



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

MATEUS DE PAIVA CARDOSO

**PROTÓTIPO DE UM FILTRO PORTÁTIL PARA REALIZAÇÃO DO
LEAF-TEST POR ALIMENTAÇÃO INFERIOR**

ARAXÁ/MG

2018

MATEUS DE PAIVA CARDOSO

**PROTÓTIPO DE UM FILTRO PORTÁTIL PARA REALIZAÇÃO DO
LEAF-TEST POR ALIMENTAÇÃO INFERIOR**

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

Orientador: Prof.^a Dr.^a Michelly dos Santos Oliveira.

ARAXÁ/MG

2018

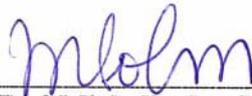
FOLHA DE APROVAÇÃO

MATEUS DE PAIVA CARDOSO

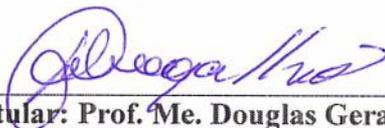
**PROTÓTIPO DE UM FILTRO PORTÁTIL PARA REALIZAÇÃO DO
LEAF-TEST POR ALIMENTAÇÃO INFERIOR**

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

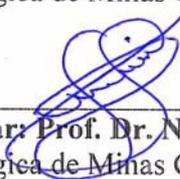
Araxá, 06 de dezembro de 2018.



Presidente e Orientador: Prof.^a Dr.^a Michelly dos Santos Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Douglas Geraldo Magalhães
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Natal Junio Pires
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Dedico este trabalho aos meus pais, razão de minha existência, que com muito amor e apoio permitiram a minha chegada até este ponto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professores, servidores e toda a equipe técnica do CEFET-MG pela paciência e compreensão.

RESUMO

No beneficiamento de minérios, em grande parte, utiliza-se das operações de separação sólido-líquido, encarregadas pela recuperação de água recirculada em todo o processo. Dentre essas operações, inclui-se a filtração, a qual visa a separação dos sólidos (torta) e do líquido (filtrado) através de um meio filtrante. O processo de seleção e avaliação dos filtros depende muitas vezes de um teste laboratorial chamado filtro folha (ou teste de folha). Neste trabalho, devido à falta de uma metodologia e um equipamento (filtro) bem descrito sobre como proceder com o teste, foram coletadas diferentes informações relevantes de fontes diversas a fim de desenvolver um filtro que atenda bem o teste, visando a praticidade e minimização de possíveis erros operacionais. O resultado final foi a produção e montagem do equipamento, bem como a execução de testes de funcionalidade utilizando um rejeito de minério de ferro proveniente de Itatiaiuçu-MG. Os testes mostraram que a utilização do filtro proporcionou melhor qualidade à torta formada. Além de que o filtro em sua montagem completa gerou um aumento de 92% na taxa unitária de filtração, em comparação com a montagem incompleta.

Palavras-chave: Projeto; Protótipo; Filtração; Filtro Folha; Alimentação Inferior.

ABSTRACT

In ore beneficiation, for the most part, operations of solid-liquid separation are used, in charge of restoring the recirculated water of the entire process. Within these operations, there is a filtration which aims to separate solids (cake) and liquid (filtrate) through filter media. The process of selecting and evaluating the filters often depend on a laboratorial test called Leaf Test. In this paper, due to the lack of a methodology and an equipment (filter) well described about how to proceed with the test, different sorts of relevant information were collected from various sources to develop a filter which can provide better results to the test, aiming at practicality and minimization of possible operational errors. The final outcome was the production and assembly of the equipment as well as the performance of functionality tests utilizing an iron ore tailing from Itatiaiuçu-MG. The tests showed that the using of the filter provided a higher quality to the formed cake. Moreover, the filter in its complete assembly generated an increase of 92% in the filtering unit rate, compared to the incomplete assembly.

Key words: Paper Project; Prototype; Filtration; Leaf Test; Bottom Feed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Filtração com Formação de torta.....	3
Figura 2 - Ciclo de Filtragem.....	5
Figura 3 - Filtro de Tambor	7
Figura 4 - Filtro a Disco.....	8
Figura 5 - Filtro Cerâmico	8
Figura 6 - Filtro de Mesa.....	9
Figura 7 - Filtro de correia.....	10
Figura 8 - Filtro prensa.....	10
Figura 9 - Tessituras	13
Figura 10 - Tipos de Fios	14
Figura 11 - Teste de Folha.....	16
Figura 12 - Teste de folha invertido	16
Figura 13 - Suporte para realização do teste de folha invertido.....	17
Figura 14 - Planilha de laboratório para controle de parâmetros operacionais do teste de folha.....	19
Figura 15 - Kit de ensaio de filtragem.	24
Figura 16 - (a) Tela de retenção projetada, (b) Suporte com tela semelhante.	24
Figura 17 - Suporte alternativo.	25
Figura 18 - Variações da posição do filtro.....	26
Figura 19 - Rotâmetro.....	26
Figura 20 - Vacuômetro.	27
Figura 21 - Kit de ensaio de filtragem com suporte de altura.....	28

Figura 22 - Montagem com separação de filtrados.....	29
Figura 23 - Espessura da torta.	31
Figura 24 - Visão 3D do <i>assembly</i> montado visto de cima (esquerda) e por baixo (direita).	35
Figura 25 - Detalhamento do Maciço.	36
Figura 26 – Maciço em 3D.....	36
Figura 27 – Detalhamento da Tela.	37
Figura 28 - Tela em 3D.....	37
Figura 29 - Detalhamento do Anel Menor.	38
Figura 30 - Anel Menor em 3D.....	38
Figura 31 - Dimensionamento do Anel Maior.....	39
Figura 32 - Anel Maior em 3D.....	39
Figura 33 - Dimensionamento do Tubo.....	40
Figura 34 - Tubo em 3D.....	40
Figura 35 - Bucha, Válvula e Bico.....	42
Figura 36 - Filtro pré-montado e vedado.....	43
Figura 37 - Filtro com a Tela encaixada.....	43
Figura 38 - Filtro com o tecido preso.	44
Figura 39 - Filtro com o tecido preso e aparado.	44
Figura 40 - Filtro montado finalizado.	45
Figura 41 - Detalhe das conexões do kitassato.	45
Figura 42 - Montagem completa.	46
Figura 43 - Detalhe superior da montagem.	46
Figura 44 - Rejeito Seco quarteado.	48

Figura 45 - Polpa sendo preparada.	48
Figura 46 - Aferição da Turbidez.	50
Figura 47 - Materiais para a fabricação do filtro.....	51
Figura 48 - Maciço torneado finalizado.	52
Figura 49 - Tela em policarbonato finalizada.	52
Figura 50 - Anel Menor (a), Anel Maior (b).	53
Figura 51 - Tubo finalizado.	53
Figura 52 - Apoio do Filtro.	54
Figura 53 - Comparativo teste 1 (esquerda) e 3 (direita).	55
Figura 54 - Comparativo teste 2 (esquerda) e 4 (direita).	55
Figura 55 - Comparativo dos testes 1 (esquerda) e 2 (direita).....	56
Figura 56 - Comparativo entre os testes 3 (esquerda) e 4 (direita).	56
Figura 57 - Filtrados.....	58
Figura 58 - Aferição da espessura da torta.....	58
Figura 59 - Massa das tortas secas.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matérias-primas e suas características. Fonte: Stauch (2013).	12
Tabela 2 - Efeito da trama sobre a filtragem. Fonte: Chaves (2013).	13
Tabela 3 -Efeito das características do fio sobre a tela. Fonte: Chaves (2013).	15
Tabela 4 - Espessura mínima para descarga da torta. Fonte: Purchas (1981).	30
Tabela 5 - Resultado quantitativos dos testes de folha	57
Tabela 6 - A1 - Distribuição granulométrica do Rejeito de Ferro.	63
Tabela 7 - A2 - Dados do tempo de filtragem.	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição Granulométrica do Rejeito de Ferro.	47
Gráfico 2 - Tempo de Filtragem.	49

LISTA DE SIMBOLOS

ΔP - Diferença de pressão

m – Metro

dm – Decímetro

cm – Centímetro

mm – Milímetro

ft – Pés (feet)

bar – Pressão

rpm – Rotações por minuto

mmHg – Pressão em milímetros de mercúrio

FTU – Unidade de turbidez formazina

Kg – Quilogramas

G – Gramas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	3
2.1. SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO	3
2.1.1. Filtragem	3
2.1.2. Fatores que influenciam a filtragem	4
2.1.3. Ciclo de filtragem	5
2.2. TIPOS DE FILTROS	6
2.2.1. Filtro a vácuo	7
2.2.2. Filtro prensa	10
2.3. MEIOS FILTRANTES	11
2.4. TESTE DE LABORATÓRIO	15
2.4.1. Procedimento para o teste de folha.....	18
2.4.2. Dimensionamento	21
2.4.3. Fatores de Escalonamento.....	22
2.5. CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DO TESTE FOLHA	23
2.6. FATORES QUE INFLUENCIAM O TESTE EM PEQUENA ESCALA	29
2.6.1. Vácuo ou pressão	29
2.6.2. Descarga da torta.....	30
2.6.3. Temperatura da alimentação.....	30
2.6.4. Espessura da torta.....	30
2.6.5. Porcentagem de sólidos na polpa	31
2.6.6. Sistema de agitação.....	31
3. METODOLOGIA	33
3.1. ESCOPO DO PROTÓTIPO.....	33
3.2. PREMISSAS E RESTRIÇÕES	35
3.3. PROJETO CONCEITUAL DO FILTRO	35
3.3.1. Maciço	36
3.3.2. Tela	37
3.3.3. Anel Menor.....	38
3.3.4. Anel Maior.....	39
3.3.5. Tubo.....	40
3.3.6. Apoio para o Filtro	41
3.4. TESTE FUNCIONAL	41

3.4.1. Materiais e equipamentos	41
3.4.2. Teste Preliminar de Filtração.....	42
3.4.3. Amostra e condições operacionais do teste de folha.....	46
3.4.4. Análise qualitativa e quantitativa das tortas.....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1. PROTÓTIPO DO FILTRO.....	51
4.2. TESTE PRELIMINAR	54
4.3. ANÁLISE QUALITATIVA.....	54
4.4. ANÁLISE QUANTITATIVA	57
5. CONCLUSÃO	60
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	63
ANEXO 2 – TEMPO DE FILTRAGEM	64
APÊNDICE – PROJETOS	65

1. INTRODUÇÃO

Na mineração, a fase de separação sólido/líquido possuiu operações unitárias comuns no beneficiamento. Além disso, de acordo com Ruthven (1997) a tecnologia de separação possui um papel dominante em processos químicos industriais. Desde meados da década de 1990, aproximadamente metade do investimento de capital e mais da metade dos custos operacionais estão associados a processos de separação sólido/líquido. Isso, claro, inclui tanto a separação de espécies de produtos químicos quanto a de fases.

Esta etapa é utilizada em muitos processos com um ou mais objetivos, dentre os quais podemos citar: a recuperação de um componente sólido (líquido descartado), recuperação do líquido (sólidos descartados) ou recuperação de ambas fases, sólida e líquida e também a recuperação de nenhuma das fases (por exemplo, quando um líquido está sendo limpo antes de ser descartado, para prevenção de uma poluição da água).

Dentro das operações envolvendo a separação sólido/líquido, encontramos a filtração ou filtração, operação unitária que visa separar os sólidos de uma polpa por meio da passagem do líquido através de um meio poroso, o qual irá reter os sólidos (torta) e eliminará a parte líquida (filtrado) (CHAVES, 2013).

Sabe-se, de acordo com Chaves (2013), que os equipamentos de filtração estão separados em diversos segmentos de acordo com seu mecanismo de funcionamento que está ligado à alguma ação externa como: vácuo, pressão, centrifugação, filtração hiperbárica ou capilar. E deve-se ressaltar, que a alimentação do equipamento pode ser contínua ou descontínua (bateladas).

Para a seleção de equipamentos e meios filtrantes, normalmente utiliza-se testes de laboratórios como: *Leaf-Test*, *Vacuum Filter Leaf*, *Capillary Suction Time* (CST) entre outros com o intuito de definir as condições da polpa e respostas operacionais em relação à pressão (que normalmente é tida como uma constante nos testes).

Para filtros a vácuo (principalmente tambor e discos) a obtenção de resultados laboratoriais satisfatórios é um pouco mais complexa, pois os testes, para diversas fontes, não seguem um padrão, o que pode interferir na reprodutibilidade dos

resultados obtidos sobre o tempo de filtração e secagem. Além disso, não se observa disponibilidade de equipamento portátil que execute de maneira rápida e eficiente a filtração por alimentação inferior.

Devido à falta de um projeto de filtro e uma norma que explique mais detalhadamente todos os cuidados para a execução do teste, a metodologia fica à mercê do entendimento de cada empresa e técnico. Assim, a proposta deste trabalho é desenvolver um protótipo de filtro portátil que permita a realização do *Vacuum Filter Leaf* de forma a maximizar a eficiência de execução, minimizar erros operacionais e fornecer uma torta de forma representativa. Além disso, utilizar o suporte desenvolvido executando testes com alimentação inferior para validação do equipamento. Bem como, realizar uma análise qualitativa e quantitativa da torta para o rejeito de minério de ferro da empresa Minerita - Itatiaiuçu-MG.

Visando-se alcançar os objetivos, dividiu-se o trabalho em 6 capítulos. Onde o Capítulo 2 apresenta um referencial teórico introdutório sobre a separação sólido-líquido, a filtração e seus equipamentos, seguido dos meios filtrante e por fim o teste laboratorial e seu detalhamento. O Capítulo 3, descreve a metodologia utilizada no projeto do protótipo e no experimento de validação do equipamento além de discorrer detalhadamente sobre sua fabricação e toda montagem do teste. Com o equipamento devidamente fabricado e validado por um teste experimental, o Capítulo 4 apresenta os resultados do teste e suas discussões. Por fim, são apresentadas nos Capítulos 5 e 6 as conclusões e as referências bibliográficas, respectivamente.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1. SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

A separação sólido-líquido é uma das fases utilizadas nas usinas de beneficiamento mineral. Dentre os objetivos desta etapa, visa-se a recuperação de água do beneficiamento, a adequação das características da polpa para processos subsequentes, o desaguamento final do concentrado e a redução do volume de rejeito para sua deposição (VALADÃO, 2010).

Na mineração, a separação sólido-líquido consiste na separação de uma polpa em duas fases. Embora a filtragem seja bem eficiente na maioria das separações, existe uma vasta gama de outras técnicas e equipamentos disponíveis, tais como peneiramento, ciclonagem, espessamentos e outros.

