 76,52 |
| 200 | 0,074 | 36,21 | 18,34 | 41,82 | 58,18 |
| 270 | 0,052 | 15,20 | 7,70 | 49,52 | 50,48 |
| 325 | 0,044 | 16,50 | 8,35 | 57,87 | 42,13 |
| 400 | 0,037 | 12,47 | 6,32 | 64,19 | 35,81 |
| Fundo | - | 70,71 | 35,81 | 100,00 | 0,00 |
| Total | - | 197,45 | 100,00 | - | - |

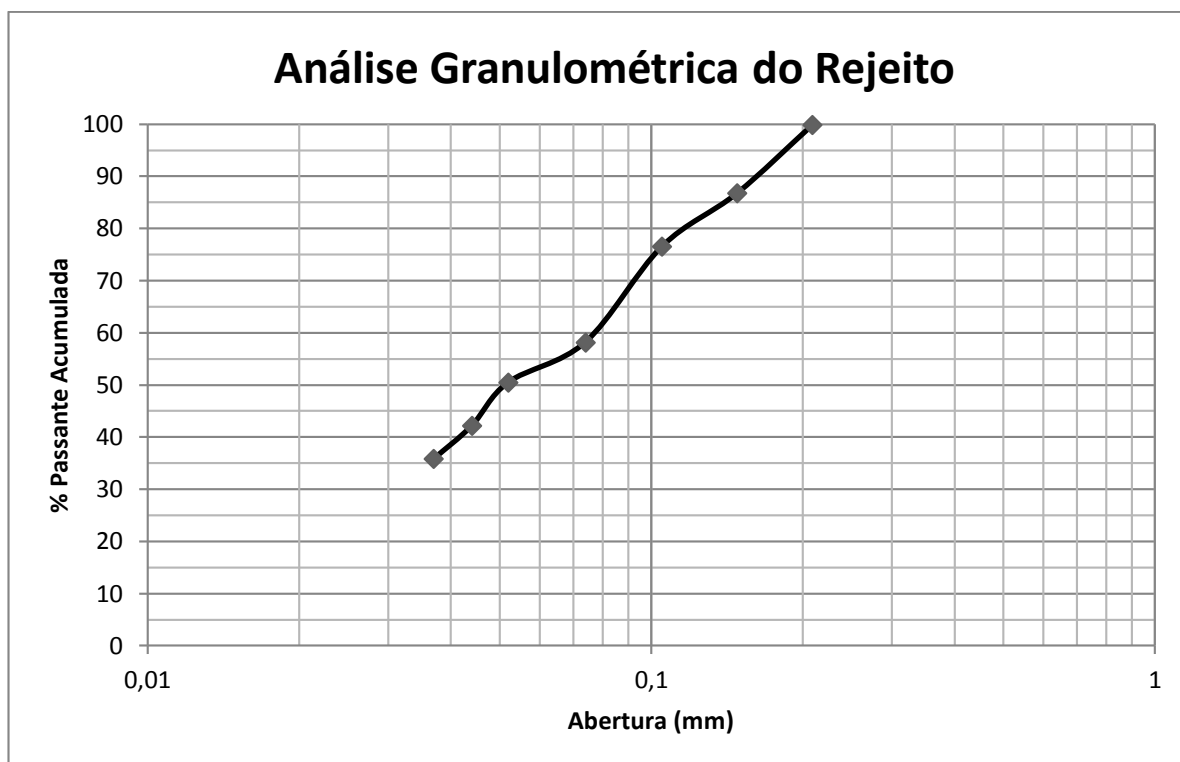


Figura 5.2- Curva granulométrica. Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 5.2 que a abertura na qual passam 50% das partículas passam corresponde a um diâmetro igual a 0,052 mm. A análise granulométrica também revela que existe uma fração considerável de partículas finas na amostra, cerca de 35,81% dessas são passantes em 0,037 mm. Tal cenário pode levar ao surgimento de dificuldades na filtração relacionadas a granulometrias excessivamente finas, pois partículas muito pequenas podem passar pelos poros dos tecidos e contaminar o filtrado.

5.3.2 Determinação da massa específica dos sólidos

Ao todo foram realizados 6 testes de picnometria, os quais encontram-se expostos na Tabela 5.2. A densidade final dos sólidos equivale a 2,65 g/cm³, resultante da média daquelas obtidas com os testes realizados, considerando-se um índice de 95% de confiança.

Tabela 5.2- Resultados dos testes de picnometria.

| Massa do picnômetro (A1) | Picnômetro + amostra (A2) | Picnômetro + amostra + água (A3) | Picnômetro + água (A4) | Densidade dos sólidos (g/cm ³) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|------------------------|--|
| 30,71 | 33,04 | 81,68 | 80,29 | 2,478 |
| 29,77 | 32,93 | 81,73 | 79,71 | 2,771 |
| 30,91 | 34,53 | 83,73 | 81,59 | 2,446 |
| 30,78 | 32,14 | 82,50 | 81,68 | 2,518 |
| 31,07 | 32,93 | 82,66 | 81,48 | 2,735 |
| 30,68 | 31,77 | 81,77 | 81,05 | 2,945 |

5.4 TESTES PRELIMINARES DE FILTRAÇÃO

O primeiro tecido selecionado para teste, 4390-T mostrado na Figura 5.3, não forneceu os resultados esperados para uma filtração satisfatória. O nível de vácuo máximo alcançado para este não ultrapassou 100 mmHg, uma pressão insuficiente para succionar a água contida na polpa a ser filtrada. Decorridos 40 min de filtração, ainda não havia a formação de uma torta consistente sob o elemento filtrante, e notava-se apenas um gotejamento de filtrado turvo no recipiente coletor (Figura 5.4), o que indica que o tecido em questão apresenta resistência ao fluxo de filtrado além de permitir a passagem de sólidos para este.

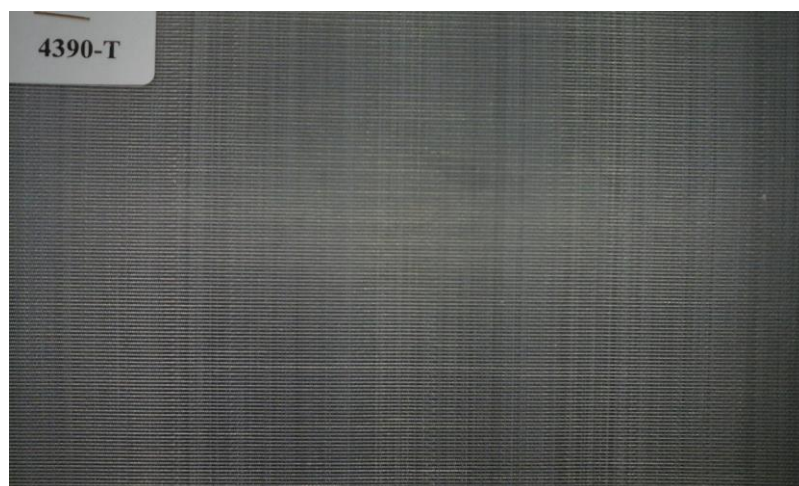


Figura 5.3- Tecido 4390-T. Fonte: Autoria própria.

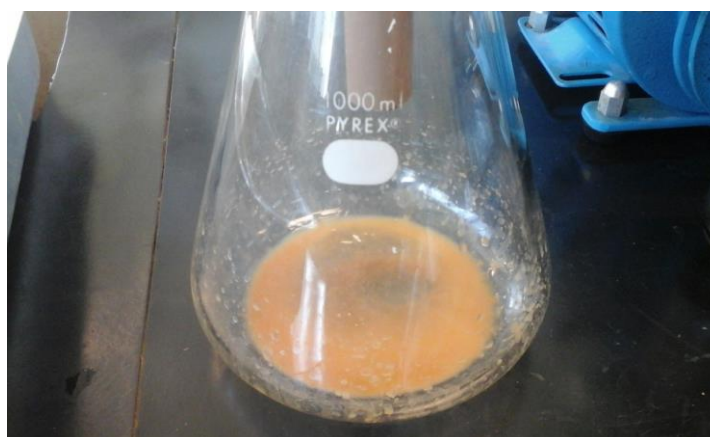


Figura 5.4- Filtrado turvo obtido com o tecido 4390-T. Fonte: Autoria própria.

Por esses motivos, o elemento 4390-T foi descartado para a realização dos testes efetivos, não se necessitando da realização dos demais testes preliminares programados.

Além das observações citadas, observou-se que durante o teste, a bomba de vácuo apresentou um aquecimento anormal. Logo, tempos de formação superiores a este, colocam em risco o correto funcionamento do equipamento, além de que, períodos excessivamente longos, acarretam baixas taxas unitárias de filtração, inviabilizando o processo. Sob estas condições, o tempo de formação para os demais testes foi fixado em 40 minutos.

Para os demais tecidos foi possível coletar importantes dados experimentais. A Tabela 5.3 apresenta os resultados gerados em um teste realizado com os elementos filtrantes, 4230, 4384, 4400 e 4520. As demais réplicas dos testes encontram-se no ANEXO A- RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES.

Tabela 5.3- Testes preliminares de filtração.

| Tecido | Vácuo (mmHg) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
|--------|--------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 4230 | 130 | 52,65 | 47,35 | 50 | 4,88 | 0,039 |
| 4384 | 160 | 62,73 | 37,27 | 68 | 0,29 | 0,028 |
| 4400 | 190 | 49,41 | 50,58 | 98 | 0,00 | 0,029 |
| 4520 | 100 | 37,72 | 62,28 | 195 | 0,026 | 0,024 |

O segundo tecido testado, 4230, apresentou um nível de vácuo um pouco superior ao anterior, em torno de 130 mmHg, Quanto ao volume de filtrado coletado, este manteve-se constante em 50 ml nos dois primeiros testes, entretanto, na terceira réplica, um fluxo notório de polpa atravessou o tecido, acarretando uma elevação do volume de filtrado para 98 ml, fato explicado pela baixa porcentagem de sólidos contida na polpa utilizada para este teste. Observa-se na Figura 5.5, o aspecto turvo obtido para o filtrado do teste 3, resultados mostrados na Tabela A1 – Anexo A, com 2,51% de sólidos. Os demais testes também apresentaram filtrados de aspecto bastante semelhante, com 0,67 e 4,88% de sólidos, respectivamente. Sendo este último o teste que gerou a maior TUF, 0,039 t/h/m².

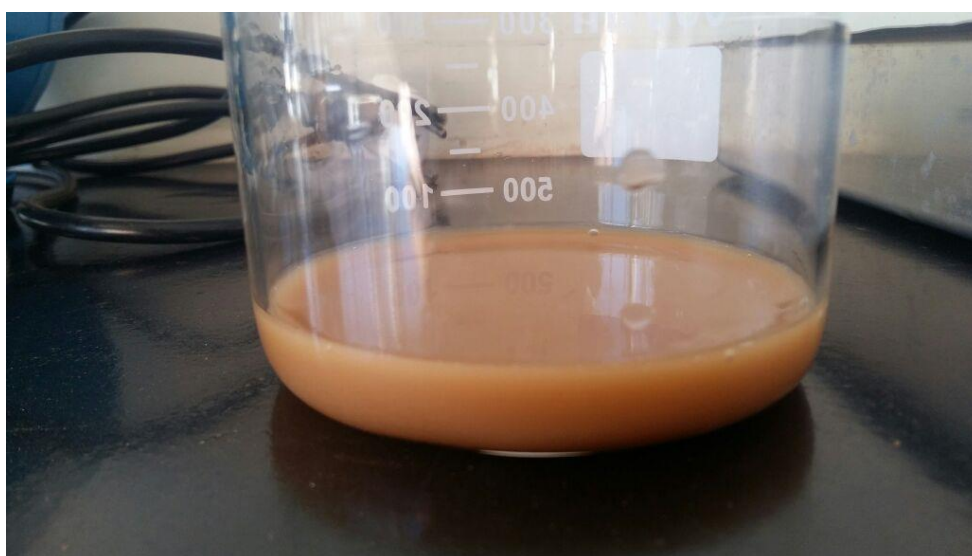


Figura 5.5- Filtrado do teste 3 com o tecido 4230-T. Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.6 revela o aspecto das tortas formadas sob o mesmo tecido 4230-T, após secagem. Nenhuma delas apresenta o formato circular, típico de uma torta com baixa umidade e boa descarga. A aparência “espalhada” do material dentro da bandeja indica que, no momento da descarga, ainda havia polpa a ser filtrada, logo, o tempo de formação estipulado, ainda demonstrava-se insuficiente para uma filtração satisfatória com alimentação de 350 ml, fato também ocorrido com os demais tecidos testados.



Figura 5.6- Tortas secas para o tecido 4230-T. a) Teste 1; b) Teste 2; c) Teste 3. Fonte: Autoria própria.

O terceiro tecido testado, de referência 4384-T, por sua vez, possibilitou o alcance de um nível de vácuo, um pouco mais elevado, em torno de 160 mmHg. Os volumes de filtrados coletados bem como suas respectivas porcentagens de sólidos apresentam-se mais estáveis, entre 68 e 70 ml e 0,29 a 0,34%. O menor volume coletado é referente ao último teste realizado, podendo então, este tecido, apresentar tendência ao bloqueio progressivo de suas aberturas por partículas sólidas. O filtrado coletado através do teste 2 (tabela A2) é mostrado na Figura 5.7, nota-se que apesar da baixa porcentagem de sólidos contida nesse, 0,34%, o mesmo ainda apresenta um aspecto turvo com coloração amarela. Quanto as umidades de torta e TUF obtidas, estas atingem no máximo 71,79% (teste 1 - tabela A2) 0,028 t/h/m² (teste 3 - tabela A2), respectivamente. A Figura 5.8 apresenta o aspecto disforme das tortas formadas após secagem.



Figura 5.7- Filtrado obtido através do teste 2. Fonte: Autoria própria.



Figura 5.8- Tortas secas para o tecido 4384-T. Fonte: Autoria própria.

O quarto tecido submetido aos testes preliminares, 4400-T, trata-se daquele que foi capaz de proporcionar uma das menores porcentagens de sólidos contida nos filtrados (0,00%). Como consequência, este é também o mais límpido. A Figura 5.9 mostra o aspecto do filtrado obtido para o teste 3 apresentado na Tabela 5.3, e o seu volume de 98 ml segundo a leitura da proveta milimetricamente graduada.

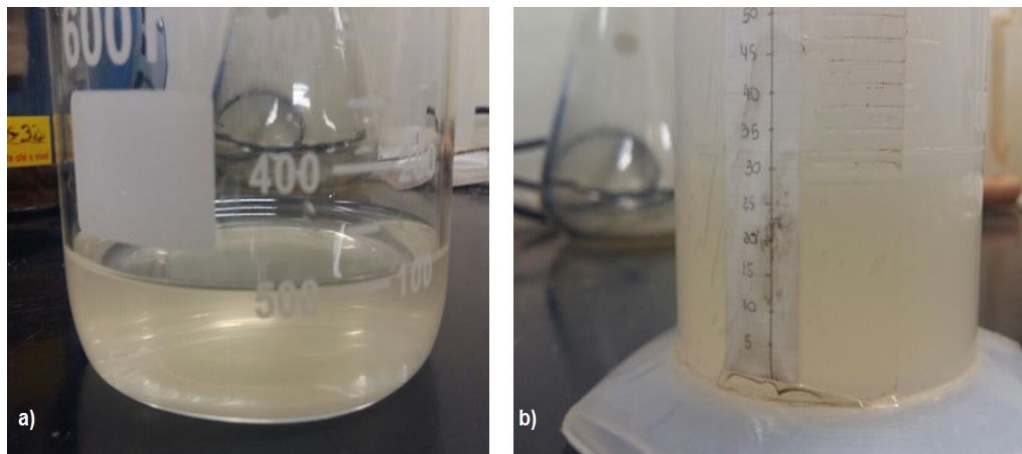


Figura 5.9- a) Aspecto do filtrado teste 3; b) Volume de 98 ml filtrado. Fonte: Autoria própria.