Existem unidades altamente versáteis capazes de lidar com diferentes funções de filtragem e também há aquelas restritas em uso por propriedades do fluido e seu condicionamento como: espessamento, filtragem, centrifugação, peneiramento, secagem, separação magnética entre outros (WAKEMAN e TARLETON, 2005a).

2.1.1. Filtragem

De acordo com Chaves (2013), filtragem é uma das operações da separação sólido-líquido que consiste na separação das partículas sólidas (torta) e do líquido (filtrado) de uma polpa pela passagem desta por um meio filtrante. Este processo pode ser realizado por vácuo, sob pressão, centrifugação, filtragem hiperbárica ou capilar. A Figura 1 apresenta uma ilustração mais clara sobre o processo de filtração.

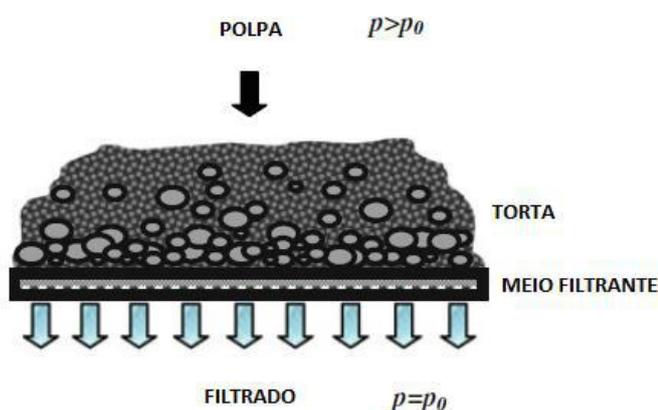


Figura 1 - Filtração com Formação de torta
Fonte: Concha (2014).

Os meios filtrantes possuem aberturas menores que as partículas constituintes da polpa. Desde que eles possuam diâmetro menores, as partículas penetram seu interior e são capturadas pela fibra ou pelas partículas que formam a torta durante o processo. Este tipo de meio filtrante perde suas propriedades com o tempo, e é necessário limpá-lo para eliminar as partículas do seu interior ou substituí-lo (CONCHA, 2014).

Sabe-se, que os filtros utilizados em processos industriais estão disponíveis em uma ampla variedade de formas, capazes de lidar com diferentes aplicações de filtração incluindo aqueles para fluidos específicos e condições de processo distintas, para pequena e grande escala e operações contínuas ou em lote.

Os filtros contínuos são essencialmente capazes de tratar continuamente uma alimentação de polpa, fazendo a sucção, lavagem e descarga da torta, sem interromper o fluxo da alimentação do processo, enquanto os filtros descontínuos são incapazes de executar a mesma gama de funções, sendo principalmente interrompido para descarga da torta.

2.1.2. Fatores que influenciam a filtração

De acordo com Sampaio et al. (2007), existem algumas variáveis que interferem diretamente na eficiência da filtração, como:

- Propriedades do fluido: viscosidade, temperatura densidade da polpa,
- Propriedades do sólido: tamanho, forma e distribuição de tamanho,
- Propriedades da suspensão: concentração e compressibilidade,
- Capacidade do equipamento,
- Valor comercial do material e se o sólido ou o fluido é o material valioso,
- Necessidade de lavar a torta,
- Presença de condicionantes como: corretores de pH, floculante, coletor e outros reagentes.

2.1.3. Ciclo de filtração

Como descrito por Concha (2014), os equipamentos de filtração a vácuo operam com o seguinte ciclo básico: formação de torta, lavagem, secagem e descarga da torta. A Figura 2 mostra a representação das quatro etapas em um filtro de tambor.

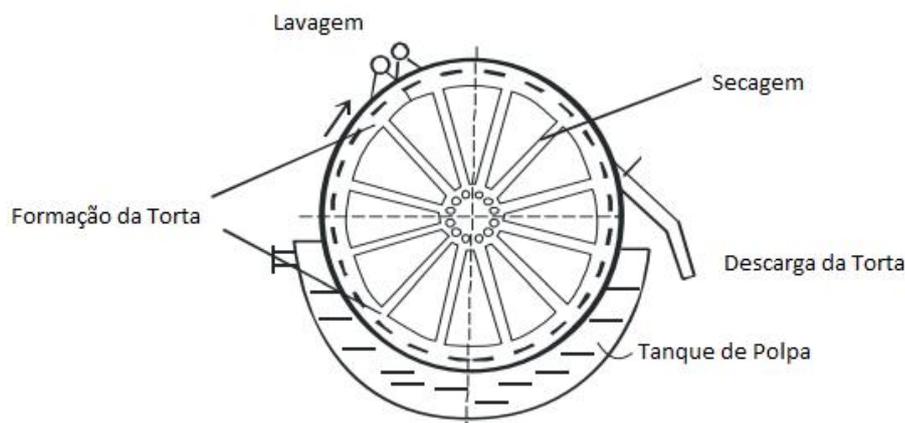


Figura 2 - Ciclo de Filtração

Fonte: Adaptação de imagem retirada de Sampaio et al. (2007).

A primeira etapa em um processo de filtração é a formação da torta, onde alimenta-se a polpa na câmara do filtro para filtração sobre pressão, ou a suspensão de partículas sólidas é sugada através do meio filtrante durante a filtração a vácuo. A quantidade de material depositado depende do gradiente de pressão, da concentração de partículas suspensas e do tempo de filtração. Nesta fase, existe um fluxo contínuo de filtrado através da torta e do meio filtrante.

A lavagem faz parte do processo quando é necessário eliminar as impurezas da torta. Lavar a torta implica calcular uma mínima quantidade de água necessária para retirar o licor dos poros da torta e seu tempo necessário.

A secagem é uma parte fundamental do processo de filtração. Para Chaves (2013), é importante que a torta possua uma umidade baixa, em torno de 10%, dependendo do produto. Normalmente, a secagem é realizada por sucção ou sopro sobre a torta. Para controlar esta parte do processo é necessário saber a quantidade de água retida em uma torta saturada e a umidade residual tolerada no produto final. Geralmente, esta é uma escolha técnica e econômica.

A separação da torta e do meio filtrante e sua descarga são passos importantes para uma filtração eficiente. Na filtração a vácuo, lâminas raspam o meio filtrante e descarregam a torta por gravidade. Em hiperbárico e pressão, remover a torta é um

pouco mais complicado, pois existe a necessidade de manter a pressão na câmara de filtração, assim, válvulas pressurizam e despressurizam a área de descarga, dependendo do ciclo de filtragem.

2.2. TIPOS DE FILTROS

O processo de filtração baseia-se na diferença de pressão (ΔP) existente entre a torta e o meio filtrante. Os principais tipos de filtros são os que utilizam vácuo ou pressão para facilitar a separação entre as fases sólida e líquida.

Os filtros a vácuo tiveram uma grande vantagem sobre os filtros de pressão em seu *design* simples e sua operação, o que os tornou muito populares na indústria de mineração depois do século 20 (WAKEMAN e TARLETON, 2005a). Entretanto, filtros de pressão começaram a substituir os filtros a vácuo nos anos 80 devido à limitação da queda de pressão presente nos filtros a vácuo. Por depender da pressão atmosférica, minas em altas altitudes (acima de 4000 m acima do nível do mar) tinham uma baixa eficiência com este tipo de equipamento.

Uma alternativa interessante é a combinação de equipamentos de vácuo e pressão em uma única unidade. Se um filtro a vácuo tradicional é introduzido em uma câmara de pressão de modo que a queda de pressão é aumentada, um filtro hiperbárico é obtido (CONCHA, 2014).

De acordo com Sampaio et al. (2007), os filtros a vácuo têm uma maior aplicabilidade para processos onde a diferença de pressão necessária seja menor que 1 bar, sendo que para valores maiores que 1 bar os filtros de pressão são mais adequados. A diferença de pressão está ligada a porosidade da torta, que é um resultado direto da distribuição granulométrica dos sólidos contido na alimentação. Ou seja, quanto menor os espaços entre as partículas da torta, maior será a redução da pressão através desta.

2.2.1. Filtro a vácuo

Para Wakeman e Tarleton (2007), filtros a vácuo constituem uma categoria de filtro que utiliza forças motrizes induzidas por vácuo e meios semipermeáveis para facilitar a separação dos sólidos da suspensão. Embora, assim como dito por Chaves (2013), as diferenças de pressão no filtro estejam limitadas a menos de 1 bar, a maioria das unidades são capazes de processar uma ampla variedade de materiais de maneira contínua.

Existem basicamente quatro tipos de filtros a vácuo: tambor, disco, plano (ou mesa) e correia. Enquanto os três primeiros produzem tortas com 12 a 18% de umidade, um filtro de correia pode atingir níveis de umidade de 8 a 10%, se bem configurado (CONCHA, 2014).

Como descrito por Concha (2014), o filtro de tambor consiste em um tambor giratório com a parte inferior submersa em um tanque contendo a suspensão a ser filtrada (Figura 3). A superfície do tambor é coberta com o meio filtrante. A suspensão é sugada para o interior do tambor, que é mantido sob vácuo. Enquanto o tambor gira, o filtrado é aspirado no interior do tambor e o sólido é retido, formando a torta na superfície submersa do meio filtrante. Esta superfície eventualmente emerge do tanque onde o ar é aspirado através da torta deslocando a água dos poros.



Figura 3 - Filtro de Tambor
Fonte: Amarante (2002).

Durante a rotação, é possível lavar e secar a torta. Finalmente, um sistema de remoção separa a torta do meio filtrante e descarrega-o em um chute antes que a superfície do tambor submerja novamente na bacia de suspensão.

O filtro de disco (Figura 4) é caracterizado por Concha (2014) como um eixo horizontal montado em dois rolamentos principais. O eixo suporta e conecta um certo

número de discos com o vácuo. A parte inferior de cada disco é submersa em um tanque com uma suspensão a partir da qual o filtrado é aspirado pelo vácuo enquanto o sólido forma a torta na superfície do disco. Cada disco apresenta vários setores conectados individualmente à câmara de vácuo. Os setores são cobertos com um meio filtrante. Os discos giram produzindo os diferentes ciclos de filtração. A vantagem deste equipamento sobre o filtro de tambor é a sua maior superfície de filtração por unidade de área de piso, uma vez que ambas as superfícies dos discos estão operativas. Outra vantagem é a estrutura dos discos de filtros em módulos, que permite uma troca dos módulos danificados mais facilmente.

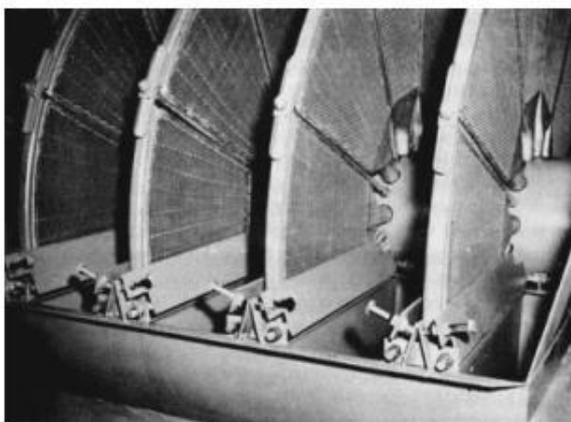


Figura 4 - Filtro a Disco
Fonte: Concha (2014).

Wakeman e Tarleton (2007) ainda comentam sobre um tipo especial de filtro de disco que usa filtros cerâmicos (Figura 5) de microporos em vez de aço coberto com meio filtrante. Esses filtros a vácuo são chamados de filtros cerâmicos, os quais são usados para filtrar concentrados de cobre e minerais industriais de granulometria muito abaixo do normal.



Figura 5 - Filtro Cerâmico
Fonte: Concha (2014).

Já o Filtro de mesa (Figura 6), caracterizado por Chaves (2013), é constituído basicamente por uma superfície circular horizontal que gira em torno de um eixo vertical sobre a qual é apoiado o meio filtrante que recebe uma alimentação superior. Seu círculo é composto por várias partes que estão conectadas ao vácuo e ao ar comprimido situados abaixo do meio filtrante. Sua alimentação é feita por gravidade e é espalhada sobre o setor. Enquanto o filtro gira, a torta é formada e em seguida é desaguada até chegar na posição final de descarga onde o ar comprimido desentope os poros e desprende a torta. A retirada da torta é realizada por uma espiral que não está em contato com a tela, que ao girar, empurra a torta para lateral do filtro.

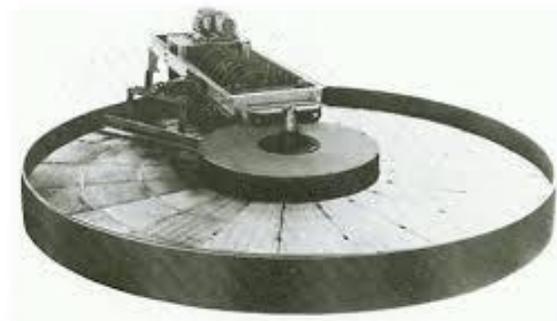


Figura 6 - Filtro de Mesa
Fonte: Oliveira (2015).

Ainda segundo Chaves (2013), este tipo de filtro não é adequado a produtos com presença de muitos finos, pois não permite a limpeza constante da tela, a qual pode acabar sendo obstruída com o tempo. Em contrapartida, o filtro de mesa é muito eficiente para produtos heterogêneos, ou seja, polpas que sedimentam rapidamente.

Já os filtros de correia (Figura 7), como descrito por Valadão (2010), caracterizam-se por uma correia de meio filtrante sobre uma correia de borracha com várias perfurações a qual sustenta a ação do vácuo. A polpa é alimentada no início da correia onde se forma a torta, em sequência observa-se as etapas de lavagem, secagem, descarga e lavagem do meio filtrante.



Figura 7 - Filtro de correia
Fonte: Concha (2014).

2.2.2. Filtro prensa

O filtro prensa ou de pressão geralmente operam em lotes e usam uma pressão positiva acima da superfície de separação semipermeável para remover o líquido e reter os sólidos sob a forma de tortas. Eles são usados em uma ampla gama de indústrias químicas e de processo para a separação de suspensões que contém partículas mais finas que assentam lentamente e exibem baixa capacidade de filtração (WAKEMAN e TARLETON, 2007).

Segundo Chaves (2013), o filtro prensa (Figura 8) não é muito utilizado na mineração. No entanto, destaca-se sua utilização no beneficiamento de caulins, cianetação de ouro, cementação e desaguamento de sulfetos.

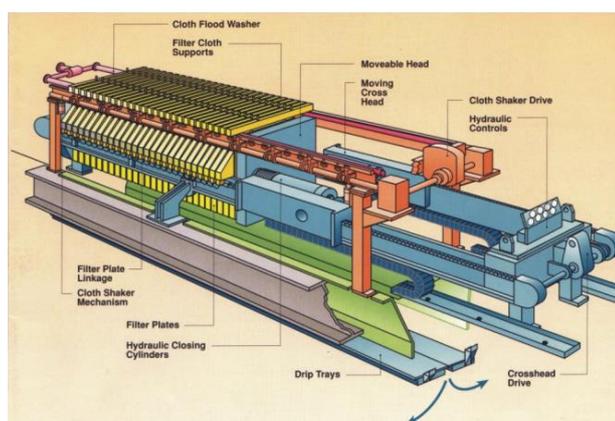


Figura 8 - Filtro prensa
Fonte: Amarante (2002).

No filtro prensa, a separação ocorre nas câmaras situadas entre as placas envolvidas pelo meio filtrante, as quais possuem aberturas para alimentação e drenagem do filtrado. Elas são montadas entre duas barras laterais que são fixadas em uma extremidade, e conectado a um sistema hidráulico que por meio da pressão, juntam essas placas e forçam a passagem do filtrado entre o meio filtrante (CONCHA, 2014).

2.3. MEIOS FILTRANTES

O meio filtrante é um componente crítico que determina o funcionamento adequado do filtro. De acordo com Purchas (1981), dentro do contexto de separação sólido/líquido o termo meio filtrante pode ser definido como:

“qualquer material que, sob as condições do filtro, é permeável a um ou mais componentes de uma mistura, solução ou suspensão, e é impermeável aos componentes restantes”.

O papel principal de um meio filtrante é causar uma separação clara de partículas (que podem ser partículas sólidas, gotículas, material coloidal, ou espécies moleculares ou iônicas) do líquido com o consumo mínimo de energia. Para conseguir isso, uma escolha cuidadosa do meio deve levar em conta muitos fatores. Os critérios pelos quais um meio filtrante é avaliado incluem a permeabilidade do meio limpo, sua capacidade de retenção e a permeabilidade do meio após o uso. A permeabilidade de um meio filtrante altera rapidamente do estado novo para “usado”, ele vai se degradando até que o desgaste do tecido deixe-o inapropriado (WAKEMAN e TARLETON, 2007).

Para Chaves (2013), a perda de permeabilidade pode causar entupimento ou cegueira das aberturas do meio filtrante, e pode determinar a vida útil do meio caso a taxa de filtragem não esteja boa. Permeabilidade e retenção de partículas são dependentes da estrutura do meio, mas a interação do meio filtrante com a forma e distribuição de tamanho das partículas que desafiam o meio também é de importância crucial.

Existe uma vasta variedade de materiais em diversas formas utilizados como meio filtrante. Mesmo que na indústria mineral a escolha de meios filtrante gira em

torno dos tecidos, indústrias químicas e metalúrgicas utilizam uma grande variedade de materiais, como telas metálicas, plásticos, vidros sintetizados, membranas porosas entre outros. A tabela 1, mostra alguns materiais e suas características.

Tabela 1 – Matérias-primas e suas características. Fonte: Stauch (2013).

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 Alcalis: Ótima Solvente: Regular	Resistente a temperaturas de até 130°C quando seco
Poliéster	Multifilamento Monofilamento Fibra Cortada Misto M/FC	Sarja Tela Feltros Aguilhados	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 Alcalis: Regular Solvente: Ótima	Resistente a temperaturas de até 150°C quando seco
Polipropileno	Multifilamento Monofilamento Fibra Cortada Misto MO/M	Cetim Sarja, Tela Feltros Aguilhados	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 Alcalis: 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 Alcalis: 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 Alcalis: Regular Solvente: Ótima	Resistente a temperaturas de até 130°C quando seco

Segundo Chaves (2013), os tecidos de algodão e fibras sintéticas são os mais utilizados na indústria mineral, sendo que as fibras sintéticas costumam ser duas a três vezes mais caras em relação ao algodão. Assim, destaca-se o algodão por ter um preço relativamente baixo e ainda ser bem versátil em relação às tramas, em contrapartida, as fibras sintéticas possuem uma vida útil mais longa.

Dentre as características dos tecidos, destaca-se a gramatura, que representa a massa do tecido por unidade de área, espessura, permeabilidade e a contextura ou tessitura que é a maneira como o tecido é confeccionado, o que resulta em diversas configurações. Destaca-se as tessituras em trama simples ou tela, sarja e cetim, exibidas na figura 9.

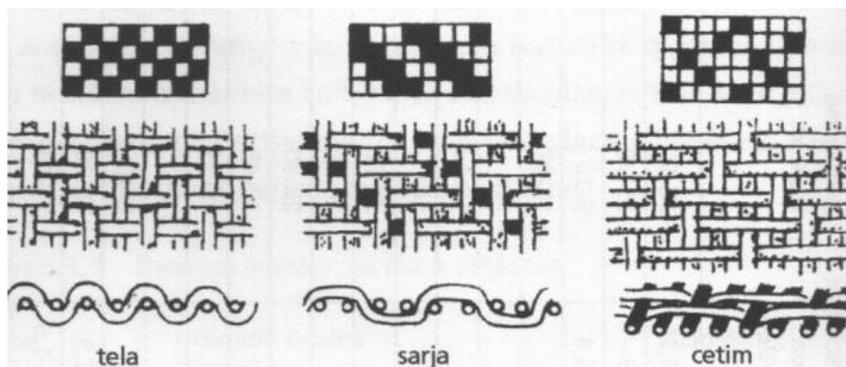


Figura 9 - Tessituras
Fonte: Chaves (2013).

De acordo com Chaves (2013), a tela é um trançado simples semelhante aos tecidos utilizados na confecção de roupas, onde os fios são alternados em cima e embaixo, formando um tabuleiro de xadrez. A sarja possui uma forma diagonal, onde os fios são trançados com pulos de 2 ou mais fios na urdidura. Já o cetim se configura com a passagem de quatro ou mais fios cruzados com a urdidura, dando um aspecto mais liso ao tecido. A tabela 2 apresenta alguns efeitos da trama sobre o resultado da filtragem, sendo que o efeito é decrescente em relação a linha. A tela proporciona máxima limpidez do filtrado e fácil descarga da torta, enquanto que o cetim oferece mínima resistência ao escoamento com máxima vida da tela.

Tabela 2 - Efeito da trama sobre a filtragem. Fonte: Chaves (2013).

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Umidade mínima da torta	Mais fácil descarga na torta	Máxima vida da tela	Mínima Tendência de Cegar
tela	cetim	cetim	tela	cetim	cetim
sarja	sarja	sarja	sarja	tela	sarja
cetim	tela	tela	cetim	sarja	tela

Em relação ao tipo de fio, destaca-se quatro tipos: monofilamentar, multifilamentar, felpudo e monomultifilamentar, como mostrado na figura 10. Os monofilamentares, para Purchas (1981), são fios simples feitos de polímero fundido em método de extrusão, de modo a orientar as moléculas a fim de produzir um filamento com as características desejadas de tensão/deformação. Geralmente têm uma seção transversal circular, com diâmetros na faixa de 0,1 a 0,3 mm para meios filtrantes. Tecidos produzidos a partir de monofilamentos caracterizam-se pela sua resistência à cegueira, produtividade relativamente alta e capacidade de descarregar tortas de forma limpa e eficaz no final de um ciclo. No entanto, os monofilamentos nem sempre fornecem uma boa retenção de partículas, assim, não é o tipo ideal para escolha quando se busca um filtrado mais limpo (WAKEMAN e TARLETON, 2007).

Multifilamentos são extrudados e orientados assim como os monofilamentos, mas a matriz ou fieira contém um grande número de aberturas menores com diâmetro em torno de 0,03mm. Após a extrusão, os filamentos são torcidos, o que ajuda a proteger o fio contra a abrasão, fortalece o conjunto de filamentos e os torna mais rígido. Um alto nível de torção também reduz a tendência de cegueira do pano. No entanto, apesar de sua melhor retenção, maior força e maior flexibilidade, os tecidos multifilamentares são mais propensos a cegueira do que monofilamentos.

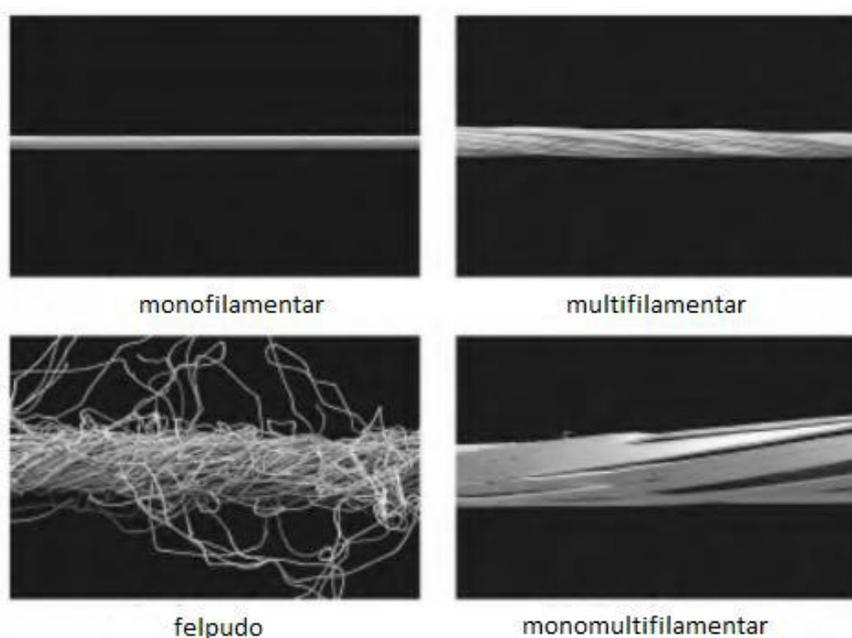


Figura 10 - Tipos de Fios
Fonte: Wakeman e Tarleton (2007).

Os fios felpudos são produzidos a partir de fibras curtas usando técnicas de fiação desenvolvidas para fibras naturais, como algodão ou lã (CHAVES, 2013). Uma consequência desta técnica, resultante da relativa facilidade com que as fibras podem se mover dentro do conjunto de fios, é que elas são melhores para filtração do que os fios multifilamentares, fornecendo um maior rendimento e maior resistência ao cegamento.

Fios monomultifilamentares se assemelham ao multifilamentar, exceto que no processo de fabricação não é realizado uma torção dos fios, ou seja, cada fio é constituído de várias fibras de linha, porém elas não possuem aquele aspecto torcido como as cordas, dando um aspecto mais liso no tecido. Uma vantagem do monomultifilamento sobre o multifilamentar é que ele permite um maior fluxo de filtrado para polpas com presença de finos (WAKEMAN e TARLETON, 2007).

A tabela 3 mostra em ordem decrescente de preferência, o efeito do fio sobre o desempenho da tela. Assim, de acordo com Chaves (2013), para escolher a tela ideal deve-se levar em consideração algumas características, dentre elas:

- Capacidade de reter as partículas sólidas durante todo o ciclo;
- Cegamento;
- Resistência química;
- Resistência ao desgaste;
- Facilidade na retirada da torta, levando em consideração os restos deixados;
- Maleabilidade da tela em relação ao equipamento;
- Custo/benefício;
- Contaminação do filtrado por fiapos;

Tabela 3 -Efeito das características do fio sobre a tela. Fonte: Chaves (2013).

Máxima limpidez do filtrado	Mínima resistência ao escoamento	Mais fácil descarga na torção	Máxima vida da tela	Mínima Tendência de Cegar	Umidade mínima da torta
felpudo	mono	mono	felpudo	mono	mono
multi	multi	multi	multi	multi	multi
mono	felpudo	felpudo	mono	felpudo	felpudo

Além disso, para obtenção da tela, além do material, deve-se mencionar a trama, número de série, gramatura, número de fios, número de filamentos e o número do fio.

2.4. TESTE DE LABORATÓRIO

Através de ensaios de laboratório pode-se obter os parâmetros necessários para o dimensionamento de um filtro. Apenas por meio desses testes, é possível analisar a eficiência do produto a ser filtrado (Sampaio et al., 2007).

Os equipamentos para testar as características de filtração de lamas em laboratório são geralmente pequenos, compactos e razoavelmente fáceis de construir. Dentre os testes, o teste de folha (*leaf test*) é o mais empregado, pois além da simplicidade, o seu procedimento experimental não é complexo. A figura 11 representa a configuração normal do teste de folha.

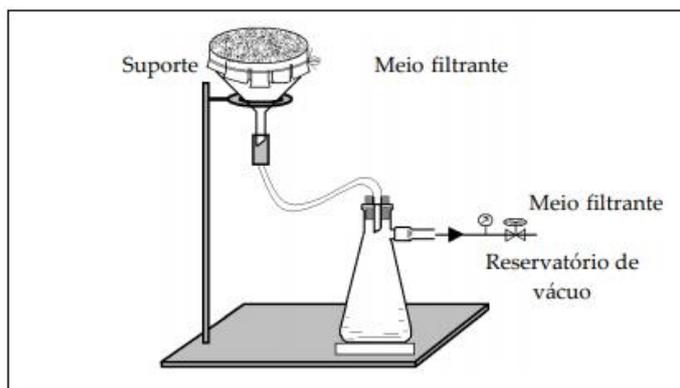


Figura 11 - Teste de Folha
Fonte: Sampaio et al. (2007).

O teste de folha, conforme descrito na figura 11, pode ser usado para testar reagentes de filtração rotativa a vácuo, mas não tem a capacidade de avaliar rigorosamente a eficiência de formação de torta por alimentação inferior, que é um fator significativo quando se considera esta aplicação. Uma melhor simulação do teste de folha, representado na figura 12, requer apenas algumas pequenas modificações, sendo que o aparelho utilizado nesta configuração é o mesmo mostrado na figura 11.

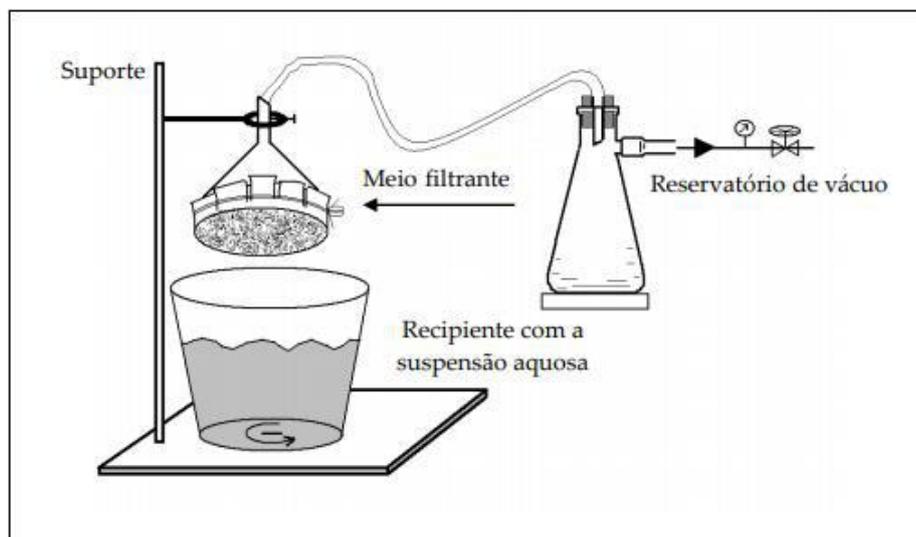


Figura 12 - Teste de folha invertido
Fonte: Sampaio et al. (2007).