De acordo com os valores de umidade da torta, observa-se que, o Teste 1, apresentou uma alta porcentagem, 93,14%. Este patamar pode ser atribuído ao fato

de que, o tecido não apresentava facilidade na descarga da torta, fazendo-se necessário jatear por meio de pisseta certa quantidade de água de encontro ao meio filtrante, de modo a facilitar a remoção da torta aderida a este, com isso, a umidade não indica o valor real obtido na torta. Notada a elevação demasiada de massa úmida nesta situação, o mesmo procedimento caracterizou-se como um erro de execução. Nos demais testes, utilizou-se para a remoção da torta somente uma espátula plástica. A Figura 5.10 ilustra as tortas obtidas em cada teste para este tecido após secagem. No que diz respeito à TUF, o maior valor, 0,029% foi encontrado no teste 3, o mesmo cujo filtrado é o mais límpido.

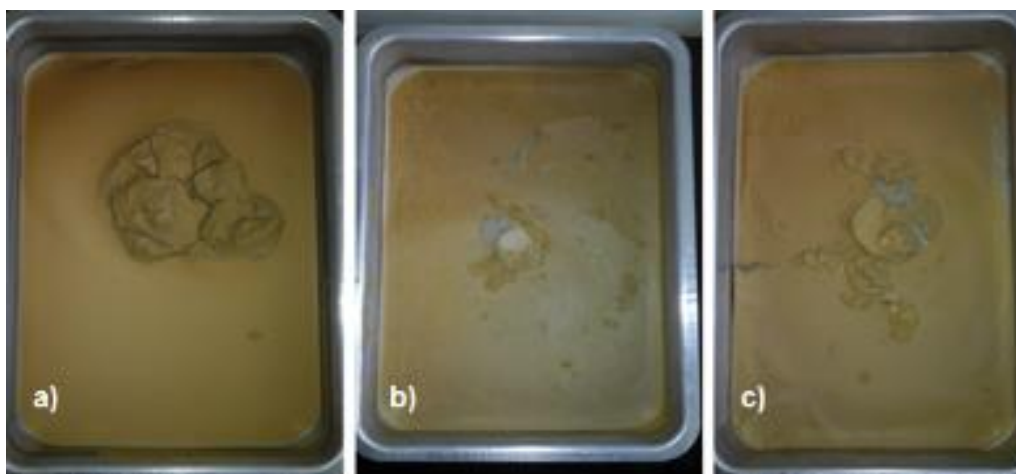


Figura 5.10- Tortas secas para o tecido 4400-T: a)Teste 1; b) Teste2 e c)Teste 3. Fonte: Autoria própria.

Com o tecido 4520-T, houve um demasiado aumento da pressão de vácuo, a ponto de desprender o tecido do encaixe. Lembrando que este tecido foi testado após modificação do equipamento, colando-o no anel de plástico. Sendo assim, fez-se necessário regular a bomba para que baixas pressões fossem realizadas, sem entretanto, comprometer o desempenho da filtração. Com este tecido um grande volume de filtrado foi obtido (Figura 5.11), mais clarificado que o anterior. Já as umidades das tortas são as mais baixas encontradas, como pode ser constatado observando a Tabela 5.3. A Figura 5.12 mostra o aspecto das tortas úmidas geradas para este elemento.

A Figura 5.13 revela o aspecto dos tecidos antes e depois dos testes.

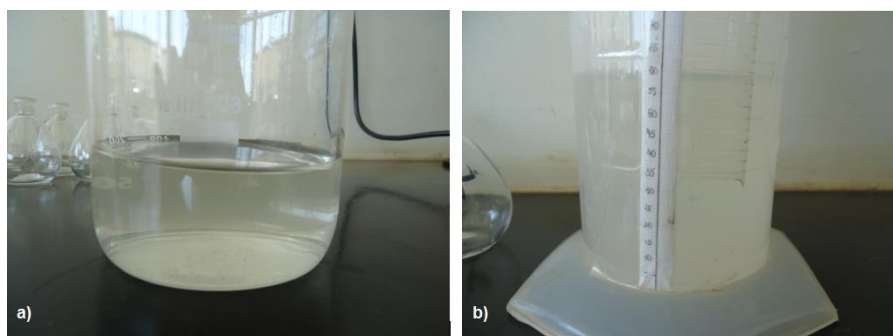


Figura 5.11- a) Aspecto do filtrado teste para o tecido 4520-T 2; b) Volume de 195 ml. Fonte: Autoria própria



Figura 5.12- Tortas úmidas para o tecido 4520-T. a) Teste 1; b) Teste 2 e c) Teste 3. Fonte: Autoria própria.

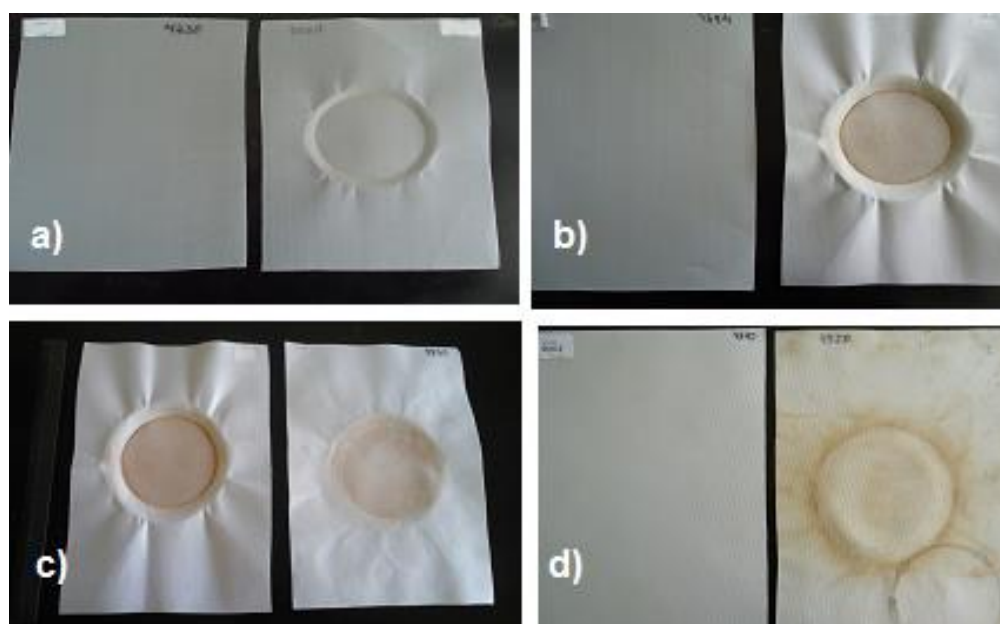


Figura 5.13- Aspecto dos tecidos antes e após os usos: a) 4230; b) 4384; c) 4400 e d) 4520. Fonte: Autoria própria.

Os tecidos 4230 e 4384 tratam-se daqueles que permaneceram mais limpos após os usos, com mínima quantidade de sólidos aderidas. Já os elementos 4400 e 4520 apresentaram resquícios de material aderido às suas estruturas, mesmo após lavagem.

Dois testes efetuados com papel filtro (Tabela 5.4) retratam as diferenças obtidas na filtração com um meio que oferece menor resistência, que é o caso do papel. O papel de filtro, fino e maleável, se adapta totalmente ao funil de *Buchner*, além de proporcionar elevados níveis de vácuo, o que certamente contribui para a redução do tempo do ciclo (25 min), e conseqüente aumento da TUF. A Figura 5.14 apresenta o filtrado e a torta seca obtidos para um dos testes com papel filtro.