Sempre que possível, a folha de teste (tela) deve seguir a forma da seção do encaixe. A folha de teste deve ter o tamanho correto e uma estrutura de suporte de drenagem de filtrado semelhante, sem ser submetido a efeitos de borda que podem invalidar os resultados do teste. Além disso, não deve haver restrição hidráulica em nenhum tubo entre a folha do filtro e o recipiente de coleta do filtrado (WAKEMAN e TARLETON, 2005b).

Em geral, de acordo com Sampaio et al. (2007), a folha de teste é circular com uma área de filtração de 92,9 cm² (aproximadamente 0,1 ft²). A configuração da folha do filtro dependerá do fabricante, e a maioria dos fornecedores de equipamentos usam seus próprios desenhos. A figura 13, representa um suporte para filtração a vácuo com o perfil comum, com um espaço livre de drenagem, e uma conexão de vácuo adequada.

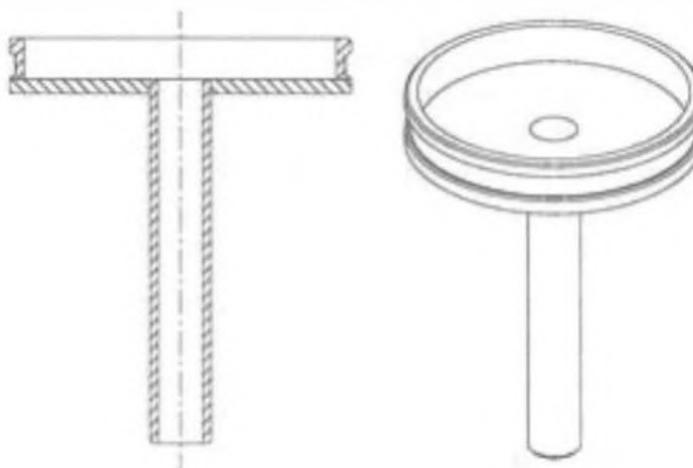


Figura 13 - Suporte para realização do teste de folha invertido
Fonte: Wakeman e Tarleton, (2005b).

O pano de filtro é montado sobre a abertura e fixado no lugar usando um selo, um calço ou um aperto do anel que mantenha o pano bem vedado. O objetivo do calço é impedir que a torta se forme em forma de cogumelo, distorcendo assim a área de filtração efetiva e os resultados do teste. De acordo do Wakeman e Tarleton (2005b), a profundidade do calço deve ser maior que a esperada espessura da torta, mas não tão profundo a ponto de interferir na formação desta, sendo que aproximadamente 5 mm já é suficiente.

Ainda segundo o autor, é possível realizar testes de folhas de filtro com unidades de área menores embora os efeitos de borda (em proporção à área de filtração) sejam maiores. No entanto, isso não invalida os resultados desde que um fator de escala seja utilizado para ajuste.

Além da folha de teste, o operador precisará de uma mangueira flexível (adequada para uso sob vácuo sem colapsar, ou seja, modificar sua seção), e um reservatório de vácuo ligado a uma bomba a vácuo.

Para Wakeman e Tarleton (2007), na maioria dos sistemas industriais o vácuo aplicado está entre -0,6 e -0,8 bar e isso é típico para uma bomba de vácuo. O conjunto de teste mostrado na figura 12, com a folha invertida é adequada para simular filtros de vácuo de fundo, isto é, filtros de tambor e disco enquanto a figura 11, para testes de alimentação superiores, filtro de mesa e correia.

2.4.1. Procedimento para o teste de folha

Experiência com aplicações de filtragem, bem como teste confiáveis são importantes quando se realiza ensaios de folhas de filtro. Devido à incerteza nos testes iniciais, não é possível definir um programa de teste antes de realizar o primeiro teste.

Para Rushton (1996), os primeiros três testes são geralmente usados para verificar a vedação do tecido, condicionar o meio filtrante (e o aparelho de teste), e fornecer informação indicativa sobre a formação de torta e a taxa de filtração. Os tempos de formação podem variar de 30 segundos a 4 minutos dependendo da taxa de filtração global características da torta.

O volume do teste deve ser suficientemente grande para garantir a representação da polpa, mas pequeno o suficiente para ser manuseado em condições laboratoriais. Normalmente, de acordo com Wakeman e Tarleton (2005b), amostras de 5 a 15 litros são suficientes.

O nível de vácuo aplicado durante o teste é variável. Em geral, como descrito por Wakeman e Tarleton (2005b), para tortas de granulometria grossa e permeável os níveis de vácuo podem estar entre -0,2 e -0,4 bar. Para tortas de baixa permeabilidade, os níveis de vácuo serão entre -0,6 e -0,8 bar. Geralmente, isso é limitado pelo desempenho do sistema de vácuo que geralmente diminui abaixo -0,7 bar. Para a maioria dos testes de filtro, recomenda-se que o nível de vácuo seja limitado em aproximadamente -0,7 bar.

A figura 14 a seguir representa uma planilha de dados típica para registrar as condições de teste e resultados para testes de folha. O número de testes a serem realizados dependerá da natureza da investigação e da variabilidade dos resultados. Para Wakeman e Tarleton (2005b), um mínimo de seis testes é recomendado para a maioria das aplicações.

 CETEM CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL		Projeto:		Resp:						
		Ensaio de Filtragem		Local:						
Cliente:				Data / /						
Material:				Contrato:						
Origem:				O.S. n°:						
Amostra n°:										
OBSERVAÇÕES:	Turbidez do filtrado (NTV)									
	Descrição da torta									
	kg/ft ² (seco)									
	% umidade									
	Peso da torta	Seco (g)								
		Úmido (g)								
	Espessura da torta (cm)									
Material: _____ % sólidos consistindo em _____ % líquidos consistindo em _____ Data de recepção: _____ Quantidade recebida: _____ pH da polpa: _____ Tamanho do filtro: _____ ft ² área: _____ Tipo de filtro: _____	Lavagem	L/h/ft ²								
		MI								
	Velocidade filtragem	L/h/ft ²								
		mL ciclo								
	Tempo de Filtragem	Ciclo								
		Fissuração								
		Secagem								
		Lavagem								
		Imersão								
	Vácuo (mm Hg)	Média obtida	Secagem							
			Lavagem							
		Operação	Imersão							
			Secagem							
	Imersão									
	% sólidos na alimentação									
Tela										
Temperatura										
Ensaio n°:										

Figura 14 - Planilha de laboratório para controle de parâmetros operacionais do teste de folha
 Fonte: Sampaio et al. (2007).

Testes de folha de alimentação inferior são usados para simular a operação dos filtros de tambor rotativo e disco, onde a filtração não depende apenas da gravidade. Durante o teste, a suspensão exigirá agitação suave, a fim de evitar a sedimentação dentro do tanque. Uma agitação turbulenta deve ser evitada, pois pode perturbar a formação da torta e, em circunstâncias extremas, poderia dar origem a atrito de partículas. Se os sólidos possuem uma rápida sedimentação e são difíceis de suspender, então deve-se avaliar a possibilidade evitar tais tipos de filtros (WAKEMAN e TARLETON, 2005b).

Ainda segundo Wakeman e Tarleton (2005b), o procedimento de teste de alimentação inferior é o seguinte:

1. Antes de realizar qualquer teste, assegura se que o operador esteja com todas as fichas de dados de segurança relevantes e usa-se equipamentos de proteção individual (EPI's) durante o trabalho;

2. Obtêm-se uma amostra que represente o processo sob investigação. Coloca-se a suspensão em um recipiente adequado que seja grande o suficiente para o teste de folha e permita a agitação delicada;
3. Registre os parâmetros fixos do sistema: temperatura e pH;
4. Observe-se a necessidade de qualquer pré-tratamento ou condicionamento químico da suspensão;
5. Agita-se suavemente a amostra global para produzir uma suspensão e extrair uma amostra de referência para determinar ou confirmar a concentração de sólidos. Se necessário, obtenha uma distribuição granulométrica da amostra;
6. Seleciona-se um pano de filtro para a folha de teste. O pano do filtro deve ser adequado para a aplicação em questão. Conselhos sobre seleção de tecidos oferecidos pelo fornecedor é uma boa alternativa;
7. Encaixa-se o pano de filtro no suporte do teste de folha, certificando-se de que o tecido esteja corretamente selado e em posição. O calço deve ser colocado na folha de teste para minimizar quaisquer erros associados a efeitos de borda;
8. Configura-se o circuito de teste conforme mostrado na figura 11 ou 12;
9. Se tiver, fecha-se a válvula entre a folha de teste do filtro e o receptor de filtrado;
10. Liga-se a bomba de vácuo e ajusta-se a válvula de recirculação (entre a entrada e a saída da bomba de vácuo) para obter o nível de vácuo desejado;
11. Agita-se suavemente a suspensão usando uma espátula de face larga para obter uma suspensão homogênea e mergulha-se a folha do filtro na suspensão;
12. Inicia-se o temporizador e abre-se imediatamente a válvula;
13. Após o tempo predefinido, remova a folha da suspensão e, mantendo a folha voltada para baixo, permita que o excesso de licor seja drenado da superfície da folha do filtro. Gire gradualmente a folha do filtro através de 180°, simulando o ciclo de um tambor rotativo ou filtro de disco;
14. Após um tempo predefinido de secagem, coleta-se os dados de teste:
 - volume de filtrado;
 - qualidade do filtrado;
 - peso da torta (úmida);
 - espessura da torta;
 - características de descarga;
 - observações (formação de torta, filtração de espuma, etc.).

Durante o tempo de desidratação, secagem, o fluxo de ar de exaustão da bomba de vácuo pode ser registrado de forma a se obter um melhor tempo de secagem além de registrar, caso ocorra, a quebra da torta. Se for necessário lavar a torta, coloque um volume pré-determinado de água de lavagem. A água de lavagem deve ser adicionada antes da torta ressecada criar fissuras em sua superfície, garantindo a eficiência máxima de lavagem (WAKEMAN e TARLETON, 2005b).

2.4.2. Dimensionamento

As correlações utilizadas para dimensionar um filtro através do *Leaf Test* surgiram por observações empíricas e considerações teóricas. Os dados são correlacionados por equações clássicas de filtração, válidas para a maioria das situações industriais. Correlações para lavagem e secagem são meramente empíricas (NUNES GOMES, 1999).

O desempenho de um filtro pode ser avaliado pela: umidade de torta (massa líquido/massa torta); taxa unitária de filtração (massa de torta seca/tempo/área) e percentagem de sólidos no filtrado (massa de sólidos no filtrado/massa do filtrado) (VALADÃO, 2010).

2.4.2.1. Umidade da Torta

A umidade da torta é uma equação que nos dá uma porcentagem de água contida na torta úmida. Segue a equação 1.

$$(1)$$

Vale ressaltar que o correto é sempre utilizar os valores das massas úmida e seca da torta coletadas imediatamente após a filtração e a retirada desta da estufa respectivamente, eliminando assim o valor de umidade influenciada pela umidade natural do ambiente.

2.4.2.2. Taxa Unitária de Filtragem

A taxa unitária de filtragem é uma forma de calcular a massa de torta que é formada pelo tempo e área. Segue as equações 2 e 3, onde os valores de 10^6 e 3600 são fatores de conversão para gramas em toneladas e segundos em horas respectivamente.

(2)

(3)

O tempo de ciclo é formado pelo tempo de formação acrescido dos tempos de secagem e de lavagem de torta. A definição de tais tempos varia de equipamento e metodologias (VALADÃO, 2010).

2.4.2.3. Percentagem de Sólidos no Filtrado

Dentro dos objetivos da filtragem, busca-se um filtrado com uma baixa porcentagem de sólidos. Sabemos que para certos resultados este valor é muito baixo, o que dificulta a obtenção dos valores de sólidos. Diante dos fatos, pode-se utilizar uma correlação entre turbidez do filtrado através de um turbidímetro.

De qualquer maneira, com equipamentos que permitam as precisões necessárias, a relação entre a massa seca e a massa úmida dos filtrados também pode ser obtida com o cálculo da porcentagem de sólidos, expressa pela equação 4 (CHAVES, 2013):

(4)

2.4.3. Fatores de Escalonamento

Com o objetivo de corrigir diferenças de escalas operacionais, fatores de escalonamento são empregados no dimensionamento de filtros industriais a partir dos dados coletados com o *Leaf-Test* em laboratório. De acordo com Wakeman e Tarleton (2005b), muitas destas correlações são fornecidas pelas empresas fornecedoras de equipamentos e materiais.

Para Nunes Gomes (1999), o fator de escalonamento total para corrigir tais diferenças é separado principalmente em três partes: taxa unitária de filtragem, área útil do filtro e descarga. O autor afirma ainda que o fator de escalonamento para taxa unitária de filtragem não leva em consideração: mudanças de filtrabilidade da polpa, diferença na taxa de alimentação, condições operacionais e cegamento do meio filtrante.

Segundo Nunes Gomes (1999) e Chaves (2013), as taxas unitárias de filtragem calculadas em bancada devem ser multiplicadas por um fator de escala (*scale up*) 0,8 para todos filtros contínuos comerciais que não utilizam lavagem do meio filtrante. Para as unidades que utilizam lavagem (horizontal, tambor) o fator deve ser de 0,9.

A área nominal de um filtro é baseada na dimensão global da superfície filtrante. A fração desta área utilizada de fato na filtragem é uma função da filtrabilidade do material e tratamentos especiais do meio filtrante. Para a maioria dos equipamentos, a área do filtro não será menor que 94% da área nominal, apenas para filtros de discos, que podem variar de 72-82% dependendo do número de seções (NUNES GOMES, 1999).

Espera-se que toda torta seja descarregada do meio filtrante, porém certos equipamentos que possuem sistema de raspagem operam com uma altura de segurança, de forma a evitar o contato do mecanismo de raspagem com o tecido. Tal fato deve ser observado para determinar o nível de correção a ser aplicado na espessura da torta.

2.5. CONFIGURAÇÕES DE MONTAGEM DO TESTE FOLHA

Diferentes configurações para o Teste de Folha foram propostas para realização da filtragem em diversos campos de pesquisa, dentre eles, tratamento de esgoto, indústrias químicas e alimentícias, refinarias e mineração. Diversos pesquisadores e fabricantes de equipamentos e meios filtrantes desenvolveram ou adequaram o teste aos próprios interesses baseados na aplicabilidade do método ao efeito escala que ele pode proporcionar.

A configuração mais simples (básica) apresentada dentre os autores é a de Chaves (2013), mostrada na figura 15. Nela encontramos um recipiente para polpa,

um suporte para tela ligado ao kitassato por uma tubulação e a ligação do kitassato ao sistema de vácuo que não foi discriminado. Para fins educativos, esta configuração é bem aceita, porém ela não é completa e bem descrita para uma real realização do teste.

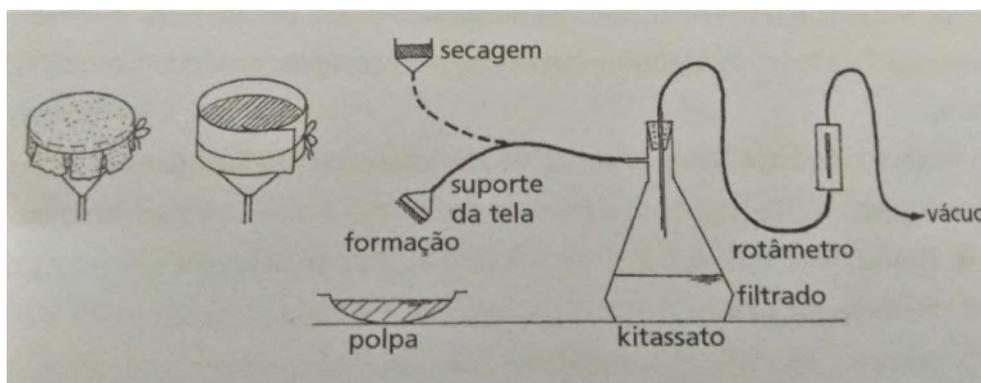


Figura 15 - Kit de ensaio de filtragem.
Fonte: Chaves (2013).

Dentre os problemas, observa-se que o suporte padrão não oferece uma boa vedação e fixação do meio filtrante. A má colocação do meio filtrante pode gerar pontos de pouca resistência, onde o fluxo de filtrado, ar e até mesmo polpa pode invalidar os resultados. Além disso, uma fixação fraca do meio filtrante pode criar um afrouxamento do tecido, criando um aspecto oval na parte interna da torta e uma possível alteração nas aberturas do meio filtrante que interfere diretamente nos resultados do teste. Taggart (1927) faz esta observação sobre o aspecto oval criado no meio filtrante e propõe o projeto de tela ilustrado na figura 16a, que impede tal problema. A figura 16b representa um filtro criado pela EIMCO, que possui uma tela semelhante a proposta por Taggart.

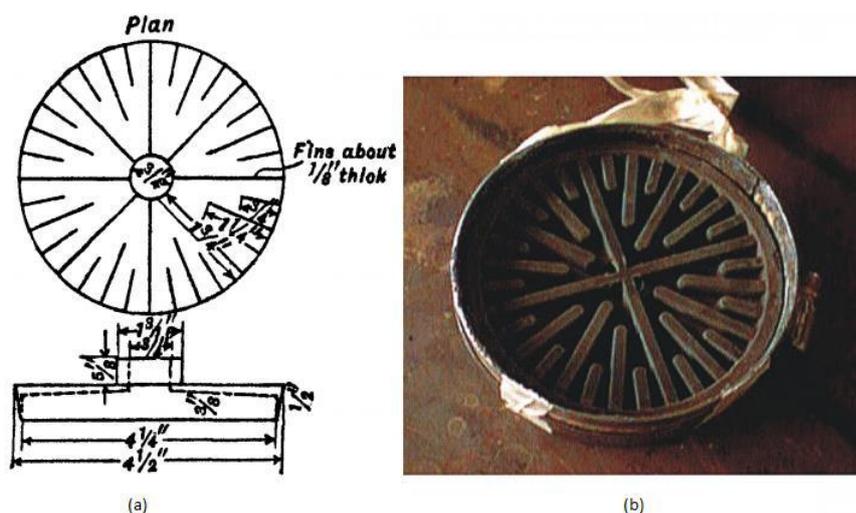


Figura 16 - (a) Tela de retenção projetada, (b) Suporte com tela semelhante.
Fonte: (a) Taggart (1927). (b) EIMCO (1987).

A fixação do tecido no suporte, pode ser realizada por uma abraçadeira (como mostrado na figura 16b ou um tubo de diâmetro maior que consiga prender o tecido por pressão com o auxílio de um anel de vedação (figura 17), como sugerido por Dahlstrom e Silverblatt (1977).

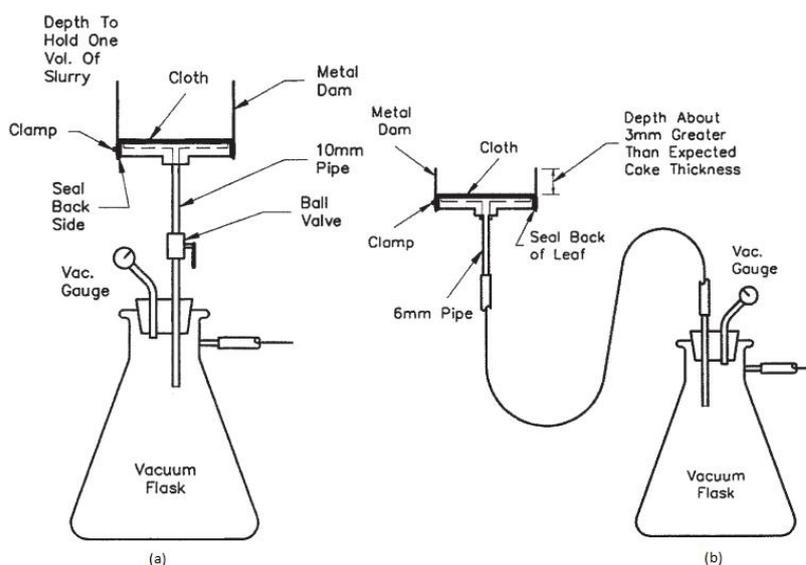


Figura 17 - Suporte alternativo.
Fonte: Dahlstrom e Silverblatt (1977).

A posição vertical ou horizontal (para baixo ou para cima) do filtro pode ter diversas utilidades. Svarovsky (2000) nos dá uma noção melhor da aplicabilidade da posição do filtro em relação ao tipo de filtro a ser estudado (figura 18), lembrando que sua posição também pode-se relacionar a etapa da filtragem em questão.

O rotâmetro (dispositivo que mede a vazão volumétrica de fluido em um tubo fechado), figura 19, é uma alternativa para avaliação de como o fluxo de ar está no sistema, mas um vacuômetro (manômetro com que se medem pressões abaixo da pressão atmosférica), figura 20, é indispensável para tal teste, já que a pressão é uma variável de interesse em ser controlada. Em contrapartida, nada impede que um rotâmetro seja utilizado em conjunto de um vacuômetro.

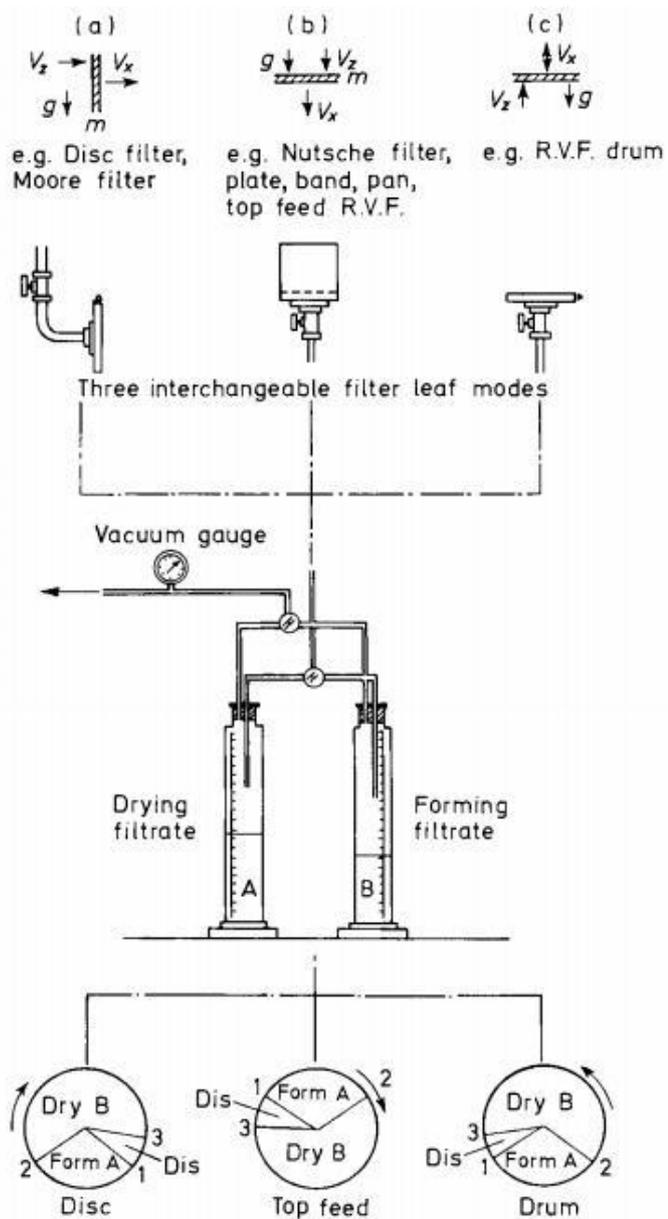


Figura 18 - Variações da posição do filtro.
Fonte: Svarovsky (2000).



Figura 19 - Rotâmetro.
Fonte: ELAN (2018).



Figura 20 - Vacuômetro.
Fonte: RuralBan (2018).

Durante o teste, o suporte padrão é mergulhado dentro do recipiente com a polpa, o que representa o tempo de formação, e posteriormente mantido fora da polpa por um tempo, que representa o tempo de secagem. Neste processo podemos observar possíveis fontes de erro. Primeiramente, deve-se analisar a necessidade de uma pequena agitação no recipiente com a polpa, pois devido a velocidade de sedimentação das partículas, pode-se obter variações bruscas nos resultados, principalmente se for necessário a realização de duplicatas. Outro fator importante a ser observado nesta etapa é a profundidade em que o suporte é mantido no recipiente e a altura com que o suporte será mantido durante a secagem. Para estes problemas, a configuração da figura 21 a seguir, proposta pela UNIMAP (2014), pode minimizar tais problemas.

Na configuração da figura 21 observa-se a utilização de um agitador portátil, área em vermelho à esquerda, ligado a um suporte de altura que possibilita uma maior homogeneidade na distribuição das partículas dentro do tanque. Deve-se ressaltar que a agitação não pode ser turbulenta e nem próxima do meio filtrante suficiente ao ponto que atrapalhe a formação da torta. Na mesma figura, pode-se observar um aparato que possibilita a regulagem da altura do filtro dentro do tanque, o que impede um erro proveniente dos operadores.

Outro detalhe a ser comentado sobre a configuração da UNIMAP, é a presença de uma descarga de pressão (Air Bleed) em cima do Kitassato, que ao ser aberto, alivia a pressão sobre o meio filtrante possibilitando uma raspagem da torta mais fácil. Caso a bomba de pressão possibilite a alteração entre sopro e sucção, pode-se analisar a possibilidade de “soprar” a torta presa no meio filtrante.

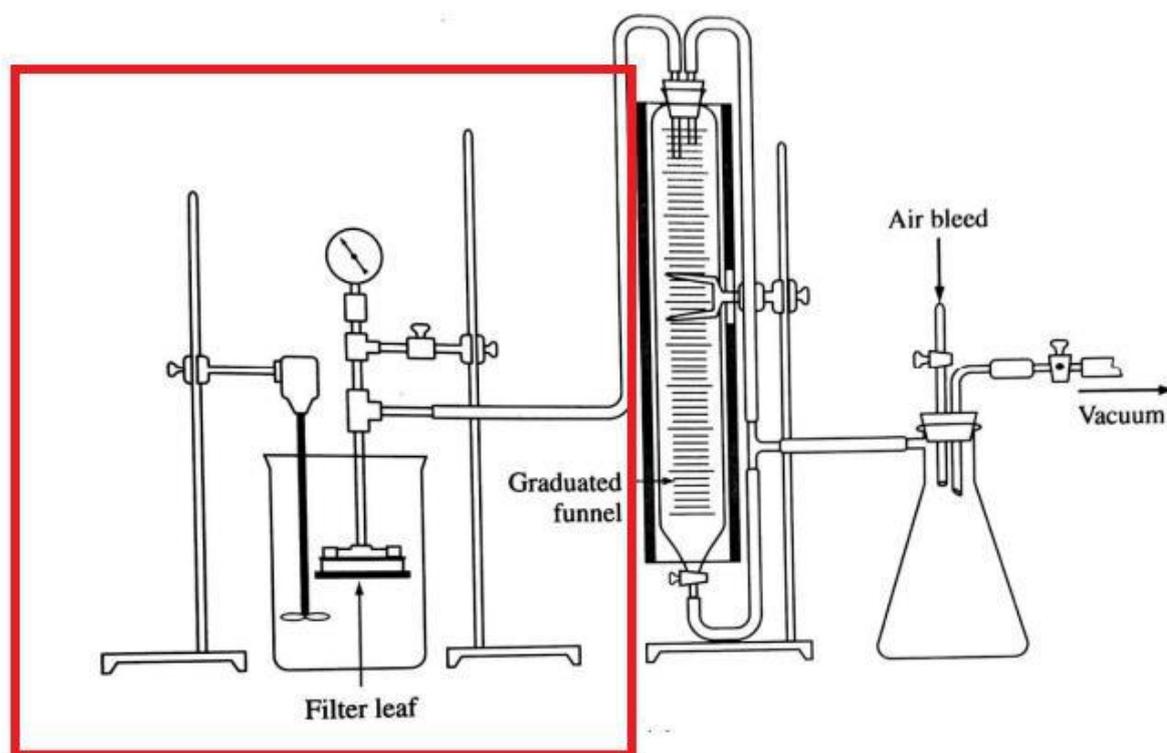


Figura 21 - Kit de ensaio de filtragem com suporte de altura.
Fonte: UNIMAP (2014).

Akers e Moss (1973), apresentam uma outra configuração para o Teste folha (figura 22), neste caso, voltado para o tratamento de lodo. Em sua montagem, podemos observar (na área em vermelho) uma plataforma que segura o filtro durante o tempo de secagem e também um bastão que realiza, quando necessário, uma agitação no tanque, lembrando que um agitador com rotação e altura controlada elimina por parte erros provenientes do operador.