Tabela 5.4- Parâmetros operacionais quantificados com papel filtro.

| Teste | Vácuo (mmHg) | Umidade torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
|-------|--------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | 500 | 31,25 | 206 | 212,36 | 0,14 | 0,066 | 0,0258 |
| 2 | 440 | 20,21 | 206 | 209,34 | 0,07 | 0,033 | 0,0293 |

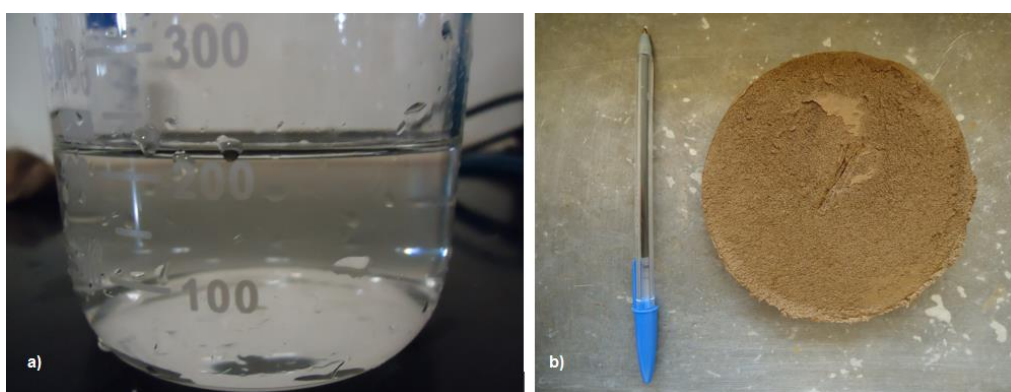


Figura 5.14- a) Filtrado e b) Torta obtida com papel filtro. Fonte: Autoria própria.

Todos os testes preliminares apresentaram baixos níveis de vácuo e volumes de filtrado e tortas com elevada umidade. Dentre os tecidos testados, não foi possível encontrar um único que conciliasse todos os resultados desejados em um teste de filtração. O meio filtrante que foi capaz de realizar a maior TUF refere-se ao 4230-T,

com 0,039 t/h/m², entretanto, o 4520-T trata-se daquele que apresentou a menor umidade de torta, 37,72%. Já a menor porcentagem de sólidos no filtrado, 0,00% foi obtida com o 4400-T.

Em suma, os testes preliminares possibilitaram um conhecimento geral dos tecidos testados. Percebeu-se que com o volume alimentado aos testes, a filtração tornou-se longa. Além de que, a amostragem da polpa, sem o controle de sua porcentagem de sólidos, provoca variações significativas nos parâmetros analisados. Sob essas considerações, procedeu-se a secagem de todo o rejeito fosfático, obteve-se uma massa de 6,190 kg. Tal procedimento fez-se necessário para a obtenção de controle sobre o parâmetro porcentagem de sólidos na alimentação e conseqüentemente, resultados mais precisos.

5.4.1 Determinação da porcentagem de sólidos ideal para a filtração

As condições obtidas para cada uma das porcentagens de sólidos utilizando-se papel filtro encontram-se resumidas na Tabela 5.5 e completas no Anexo B - VARIÇÃO DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS PARA O PAPEL FILTRO.

Tabela 5.5- Resultados dos testes com papel de filtro.

| Sólidos alimentação | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Umidade torta (%) | Espessura torta (cm) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
|---------------------|--------------|------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 20 | 400 | 8,09 | 23,6 | 42,86 | 0,9 | 0,00 | 0,0123 |
| 20 | 400 | 8,30 | 23,8 | 42,86 | 0,9 | 0,04 | 0,0140 |
| 40 | 350 | 7,88 | 23,4 | 40,00 | 1,2 | 0,09 | 0,0590 |
| 40 | 380 | 7,87 | 23,6 | 40,24 | 0,9 | 0,07 | 0,0602 |
| 60 | 380 | 7,55 | 25,4 | 32,33 | 1,4 | 0,00 | 0,1265 |
| 60 | 450 | 7,59 | 25,5 | 35,00 | 1,4 | 0,00 | 0,1492 |

Verifica-se que, o aumento da quantidade de sólidos contidos na polpa ocasiona a formação de tortas com menor umidade. A Figura 5.15 mostra o aspecto das tortas secas obtidas com 20, 40 e 60% de sólidos. Nota-se que quanto menor a porcentagem de sólidos da polpa alimentada no filtro menor é a espessura da torta e mais irregular torna-se o formato, pois ao verter o funil no recipiente coletor, a fina camada de material permanece aderida ao papel, necessitando-se raspar a torta, e por esta ação, a mesma perde a forma desejada.

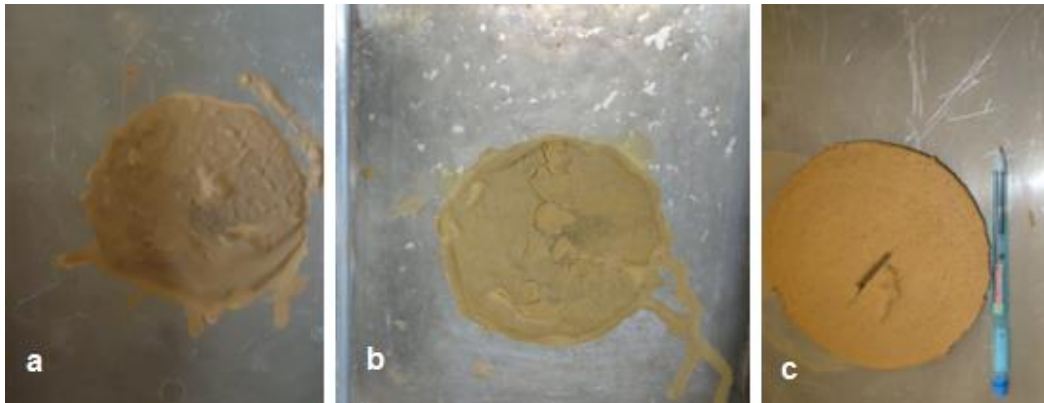


Figura 5.15- Tortas formadas com as diferentes porcentagens de sólidos: a) 20%; b) 40% e c) 60%. Fonte: Autoria própria.

A caneta apresentada na Figura 5.15c funciona como um fator de escala, medindo 13,7 cm de comprimento, enquanto a torta apresenta 12,5 cm (diâmetro). Na mesma imagem, verifica-se a presença de um orifício retangular no centro da torta, obtida para o teste com 60% de sólidos, pois neste local houve a introdução de uma espátula metálica na torta úmida e com a sua retirada, a espessura da torta fica marcada no objeto, pode-se então efetuar a leitura com uma régua milimetricamente graduada.

Sempre permanece material remanescente aderido ao meio filtrante, impossível de ser totalmente retirado mediante raspagem, o que justifica o fato das massas de sólidos presentes no filtrado e torta seca não serem equivalentes a quantidade alimentada (Tabela 4.3) ao teste. No mais, a raspagem também agride o elemento, podendo ocasionar rupturas e até descosturar os tecidos, por isso, neste caso, recomenda-se a utilização de espátulas plásticas quanto for necessário.

Com 40% de sólidos a dificuldade de descarga diminui, e com 60%, torna-se ainda menor, e a torta apresenta aspecto firme. Nestas condições, mais puro tornou-se o filtrado, no que diz respeito à quantidade de sólidos presentes (0,00%), pois quanto ao aspecto, todos aquelas obtidos com as três condições, mostram-se clarificados (Figura 5.16). Devido à diminuição de água na polpa, havia menos líquido a ser filtrado, conseqüentemente o tempo de ciclo do processo diminuiu e a taxa unitária de filtração aumentou.

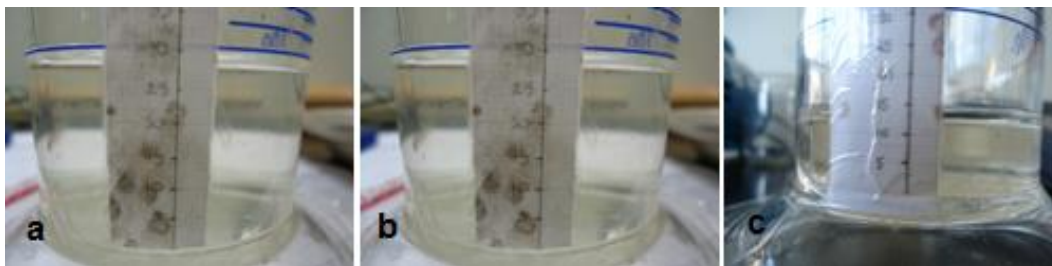


Figura 5.16- Filtrados coletados com as diferentes porcentagens de sólidos: a) 20%; b) 40% e c) 60%. Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, foi possível encontrar em uma polpa com 60% de sólidos, as melhores condições: menor umidade da torta (32,33%), facilidade de descarga, clarificação do filtrado (0,00% de sólidos), e maior taxa unitária de filtração (0,1492 t/h/m²). França & Casqueria (2007) explicam que, polpas mais densas apresentam maiores TUFs, e que, também, quando a quantidade de sólidos suspensos for elevada, ou se esses sólidos forem de granulometria muito fina, o espalhamento das partículas sólidas na formação da torta pode ocorrer de maneira irregular, aumentando a espessura da torta. Observa-se então, que, conforme o esperado pela literatura, a maior espessura de torta foi encontrada neste patamar.

Outro ponto notável refere-se aos elevados níveis de pressão de vácuo alcançados com a utilização do papel filtro, o que pode ser atribuído à baixa resistência que o elemento oferece, em comparação aos meios filtrantes feitos com tecidos, mais espessos e de maior gramatura.

Pelos bons resultados encontrados, a polpa com 60% foi escolhida para a filtração utilizando-se os tecidos.

5.5 TESTES DE FILTRAÇÃO: AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS

Visando-se escolher o tecido filtrante que fornecesse as melhores condições de filtração, foram avaliados os parâmetros: nível de vácuo; pH; temperatura (T); umidade da torta; espessura (esp.); volume de filtrado; porcentagem de sólidos no filtrado e taxa unitária de filtração (TUF). O ANEXO C - AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS apresenta os resultados completos obtidos com as filtrações de 200 ml de polpa de rejeito fosfático, um volume menor do que o adotado nos testes preliminares

(350 ml), a 60% de sólidos e tempo de ciclo fixo em 40 min, realizadas com os tecidos 4384, 4230, 4400 e 4520. A Tabela 5.6 apresenta o resumo dos resultados.

Tabela 5.6- Resultados dos testes de folha para os tecidos.

| Tecido | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Umidade torta (%) | Espessura torta (cm) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
|--------|--------------|------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 4384 | 100 | 7,70 | 22,7 | 34,78 | 1,3 | 5,30 | 0,034 |
| 4384 | 150 | 7,65 | 26,0 | 32,35 | 1,5 | 0,30 | 0,035 |
| 4230 | 150 | 7,71 | 27,0 | 39,04 | 1,1 | 0,00 | 0,034 |
| 4230 | 130 | 7,68 | 27,0 | 39,04 | 1,1 | 1,43 | 0,034 |
| 4400 | 250 | 7,75 | 26,5 | 28,68 | 1,9 | 0,09 | 0,035 |
| 4400 | 250 | 7,55 | 25,5 | 27,91 | 2,3 | 0,00 | 0,035 |
| 4520 | 200 | 7,53 | 25,8 | 28,68 | 2,2 | 0,02 | 0,035 |
| 4520 | 100 | 7,56 | 25,5 | 31,39 | 2,1 | 0,09 | 0,036 |

Observa-se que o maior nível de vácuo, 250 mmHg, foi alcançado com o tecido 4400, o qual, dentre os 4 submetidos à avaliação, apresenta a menor permeabilidade ao ar, 0,4-1,5 m³/min/m² (Tabela 4.2). Se o volume de ar possível de atravessar os poros do elemento é menor, o elemento oferece uma resistência maior a sua passagem, logo é de se esperar então, que a pressão de sucção exercida sob este seja também maior. Para os demais tecidos, os níveis mantiveram-se próximos nos dois testes realizados com cada um, exceto para o 4520, onde, no primeiro teste, foi possível alcançar até 200 mmHg, já no segundo, o tecido desprende-se do anel fixador neste mesmo patamar, necessitando-se diminuir a pressão de sucção para um valor seguro, em torno de 100 mmHg.

Vaz *et al.* (2014) em um estudo similar, também apresentou níveis de pressão de vácuo bastante próximos a estes para as telas 4230, 4400 e 4520. O mesmo ainda justifica que, a ocorrência de baixas pressões além de ser atribuída a altas permeabilidades dos meios, pode ser ocasionada pela presença de dutos capilares na pasta, que permitem a passagem de um fluxo de água, porém não de forma espontânea.

O monitoramento do pH indica que as polpas permaneceram-se alcalinas após a flotação, onde o pH foi regulado a 9,5 mediante adição de NaOH. Nos testes efetivos não se fez necessário a adição de reagentes reguladores de pH, pois todos os tecidos

apresentam resistência química ótimo tanto à álcalis quanto a ácidos. O mesmo acontece com a temperatura, todos os elementos resistem a temperaturas elevadas, de até 100° C. As polpas foram filtradas em dias distintos, nota-se que as variações na temperatura ambiente ocasionaram diferenças nas temperaturas da polpa. Durante os testes estas mantiveram-se amena, entre 22,7 e 27°C.

Quanto às massas sólidas (secas da torta e do filtrado), dificilmente estas seriam equivalentes as 190,8 g adicionados a alimentação, devido à dificuldade no desprendimento da torta, citada no *item 5.4.1 Definição porcentagem de sólidos ideal para a filtração*. Mesmo a 60% de sólidos, houveram perdas de material aderido ao tecido. Com o 4230, o déficit foi em torno de 6,70% (12,8 g), logo este meio poroso trata-se daquele com a maior dificuldade de descarga, cenário semelhante para o 4384, com perda de 5,7% (10,8 g). Já para os tecidos 4520 e 4400 as perdas foram menores, em torno de 3,56 % (6,8 g) para ambos.

Assim como as perdas de material, a umidade das tortas também foi menor para os tecidos 4520 e 4400, 31,39 e 28,68%, respectivamente. Pois, com estes, o volume de água filtrada também foi elevado em comparação aos outros tecidos. Quanto maior o volume de filtrado obtido, menos úmidas foram as tortas, mais rígidas e também mais espessas. A Figura 5.17 mostra um comparativo entre as tortas obtidas com cada um dos tecidos.



Figura 5.17- Tortas geradas com os quatro tecidos. Fonte: Autoria própria.

Quanto à porcentagem de sólidos presente nos filtrados, os menores valores também foram alcançados para os dois tecidos com as tortas menos úmidas, 4520 e

4400. A Figura 5.18 mostra o aspecto dos filtrados obtidos. Visualmente, a turbidez é maior para os dois primeiros tecidos, pois, conforme os cálculos, a maior porcentagem de sólidos também pertence a estes, entre 1,43 (4320) e 5,3% (4384).

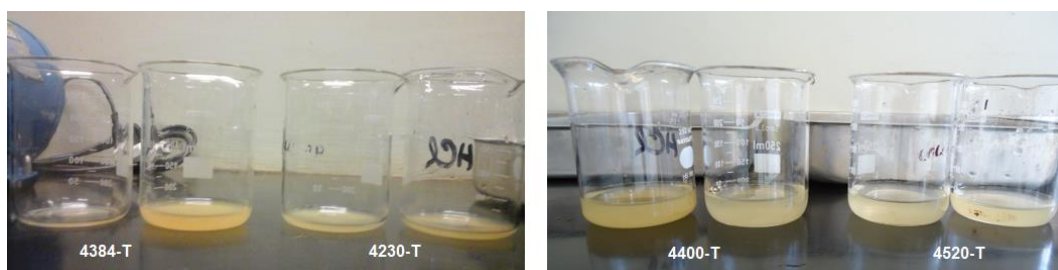


Figura 5.18- Filtrados coletados para os quatro tecidos. Fonte: Autoria própria.