Outro aspecto importante sobre a montagem de Akers e Moss (1973) é a separação do filtrado retirado durante o tempo de formação e o de secagem. Na aplicabilidade em questão, pode-se realizar análises de substâncias e suas concentrações presentes no filtrado, assim, justifica-se a divisão dos filtrados. A presença de um cronômetro junto aos recipientes bem graduados auxilia na precisão de alguns cálculos.

A presença de uma graduação confiável de volume dentro do cilindro de filtrado, ou kitassato pode ser um diferencial, pois através dela pode se analisar o fluxo de filtrado pelo tempo. A utilização de uma balança de precisão embaixo do kitassato, desde que bem montado, pode auxiliar a aquisição de tais valores.

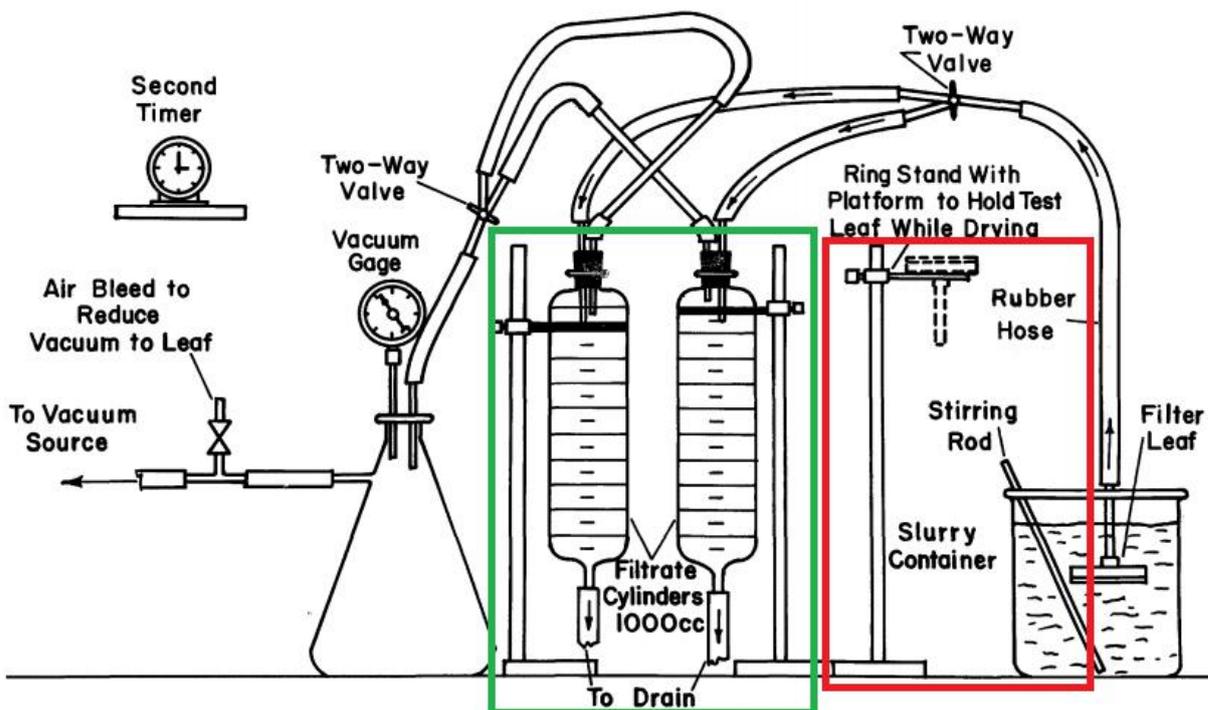


Figura 22 - Montagem com separação de filtrados.
Fonte: Akers e Moss (1973).

2.6. FATORES QUE INFLUENCIAM O TESTE EM PEQUENA ESCALA

2.6.1. Vácuo ou pressão

A maioria dos filtros contínuos usam vácuo para fornecer a força de filtração. No entanto, se a alimentação contém uma fase líquida altamente volátil, ou se está quente, saturada ou perto do ponto de ebulição, o uso de pressão pode ser necessário, além de que a pressão pode ser usada quando se quer um teor de umidade menor do que o obtido com vácuo.

Alguns sistemas integrados de pressão não possuem uma pressão constante, pois podem trabalhar por intervalo (range), onde a bomba de pressão/vácuo ativa e desativa quando a pressão do cilindro atinge tais valores. Além disso, caso o sistema esteja situado em algum laboratório onde vários operadores podem acessar diversos pontos de pressão, sua utilização pode interferir os resultados de testes alheios (CONCHA, 2014).

2.6.2. Descarga da torta

Para qualquer aplicação de filtro ser prática, deve ser possível produzir uma torta com espessura suficiente para descarga. A tabela 4, fornecida por Purchas (1981), mostra a espessura mínima aceitável da torta necessária para a descarga para vários tipos de filtros e mecanismos.

Tabela 4 - Espessura mínima para descarga da torta. Fonte: Purchas (1981).

Tipo de Filtro	Espessura mínima suportável
Tambor	3 a 6mm
Correia	3 a 5mm
Mesa	20mm
Horizontal	3 a 5mm
Bandeja	20 a 25mm
Disco	10 a 13mm

O experimentador, ao executar testes em pequena escala, deve decidir no início do programa de teste que tipo de descarga é aplicável e, em seguida, adaptar os dados coletados para atender aos requisitos físicos desse tipo de unidade.

2.6.3. Temperatura da alimentação

A temperatura pode ser tanto uma ajuda como uma limitação. À medida que a temperatura da polpa aumenta, a viscosidade da fase líquida é diminuída, causando um aumento na taxa de filtração e uma diminuição no teor de umidade da torta. O limite para os benefícios do aumento de temperatura ocorre quando a pressão de vapor do líquido começa a interferir nas características físicas do meio filtrante ou da fase sólida da polpa. Se a fase líquida se transformar em gás dentro dos filtros vários resultados indesejáveis podem aparecer como uma interrupção na formação da torta ou aumento acentuado da pressão dentro do sistema e, conseqüentemente, diminuição da capacidade da bomba de vácuo (CONCHA, 2014).

2.6.4. Espessura da torta

Às vezes a taxa de filtração com filtros de alimentação inferior é rápida o suficiente para criar uma torta muito espessa para as operações subsequentes. A

espessura do bolo pode ser controlada por ajuste na pressão do filtro, diminuição da submersão, redução na porcentagem de sólidos da polpa e alteração do meio filtrante.

É importante ressaltar que as vezes, caso não tenha um cilindro de contenção da torta no filtro (figura 17 ilustra bem o aparato), a torta em formação pode crescer lateralmente, aumentando o diâmetro da torta, como é mostrado na figura 23a. A medição correta da espessura da torta é coletada no ponto de maior espessura, lembrando que espera se uma espessura semelhante em toda área do filtro, como mostra a figura 23b.

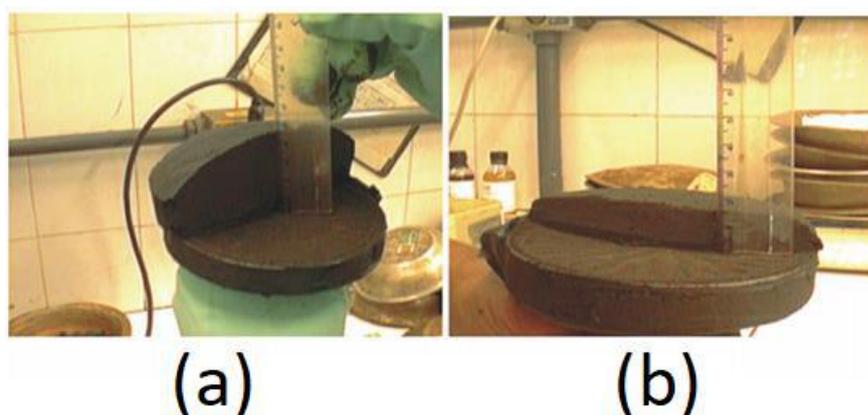


Figura 23 - Espessura da torta.
Fonte: Amarante (2002).

2.6.5. Porcentagem de sólidos na polpa

Polpas que estão diluídas e que possuem uma velocidade de sedimentação maior geralmente produzem uma taxa de filtração de sólidos reduzidas. Sabe-se que um aumento na concentração de sólidos de alimentação é geralmente um meio eficaz de aumentar a taxa de filtração de sólidos pois auxilia na formação da suspensão.

2.6.6. Sistema de agitação

Todos os testes devem ser agitados à mão (se as características da polpa permitirem) para verificar ou não se os sólidos estão se estabelecendo em torno das bordas do recipiente e determinar o grau de agitação necessário para manter os sólidos em suspensão. De um modo geral, se os sólidos podem ser mantidos em suspensão pela agitação da mão, não tem problema, mas se for necessário manter uma agitação durante todo o teste é importante a presença de um agitador. Agitação

por uma espátula larga pode ser útil. Se isso não puder ser feito, a confirmação de agitação adequada deve ser baseada em concentrações de sólidos de alimentação calculadas retroativamente.

Uma análise granulométrica das partículas da torta pode ser realizada para verificação da eficiência do filtro diante as características da polpa, e assim, verificar o melhor modo de se realizar o teste.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o alcance dos objetivos deste estudo foi realizada nos laboratórios de Informática, Mecânica (usinagem) e de Tratamento de Minérios do CEFET/ MG, Unidade Araxá, com o auxílio dos técnicos profissionais responsáveis pelos locais.

3.1. ESCOPO DO PROTÓTIPO

A montagem do filtro é a parte inicial do teste. Ele tem como função sugar a polpa do tanque retendo as partículas sólidas no meio filtrante, enquanto o filtrado é enviando por meio de uma tubulação até o recipiente de coleta (kitassato).

O desenvolvimento deste trabalho teve início a partir da análise das diversas configurações do teste de folha sugeridas pelos autores, encontradas junto aos procedimentos experimentais.

Observando as necessidades do teste, listou-se algumas características básicas do projeto. O filtro deve:

Ser constituído de um material resistente à ataques químicos, durável, barato e que permita uma usinagem fácil;

Utilizar de dimensões comerciais, facilitando a aquisição de quaisquer peças necessárias;

Ter uma tela rígida que impeça o abaulamento do meio filtrante para o interior do filtro sem prejudicar a eficiência deste;

Possuir um sistema de fixação do tecido que não danifique e comprometa o equipamento e o tecido;

Contar com facilidade na troca do meio filtrante;

Dispor de uma fácil montagem, desmontagem e lavagem.;

Apresentar facilidade na aferição da espessura e retirada da torta, sem deixar perdas ao redor do equipamento;

Evitar presilhas e peças finas que possam prender e cortar, melhorando a segurança do manejo, principalmente em relação as mãos do operador.

Para o conjunto como um todo, as seguintes características devem ser atendidas:

A vedação de todas partes rosqueáveis e das conexões com tubulações e mangueiras deve ser segura o suficiente para pequenas manobras durante o teste;

A ligação da peça à mangueiras e válvulas deve ser dinâmica, permitindo um remanejo do equipamento em relação aos diversos diâmetros de mangueiras, bicos e furos que presentes na montagem;

Possuir uma válvula que permita o corte do vácuo a qualquer momento, removendo a necessidade de desligar/ligar a bomba ou remover a mangueira (em caso de vácuo integrado).

Para firmar o filtro durante a filtração e secagem, é necessário a utilização de um equipamento que permita suspender o filtro em uma altura fixa, minimizando o erro operacional. Para este equipamento, prescrevemos algumas necessidades:

Utilização de materiais e formas de complexidade menor para criação em tornos comuns;

Suporte leve, que seja de fácil movimentação;

Estável, deve ser bem nivelado, evitando vibrações e possíveis acidentes de contato direto;

Deve possuir um modo de manter o filtro em posição de filtração e de secagem;

Deve permitir o ajuste de sua altura em relação ao tanque e a altura desejada do filtro;

Deve admitir a desmontagem, para reduzir o espaço na hora de guardar ou transportar.

Os demais equipamentos, mangueiras, recipiente (kitassato), rolha e bombas não necessitam de especificações.

Importante ressaltar que todos os materiais utilizados neste teste podem ser encontrados em lojas de materiais de usinagem, laboratórios químicos, comércios de manutenção de bombas, fogões e hidráulica.

3.2. PREMISSAS E RESTRIÇÕES

Em relação ao equipamento deve-se buscar um menor tamanho, peso e custo para minimizar o espaço, velocidade (testes rápidos) e preço. Falhas de qualidade e continuidade devem ser evitadas, para isso, o projeto deve ser o mais específico possível em relação as suas dimensões.

Não sendo uma restrição, mas muito citada por diversos autores, a área de filtragem é de $92,9 \text{ cm}^2$ ($0,1 \text{ ft}^2$).

3.3. PROJETO CONCEITUAL DO FILTRO

Para o desenvolvimento do desenho do filtro, utilizou-se o programa AutoCAD Inventor 2017 versão estudante. Dividiu-se o equipamento em cinco partes: maciço, tela, anel menor, anel maior e tubo. Os projetos detalhados de todas as partes do filtro estão apresentados nos Apêndices 1 ao 5.

A figura 24 mostra as vistas superior e inferior do *assembly*, ou seja, o projeto contendo todas as partes.

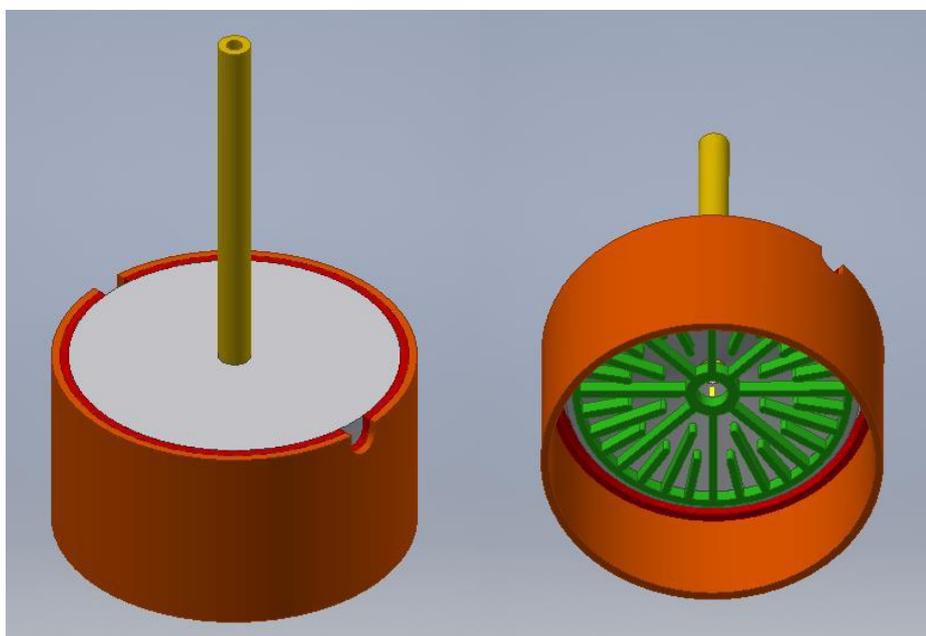


Figura 24 - Visão 3D do *assembly* montado visto de cima (esquerda) e por baixo (direita).