Por fim, em relação à TUF, os valores são praticamente idênticos para todos os tecidos, pois conforme citado anteriormente, o tempo de ciclo foi fixado em 40 min, a área de filtração também era a mesma ($0,00785 \text{ m}^2$), restando-se apenas a massa seca da torta como fator de incremento/decremento da TUF. E, como estes valores também mantiveram próximos, a TUF permaneceu entre $0,034$ e $0,036 \text{ t/h/m}^2$.

Com base em todos os aspectos avaliados, a seleção entre os meios porosos restringiu-se a somente dois deles, 4400 e 4520. O desempate ficou a critério da estabilidade da pressão de vácuo, e do aspecto do tecido após o uso. O último apresentou descostura de sua trama nas bordas, e, também foram encontrados alguns fios aderidos a torta seca. Para submetê-lo a novos usos, seria necessário o corte das áreas já descosturadas, o que reduziria o tamanho do elemento, impossibilitando o seu encaixe aos tubos e anéis disponíveis (Figura 5.19). Além do mais, havia o risco desse não resistir a mais aplicações.

Por fim, o primeiro tecido, 4400, também apresentou desgaste. Verificou-se a presença de pequenos desfiamentos, entretanto, em menor quantidade, e de difícil descostura, sendo então, designado com o melhor tecido sob as condições trabalhadas. A Figura 5.20 ilustra um comparativo entre ambos os tecidos após o uso.



Figura 5.19- Detalhe da descostura do tecido 4520-T após uso. Fonte: Autoria própria.



Figura 5.20- Tecidos 4520-T e 4400-T após os usos. Autoria própria.

5.6 TESTES DE FILTRAÇÃO: AVALIAÇÃO DA PORCENTAGEM DE SÓLIDOS PARA O MEIO POROSO 4400-T

Para a geração do resultado final, atendendo ao terceiro objetivo proposto, submeteu-se o tecido 4400-T a novos testes de filtração, variando-se a porcentagem de sólidos da polpa de rejeito em 20, 40 e 60%, a fim de se verificar se a condição ideal definida anteriormente com papel de filtro, no *item 5.4.1 Definição da porcentagem de sólidos ideal para a filtração*, confirma-se para este tecido.

O ANEXO D - VARREDURA DAS PORCENTAGENS DE SÓLIDOS PARA O TECIDO 4400-T apresenta os valores obtidos com os três patamares citados. De maneira resumida, esses estão presentes na Tabela 5.7. Novamente fixou-se, o volume da polpa de alimentação em 200 ml e o vácuo em 250 mmHg. Desta vez, o tempo de ciclo foi monitorado para cada um dos testes, e não mantido constante, possibilitando assim, a geração de diferentes TUFs.

Tabela 5.7- Resultados dos testes para o tecido 4400-T.

| Sólidos (%) | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Umidade torta (%) | Espessura torta (cm) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
|-------------|--------------|------|------------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| 20 | 250 | 7,85 | 22,6 | 39,40 | 0,3 | 0,02 | 0,017 |
| 20 | 250 | 7,79 | 23,6 | 37,50 | 0,5 | 0,00 | 0,022 |
| 40 | 250 | 7,78 | 24,0 | 36,36 | 1,8 | 0,02 | 0,047 |
| 40 | 250 | 7,76 | 24,0 | 36,00 | 1,4 | 0,02 | 0,049 |
| 60 | 250 | 7,60 | 25,4 | 33,08 | 2,1 | 0,00 | 0,091 |
| 60 | 250 | 7,63 | 25,3 | 32,31 | 2,4 | 0,00 | 0,097 |

A 20% de sólidos, os problemas operacionais obtidos com o papel filtro repetiram-se com o tecido. Houve dificuldade de descarga da torta, e no aferimento de sua espessura, por ser muito fina; a grande quantidade de água a ser filtrada carregou sólidos para o filtrado, aumentando a turbidez; bem como os tempos de ciclo apresentaram-se extensos, 18 e 14 min. Este fator aliado à baixa quantidade de material seco, conferiu a esta condição experimental as menores TUFs.

Já a 40% de sólidos as mesmas adversidades estiveram presentes, entretanto, os tempos de ciclo foram um pouco menores, em torno de 16 e 15 min, e com massas secas maiores, as TUFs elevaram-se significativamente. Com 60%, as tortas

mostraram-se ligeiramente mais consistentes, os filtrados de aspecto mais claro e os tempos de ciclo reduziram-se para 15 e 14 min, gerando as maiores TUFs.

As Figuras 5.21 e 5.22 mostram um comparativo entre as tortas e os filtrados gerados, respectivamente.

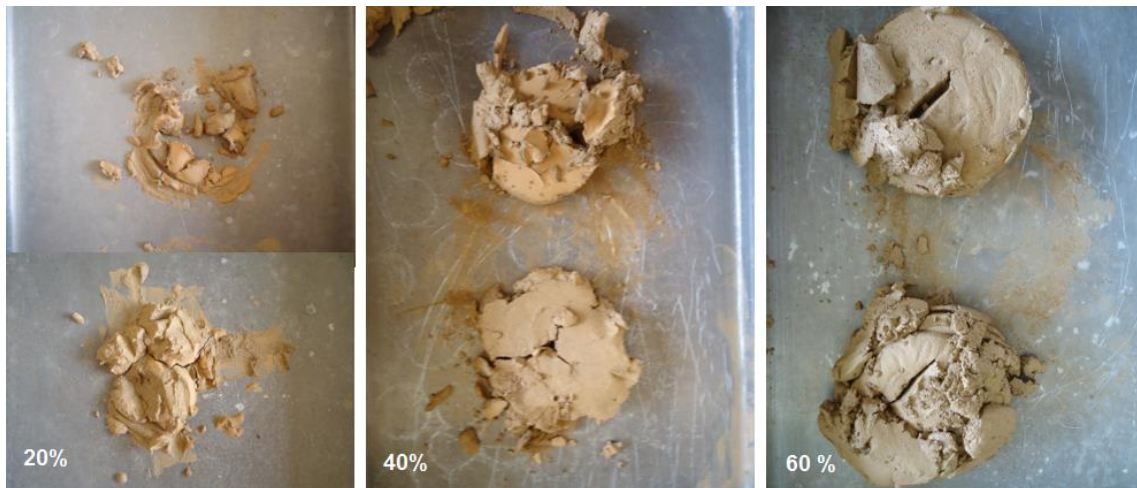


Figura 5.21- Tortas formadas com as três diferentes porcentagens de sólidos. Fonte: Autoria própria.

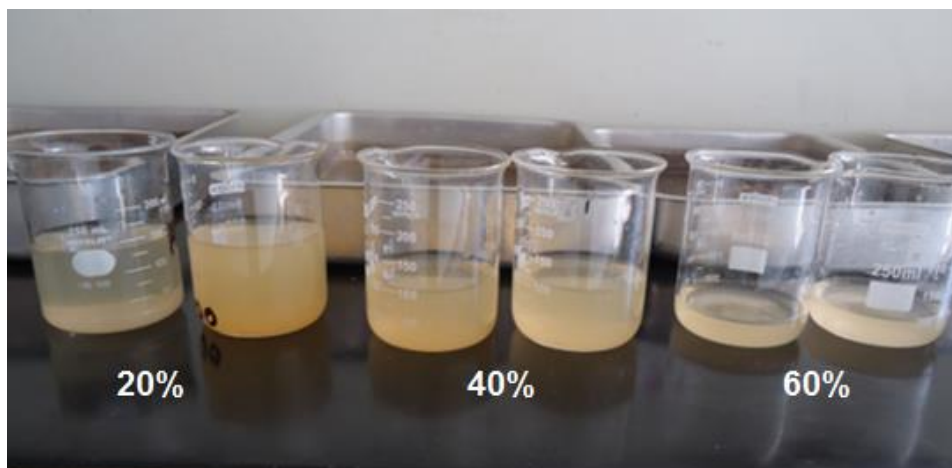


Figura 5.22- Filtrados coletados com as três diferentes porcentagens de sólidos. Fonte: Autoria própria.

Pode-se confirmar através da leitura dos dados expostos e das imagens acima, que, realmente a 60% de sólidos obtém-se os melhores resultados para a filtração

utilizando-se o meio poroso 4400-T: menor umidade da torta e filtrado mais puro, além de maiores TUFs, pois nesta condição, o tempo de ciclo tornou-se menor, devido principalmente à maior massa alimentada, e ao menor volume de água a ser filtrado.

A filtração no processamento mineral é usualmente realizada após espessamento. A polpa espessada com concentração de sólidos em peso superior a 60%, é diretamente alimentada aos filtros, descreve Oliveira *et al.* (2004). Portanto, o resultado final comprova que é possível a realização de testes de filtração laboratoriais empregando-se o parâmetro operacional, porcentagem de sólidos da polpa, idêntico ao patamar industrial.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou meios porosos utilizados em filtração empregando-se rejeito fosfático, gerado a partir da concentração de minério proveniente da Vale Fertilizantes S/A - Unidade Tapira. A metodologia procedida para o alcance do objetivo foi realizada no Laboratório de Tratamento de Minérios - CEFET/ MG, contemplando uma rota típica do beneficiamento de minérios composta por secagem, homogeneização, britagem, moagem, peneiramento, deslamagem, flotação e filtração.

Dentre as 8 amostras de meios porosos, apenas 5 tiveram condições de serem avaliadas: 4390-T, 4383-T; 4230-T; 4520-T e 4400-T. Entre todos os elementos filtrantes avaliados, o 4400-T foi capaz de produzir a 60% de sólidos, a torta mais seca e espessa, o filtrado mais limpo e a maior taxa unitária de filtração, além de alcançar as maiores pressões de vácuo. Devido a esses fatores, e comprovado o seu desempenho, o mesmo foi designado como o melhor meio poroso para a filtração de rejeito fosfático, dentre os meios testados nesse trabalho.

Efetuando-se uma varredura das porcentagens de sólidos nos três patamares estudados (20,40 e 60%) com o tecido escolhido, pode-se reafirmar que a 60% de sólidos da alimentação, obtém-se os melhores resultados: umidade da torta a 32,31%; espessura de 2,4 cm, filtrado clarificado com 0,00% de sólidos e elevada taxa unitária de filtração, 0,097 t/h/m².

Finalmente, a filtração de rejeitos representa uma alternativa valiosa para o atual cenário das mineradoras. Pois, ao proceder-se a esta operação, volumes significativos de água são extraídos, os quais podem ser retomados ao beneficiamento de minérios, gerando-se economia. Além de que, a disposição de polpas de rejeito menos diluídas, requer áreas menores para construção de barragens, e representam impactos ambientais menos significativos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de novos testes de filtração com as demais amostras de meio porosos não utilizados aqui neste trabalho, estudando-se o nível de vácuo adequado para cada tecido. Bem como o emprego de reagentes auxiliares de filtração que possam contribuir para um melhor desempenho do processo.

Uma outra sugestão, refere-se à realização de uma análise econômica da viabilidade da filtração de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT (Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos). 1991. **Tecidos técnicos**. Disponível em: <<http://www.abint.org.br/tecidostecnicos.html>>. Acesso em: 01 mar. 2016.

AMARANTE, S. C. 2002. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner**. (Dissertação de mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 137 p.

BEZERRA, M. A. & BROD, J. A., 2011. **Mineralogia da Apatita do Complexo Alcalino-Carbonatítico de Tapira**. Universidade Federal de Goiás, 14 p.

CHAVES, A.P., 2013. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, v. 2, 4. ed., 240 p.

CRUZ P.T.,1973. **Estabilidade de Taludes**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. USP, 103 p.

DIAS, C. D. L. P., SILVA, L. M. D., PERES, A. E. C. & VALADÃO, G. E. S., 2004. **Utilização de reagentes auxiliares na filtragem**. Revista Escola de Minas: Ouro Preto, p. 229-234.

DORR-OLIVER, 1972. **Filtration leaf test procedures**. Stamford: Dorr- Oliver Inc.

FERRARI, V. C., 2000. **Fosfatos Primários e Secundários nos Perfis de Intemperismo sobre os Maciços Alcalino-Carbonatíticos de Juquiá (SP), Anitápolis (SC) e Tapira (MG)**. (Tese de doutorado). Programa de Pós-Graduação

em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo: 218p.

FRANÇA, S.C.A.; CASQUEIRA, G. R, 2007. **Ensaio de filtragem em filtro de folha (leaf test)**. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. e ALMEIDA, S.L.M. (Ed.). Tratamento de Minérios. Práticas Laboratoriais. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p. 573-607.

FRANÇA, S.C.A.; MASSARANI, G., 2004. **Separação sólido-líquido**. In: LUZ, A.B., SAMPAIO, J.A. e ALMEIDA, S.L.M. (Ed.). Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 4.ed.,p. 411-422.

GUIMARÃES, N.C., VALADÃO, G.E.S. & PERES, A.E.C., 2011. **Comparativo de tecnologias de filtragem aplicada a rejeitos de minério de ferro**. In: 41º Seminário de redução do minério de ferro e matérias primas. Vila Velha, 10p.

LOUREIRO, F. E. L., MONTE, M. B. D. M. & NASCIMENTO, M., 2008. **Agrominerais-Fosfato**. In: (Ed.). Rochas e Minerais Industriais. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p.141-180.

MINÉRIOS & MINERALES, 2012. **Tapira/Fosfato**. Disponível em: <www.minerios.com.br/EdicoesInt/1171/31/TAPIRA__FOSFATO.aspx>. Acesso em: 25 fev. 2016.

OLIVEIRA, M. L. M. D., LUZ, J. A. M. D. & LACERDA, C., M. M., 2004. **Filtragem**. Apostila de espessamento e filtragem. Ouro Preto, UFOP, 122 p.

OLIVEIRA, M, S., 2015a. **Filtragem**. Disciplina de separação sólido- líquido. Araxá, CEFET, 59 p.

OLIVEIRA, M.S., 2015b. **Apostila de prática experimental de tratamento de minérios**. Araxá, CEFET, 49p.

PINTO, C. L. L., DUTRA, J. I. G., SALUM, M. J. G., GANIME, J. F. & OLIVEIRA, M. S., 2011. **Estudo de caso: principal polo produtor de fosfato e nióbio do país**. Araxá, 24 p.

REIS, R. C. 2010. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira-MG**. (Dissertação de mestrado). Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 145 p.

SILVA, F. B. R. D. 2016. **Análise das principais variáveis na flotação industrial do complexo de mineração de Tapira**. (Dissertação de mestrado). Pesquisa e desenvolvimento de processos químicos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. 176 p.

SILVA, J. C. F., SOUZA, H. S. & BARROS, L. A. F., 2004. **Estudo de otimização dos sistemas mecanicamente agitados, no complexo de mineração de Tapira**. Tapira, 9 p.

SILVA, L. A. 2015. **Avaliação do tempo de condicionamento, dosagem de reagentes e granulometria para flotação de fosfato em coluna**. (Trabalho de conclusão de curso). CEFET MG, Araxá, 2015. 86 p.

STAUCH, C., 2013. **Tecidos Técnicos para Filtração**. Seminário de filtração, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 22 p.

TURRER, H. D. G., JUNIOR, A. M. A., DOELLINGER, T. M., & ZUCHI, M. A., 2010. **Uso de coagulantes para manutenção do desempenho da filtração de minério de ferro.** Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v.7,n. 1-2, p. 42-48.

VALADÃO, G. E. S., 2012. **Separação sólido- líquido.** In: Ufmg (Ed.). Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte, v.2., p.141-161.