Fonte: Autoria própria.

3.3.1. Maciço

O maciço é o componente principal, onde todas as outras partes vão se encaixar. Indica-se que seu material seja bronze, alumínio, aço inox ou algum material plástico (poliuretano, polietileno, polipropileno entre outros). As figuras 25 e 26 apresentam as dimensões e a visão em três dimensões (3D) da peça, respectivamente. Para detalhamento completo, verificar o Apêndice 1.

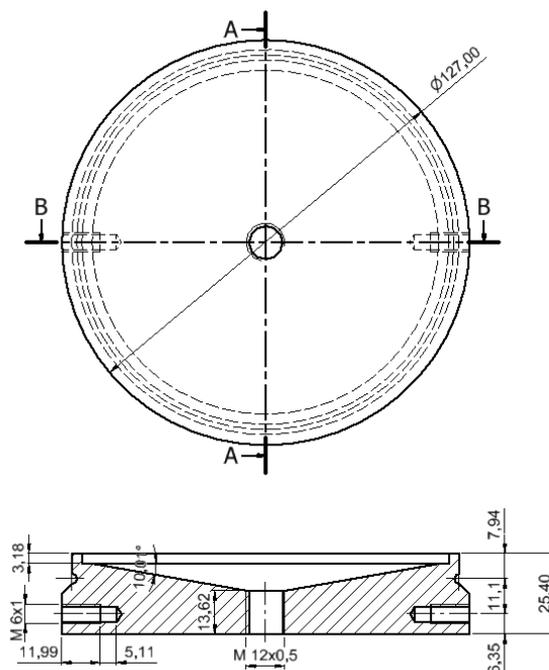


Figura 25 - Detalhamento do Maciço.
Fonte: Autoria própria.

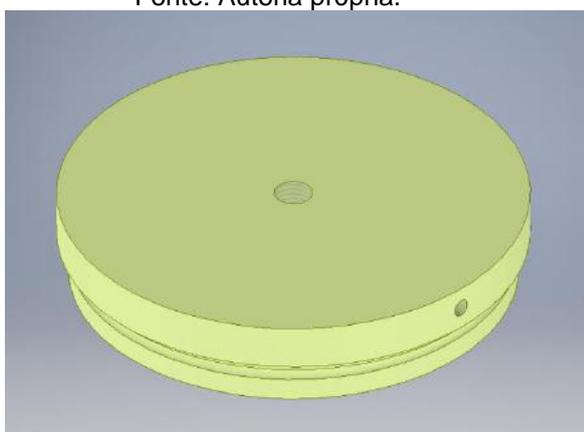


Figura 26 – Maciço em 3D.
Fonte: Autoria própria.

3.3.2. Tela

A tela é o componente rígido que ficará junto ao maciço na parte inferior, em contato direto com o meio filtrante. Assim como o maciço, seu material pode ser bronze, alumínio, aço inox e materiais plásticos (poliuretano, polietileno, polipropileno entre outros).

As figuras 27 e 28 mostram seu dimensionamento e sua visão em 3D. Como sua forma é mais complexa, a fabricação desta parte depende de algum tipo de máquina CNC (Controle Numérico Computadorizado), tanto para cortes em metais ou plásticos.

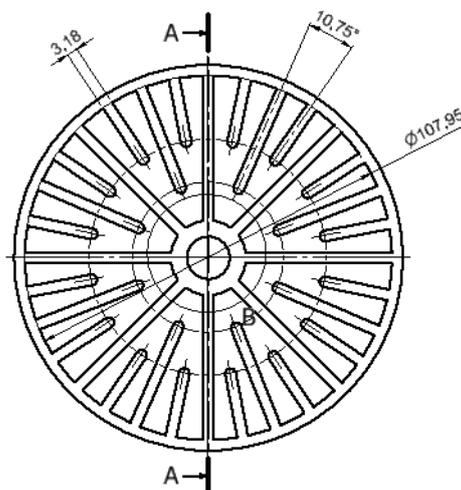


Figura 27 – Detalhamento da Tela.
Fonte: Autoria própria.

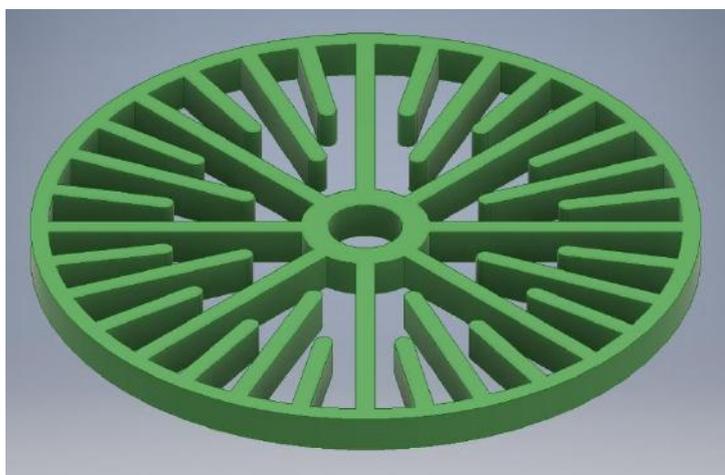


Figura 28 - Tela em 3D.
Fonte: Autoria própria.

3.3.3. Anel Menor

Já o anel menor tem a função de reforçar a fixação do tecido no maciço, junto a um anel de vedação adequado. Como sua parede é fina, descarta-se materiais que possam sofrer danos leves que resultam em amassos, assim, poliuretano, polietileno, polipropileno entre outros são mais adequados devido a sua resistência elástica.

As figuras 29 e 30 mostram seu dimensionamento e sua visão em 3D. O rasgo lateral observado na peça possui a função de, junto a um parafuso, manter a peça presa a lateral do maciço.

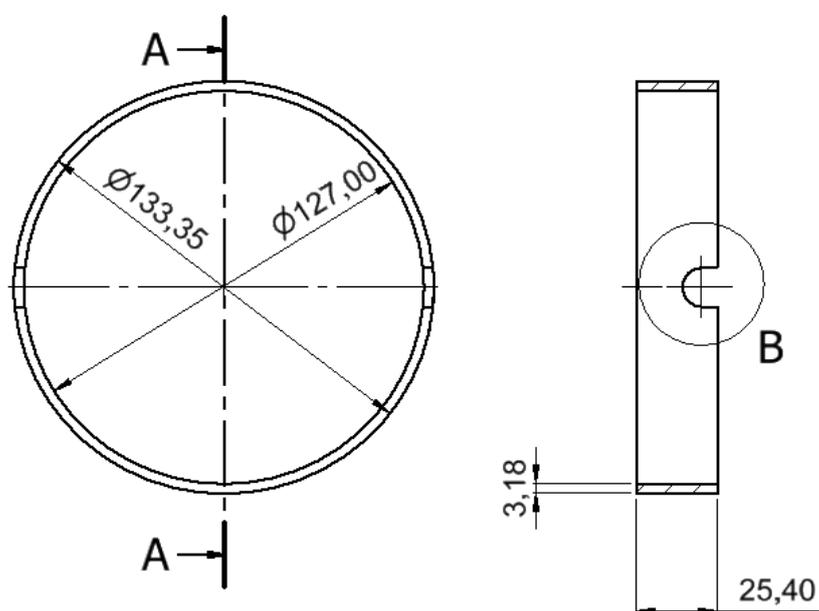


Figura 29 - Detalhamento do Anel Menor.
Fonte: Autoria própria.

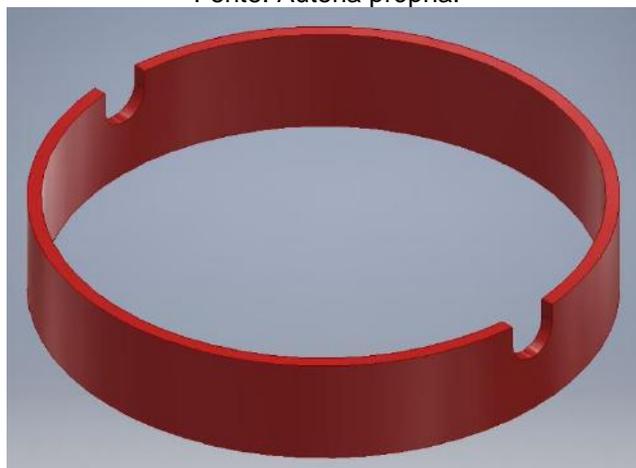


Figura 30 - Anel Menor em 3D.
Fonte: Autoria própria.

3.3.4. Anel Maior

O anel maior se assemelha muito ao anel menor. Sua função é quebrar o sentido do fluxo na tela, impedindo a formação de uma torta curvada na superfície (centro mais espesso e bordas mais finas). Além disso, sua remoção deve ser facilitada para posterior aferição da espessura da torta e remoção do material para aferição de peso e umidade.

Assim como o anel menor, o anel maior deve ser feito com algum material plástico. Segue as figuras 31 e 32 que representam seu dimensionamento e visão 3D, respectivamente.

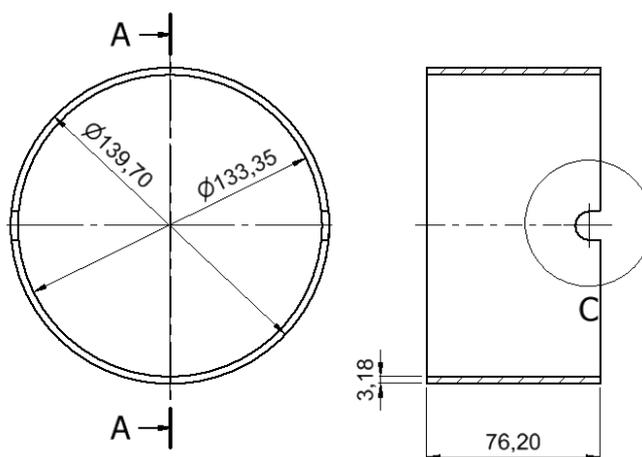


Figura 31 - Dimensionamento do Anel Maior.
Fonte: Autoria própria.

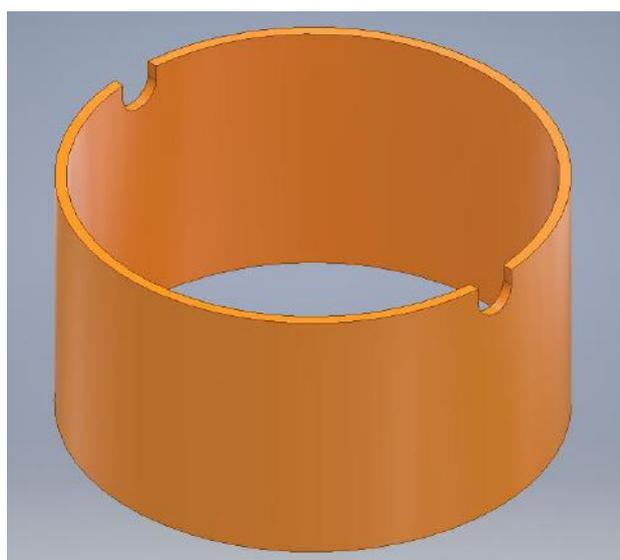


Figura 32 - Anel Maior em 3D.
Fonte: Autoria própria.

3.3.5. Tubo

O tudo é a parte mais simples, ele faz a ligação do maciço até a válvula. Seu material deve ser mais resistente, como o bronze, alumínio e aço inox.

Sua dimensão é comercial e pode ser alterada no projeto de acordo com a necessidade. Seu comprimento também é relativo, podendo ser alterado caso sua dimensão de projeto não atinja a profundidade necessária. As figuras 33 e 34 apresentam seu dimensionamento e visão 3D, respectivamente.

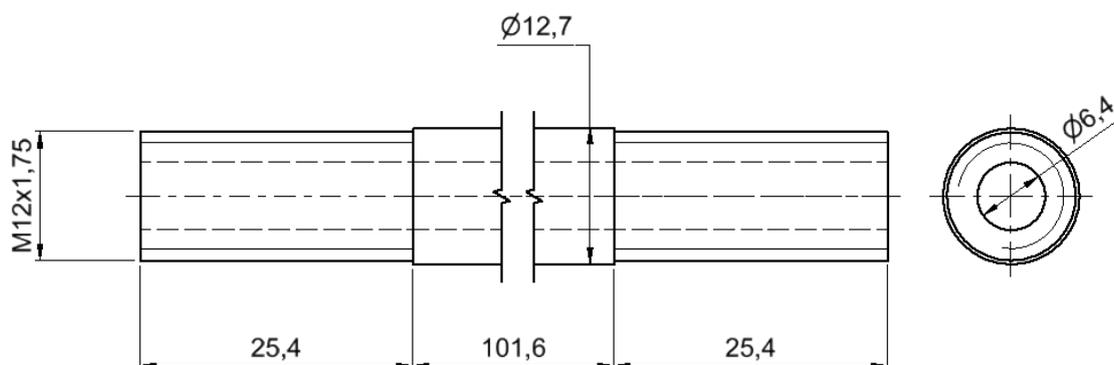


Figura 33 - Dimensionamento do Tubo.
Fonte: Autoria própria.

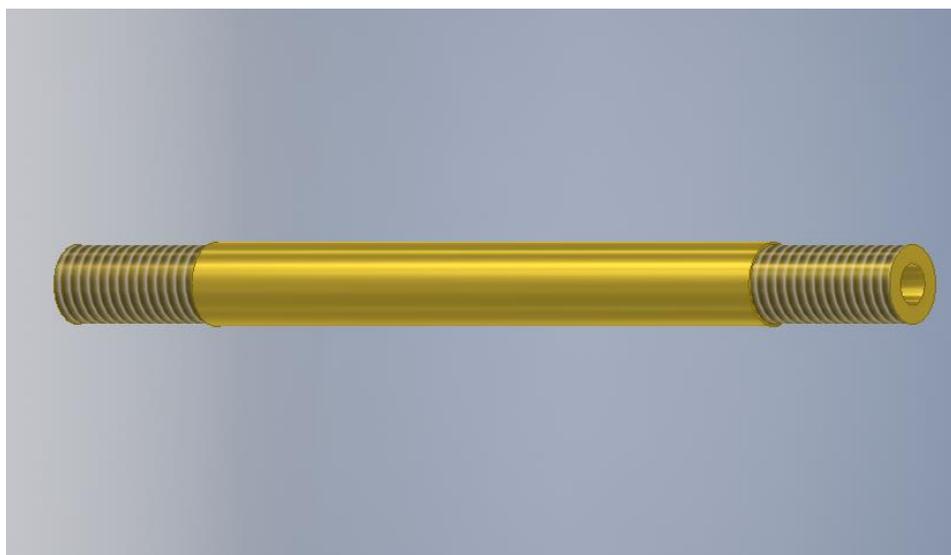


Figura 34 - Tubo em 3D.
Fonte: Autoria própria.