VAZ, J., SILVA, E. M. S., ARAÚJO, V. R., 2014. **Desaguamento de lama de rocha fosfática: pasta mineral.** In: Seminário de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Regional Catalão. Coletânea Interdisciplinar em Pesquisa, Pós Graduação e Inovação. Goiás, v. 3, n. 11, p. 170-186.

ANEXO A- RESULTADOS DOS TESTES PRELIMINARES

Tabela A 2- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4230-T.

| TECIDO 4230 | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Teste | Vácuo (mmHg) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 1 | 130 | 536 | 210 | 60,82 | 39,18 | 50 | 46,09 | 0,31 | 0,67 | 0,036 |
| 2 | 130 | 490 | 232 | 52,65 | 47,35 | 50 | 46,34 | 2,26 | 4,88 | 0,039 |
| 3 | 130 | 286 | 56 | 80,41 | 19,58 | 98 | 135,94 | 3,41 | 2,51 | 0,0095 |

Tabela A 3- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4384-T.

| TECIDO 4384 | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Teste | Vácuo (mmHg) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 1 | 160 | 390 | 110 | 71,79 | 28,20 | 70 | 81,01 | 0,26 | 0,32 | 0,019 |
| 2 | 160 | 530 | 122 | 76,98 | 23,02 | 70 | 67,72 | 0,23 | 0,34 | 0,021 |
| 3 | 160 | 440 | 164 | 62,73 | 37,27 | 68 | 67,85 | 0,20 | 0,29 | 0,028 |

Tabela A 4- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4400-T.

| TECIDO 4400 | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Teste | Vácuo (mmHg) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 1 | 190 | 700 | 48 | 93,15 | 6,85 | 95 | 88,21 | 0,10 | 0,11 | 0,0081 |
| 2 | 190 | 254 | 46 | 81,89 | 18,11 | 98 | 97,51 | 0,07 | 0,07 | 0,0078 |
| 3 | 190 | 344 | 174 | 49,41 | 50,58 | 98 | 78,67 | 0,00 | 0,00 | 0,0290 |

Tabela A 5- Parâmetros operacionais quantificados para o tecido 4520-T.

| TECIDO 4520 | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Teste | Vácuo (mmHg) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 1 | 50 | 204 | 120 | 41,17 | 58,82 | 195 | 188,59 | 0,11 | 0,058 | 0,020 |
| 2 | 100 | 228 | 142 | 37,72 | 62,28 | 195 | 191,19 | 0,05 | 0,026 | 0,024 |
| 3 | 100 | 240 | 136 | 43,33 | 56,67 | 195 | 186,90 | 0,06 | 0,032 | 0,023 |

Tabela A 6- Parâmetros operacionais quantificados com papel filtro.

| PAPEL FILTRO | | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Teste | Vácuo (mmHg) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 1 | 500 | 192 | 132 | 31,25 | 68,75 | 206 | 212,36 | 0,14 | 0,066 | 0,0258 |
| 2 | 440 | 188 | 150 | 20,21 | 79,79 | 206 | 209,34 | 0,07 | 0,033 | 0,0293 |

ANEXO B- VARIAÇÃO DAS PORCENTAGENS DE SÓLIDOS

Tabela B 2- Variação das porcentagens de sólidos para o papel filtro.

| PAPEL FILTRO | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Sólidos alimentação (%) | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Espessura torta (cm) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 20 | 400 | 8,09 | 23,6 | 70 | 40 | 42,86 | 57,14 | 0,9 | 157 | 141,14 | 0,00 | 0,00 | 0,0123 |
| 20 | 400 | 8,30 | 23,8 | 70 | 40 | 42,86 | 57,14 | 0,9 | 155 | 147,49 | 0,04 | 0,04 | 0,0140 |
| 40 | 350 | 7,88 | 23,4 | 160 | 96 | 40,00 | 60,00 | 1,2 | 100 | 90,68 | 0,09 | 0,09 | 0,0590 |
| 40 | 380 | 7,87 | 23,6 | 164 | 98 | 40,24 | 59,76 | 0,9 | 95 | 86,29 | 0,06 | 0,07 | 0,0602 |
| 60 | 380 | 7,55 | 25,4 | 266 | 180 | 32,33 | 67,67 | 1,4 | 45 | 40,48 | 0,00 | 0,00 | 0,1265 |
| 60 | 450 | 7,59 | 25,5 | 280 | 182 | 35,00 | 65,00 | 1,4 | 45 | 31,73 | 0,00 | 0,00 | 0,1492 |

ANEXO C- AVALIAÇÃO DE MEIOS POROSOS

Tabela C 2- Avaliação de meios porosos.

| MEIOS POROSOS | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------|------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Tecido | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Espessura torta (cm) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 4384 | 100 | 7,70 | 22,7 | 276 | 180 | 34,78 | 65,22 | 1,3 | 9 | 1,13 | 0,06 | 5,30 | 0,034 |
| 4384 | 150 | 7,65 | 26,0 | 272 | 184 | 32,35 | 67,65 | 1,5 | 20 | 10 | 0,03 | 0,30 | 0,035 |
| 4230 | 150 | 7,71 | 27,0 | 292 | 178 | 39,04 | 60,96 | 1,1 | 18 | 5,46 | 0,00 | 0,00 | 0,034 |
| 4230 | 130 | 7,68 | 27,0 | 292 | 178 | 39,04 | 60,96 | 1,1 | 10 | 4,18 | 0,06 | 1,43 | 0,034 |
| 4400 | 250 | 7,75 | 26,5 | 258 | 184 | 28,68 | 71,32 | 1,9 | 40 | 42,14 | 0,04 | 0,09 | 0,035 |
| 4400 | 250 | 7,55 | 25,5 | 258 | 186 | 27,91 | 72,09 | 2,3 | 42 | 47,81 | 0,00 | 0,00 | 0,035 |
| 4520 | 200 | 7,53 | 25,8 | 258 | 184 | 28,68 | 71,32 | 2,2 | 16 | 44,21 | 0,01 | 0,02 | 0,035 |
| 4520 | 100 | 7,56 | 25,5 | 274 | 188 | 31,39 | 68,61 | 2,1 | 12 | 33,15 | 0,03 | 0,09 | 0,036 |

ANEXO D- VARREDURA DAS PORCENTAGENS DE SÓLIDOS PARA O TECIDO 4400-T

Tabela D 1- Varredura das porcentagens de sólidos para o 4400-T.

| 4400-T | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------|------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|
| Sólidos (%) | Vácuo (mmHg) | pH | Temperatura (°C) | Massa úmida torta (g) | Massa seca torta (g) | Umidade torta (%) | Sólidos torta (%) | Espessura torta (cm) | Volume filtrado (ml) | Massa úmida filtrado (g) | Massa seca filtrado (g) | Sólidos filtrado (%) | TUF (t/h/m ²) |
| 20 | 250 | 7,85 | 22,6 | 66 | 40 | 39,40 | 60,60 | 0,3 | 157 | 143,55 | 0,03 | 0,02 | 0,017 |
| 20 | 250 | 7,79 | 23,6 | 64 | 40 | 37,50 | 62,50 | 0,5 | 162 | 154,91 | 0,00 | 0,00 | 0,022 |
| 40 | 250 | 7,78 | 24,0 | 154 | 98 | 36,36 | 63,64 | 1,8 | 112 | 101,22 | 0,02 | 0,02 | 0,047 |
| 40 | 250 | 7,76 | 24,0 | 150 | 96 | 36,00 | 64,00 | 1,4 | 112 | 104,39 | 0,02 | 0,02 | 0,049 |
| 60 | 250 | 7,60 | 25,4 | 266 | 178 | 33,08 | 66,92 | 2,1 | 50 | 38,31 | 0,00 | 0,00 | 0,091 |
| 60 | 250 | 7,63 | 25,3 | 260 | 176 | 32,31 | 67,69 | 2,4 | 52 | 44,78 | 0,00 | 0,00 | 0,097 |