3.3.6. Apoio para o Filtro

O apoio para o filtro é um aparato que sustentará o filtro durante a filtração e secagem. A utilização de um apoio para o filtro evita erros operacionais provenientes do operador, que pode oscilar a altura em que o filtro se posiciona dentro do tanque.

Não é necessário um projeto dimensional específico para este equipamento, pois não se sabe qual é o tanque/balde utilizado para conter a polpa. Entretanto, busca-se economia e eficiência no equipamento, um equipamento que permite uma alteração da altura dos deques e um desmonte fácil.

3.4. TESTE FUNCIONAL

3.4.1. Materiais e equipamentos

Conforme descrito no item 2.5 (configurações de Montagem do Teste Folha), o conjunto de peças completo utilizado para este fim foi:

1x Filtro folha projetado (maciço, tela, anel menor, anel maior, tubo);

1x Apoio para o Filtro;

1x Válvula de esfera metálica ½" fêmea/fêmea;

1x Bucha Redutora ½" para ¼" macho/fêmea;

1x Bico ¼" rosca ½" fêmea;

2x Conector Bico ¼" bico ¼";

1x Rosca de Borracha nr 12 com furo para termômetro;

1x Kitassato de 1L;

2 m de mangueira transparente com ¼" interno;

Tecido 100% Algodão multifilamento em Tela;

1x Bomba a vácuo;

1x Balde de 20L;

1x Agitador mecânico;

1x Anel de vedação de 4 ½” com 3mm de espessura;

1x Veda Rosca;

Amostra de rejeito de minério de ferro de Itatiaiuçu-MG;

Balança de Precisão;

Pratos;

Paquímetro.

3.4.2. Teste Preliminar de Filtração

Para verificar se o equipamento estava funcionando como o esperado, realizou-se uma montagem prévia do equipamento para rodar com água limpa. O intuito foi verificar se todas as conexões estavam devidamente vedadas e se o equipamento estava funcionando.

Primeiramente montou-se o filtro com a válvula e o bico com auxílio de veda rosca (figura 35 e 36).



Figura 35 - Bucha, Válvula e Bico.
Fonte: Autoria própria.



Figura 36 - Filtro pré-montado e vedado.
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, colocou-se a tela no filtro, prendeu-se um pedaço de tecido com o anel de vedação e cortou-se o excesso com a tesoura (figuras 37, 38 e 39).



Figura 37 - Filtro com a Tela encaixada.
Fonte: Autoria própria.



Figura 38 - Filtro com o tecido preso.
Fonte: Autoria própria.



Figura 39 - Filtro com o tecido preso e aparado.
Fonte: Autoria própria.

Prendeu-se o anel menor no filtro para fixar mais ainda o tecido no filtro (figura 40). A utilização do anel maior nesta etapa não era necessária.

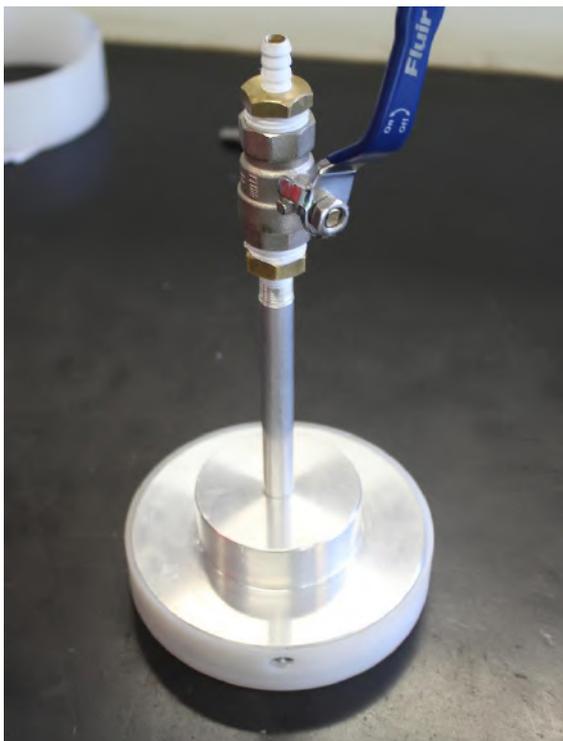


Figura 40 - Filtro montado finalizado.
Fonte: Autoria própria.

Para evitar o by-pass do filtrado do kitassato para a bomba de vácuo, utilizou-se um conector na rolha e um pedaço de mangueira para que a entrada do filtrado no kitassato ficasse mais baixa que a saída de ar para a bomba (figura 41).

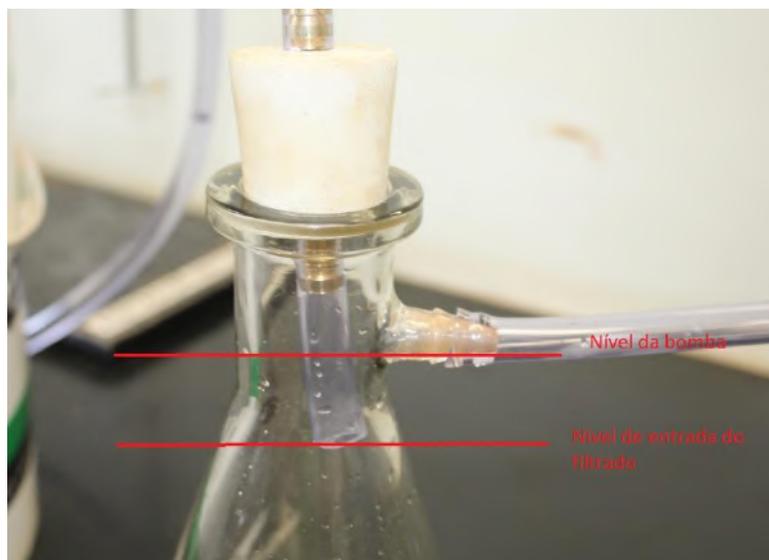


Figura 41 - Detalhe das conexões do kitassato.
Fonte: Autoria própria.

Por fim, regulou-se altura do apoio para o balde utilizado, posicionou-se o agitador mecânico e conectou-se a bomba ao sistema. As figuras 42 e 43 ilustram o equipamento devidamente montado.



Figura 42 - Montagem completa.
Fonte: Autoria própria.



Figura 43 - Detalhe superior da montagem.
Fonte: Autoria própria.

3.4.3. Amostra e condições operacionais do teste de folha

Escolheu-se um rejeito proveniente do beneficiamento de minério de ferro da empresa MINERITA – Minérios Itaúna Ltda, localizada em Itatiaiuçu-MG. Selecionou-se o material por possuir baixa taxa de sedimentação, presença de finos e filtrabilidade.

Testes de picnometria e peneiramento, realizados previamente no laboratório de Tratamento de Minérios, caracterizaram o material com uma densidade de $2,93 \text{ g/cm}^3$ e a distribuição granulométrica mostrada no gráfico 1 e na tabela A1 (Anexo 1). Observou-se que 46,8% da amostra é passante em 37 μm .

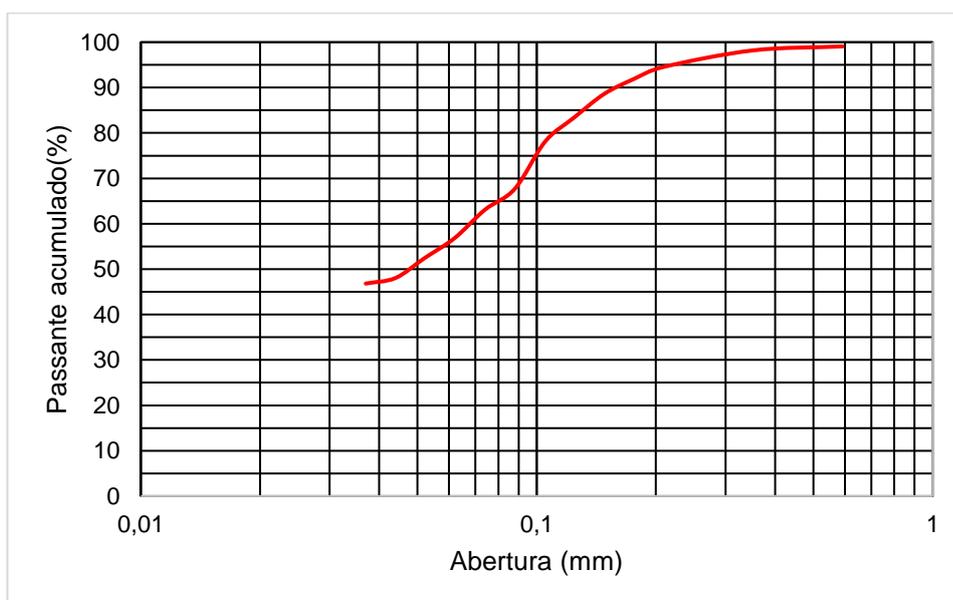


Gráfico 1 - Distribuição Granulométrica do Rejeito de Ferro.

Com um quarteador Jones, quarteou-se um lote do rejeito até obter uma parcela com massa de 11,75 kg (figura 44). Para maior representatividade de um processo de beneficiamento de minério, decidiu-se realizar o teste com uma porcentagem de sólidos de 50%. Para preparar a polpa nessa concentração de sólidos, separou-se no balde uma quantia de 11,75 kg de água. Ressalta-se que o material estava seco, porém pode possuir uma pequena quantidade de umidade natural que não será considerada nestes cálculos. Portanto, o volume total de polpa foi de $15,76 \text{ dm}^3$.



Figura 44 - Rejeito Seco quarteado.
Fonte: Autoria própria.

Em seguida, manteve-se a polpa com uma agitação mecânica de 1600 rpm por 10 minutos, sendo monitorada constantemente em relação a deposição de material no fundo no balde (figura 45).



Figura 45 - Polpa sendo preparada.
Fonte: Autoria própria.

Em relação a bomba, definiu-se uma pressão de sucção de vácuo de -400 mmHg, máxima alcançada pela bomba utilizada para a polpa preparada. Vale ressaltar que para filtros de alimentação inferior, o ideal seria um valor de aproximadamente -0,8 bar (-600mmHg), segundo Wakeman e Tarleton (2007).

Para definir o tempo de filtração, analisou-se um gráfico de tempo x massa de filtrado, apresentado no Gráfico 2. Os dados foram obtidos em um teste preliminar (mostrado na tabela A2, Anexo 2) com uma balança abaixo do kitassato, onde determinou-se o tempo de formação da torta. O tempo de formação da torta ideal é o ponto onde o gráfico sai de um formato logarítmico e passa a ficar linear, neste caso, observou-se um comportamento mais linear a partir de 40 segundos. Adotou-se um tempo de formação da torta de 1 minuto, admitindo um fator de segurança. Já para padronizar o tempo de secagem, analisou-se o fluxo de líquido na tubulação, até o momento em que parou de escorrer líquido, o que resultou em um tempo de 30 segundos.

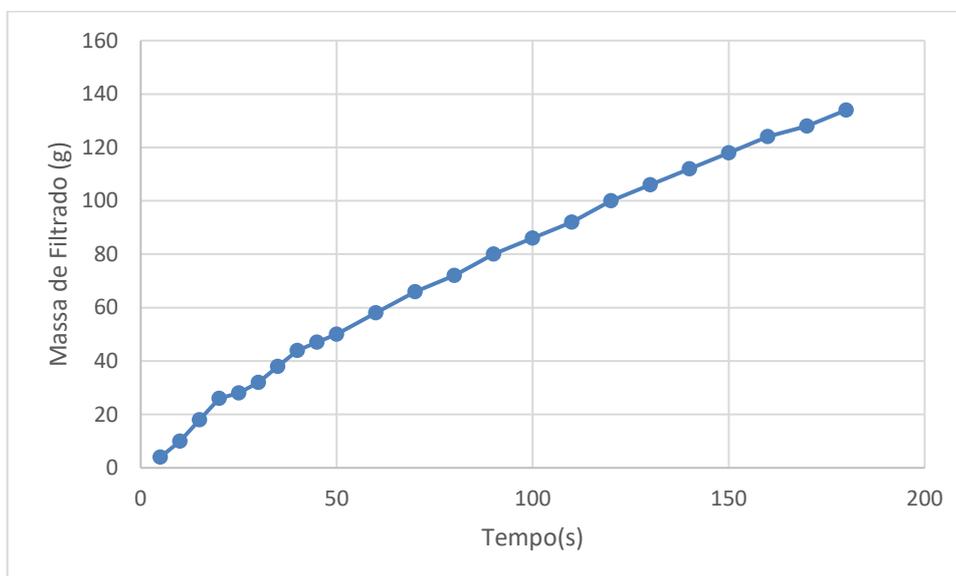


Gráfico 2 – Massa de filtrado em função do tempo de Filtragem.

3.4.4. Análise qualitativa e quantitativa das tortas

Para verificar a funcionalidade do filtro, realizou-se quatro filtrações com variações na configuração de montagem do filtro, são elas:

Teste 1 – Filtragem utilizando a tela e o anel menor;

Teste 2 – Filtragem utilizando a tela e o anel maior;

Teste 3 – Filtragem sem a tela e com o anel menor;

Teste 4 – Filtragem sem a tela e com o anel maior;

O intuito destes testes é verificar a influência da utilização da tela na taxa unitária de filtração (TUF), bem como avaliar a eficácia do uso do anel maior. Ou seja, examinar se há alteração no formato da torta quando se utiliza o anel maior, no caso,

maior efeito de borda (situação ilustrada na figura 23a). Além de avaliar se a presença da tela evita o abaulamento do meio filtrante para o interior do filtro.

Para a análise quantitativa, mediu-se as espessuras das tortas com um paquímetro. Coletou-se todo material de cada torta para aferição da massa úmida. Em seguida, levou-se as tortas úmidas para a estufa, onde ficaram por 24 horas e assim, mediu-se as massas secas.

Para o filtrado, coletou-se as massas, e mediu-se a turbidez de cada amostra, utilizando turbidímetro da marca Hanna, mostrado na figura 46.



Figura 46 - Aferição da Turbidez.

Fonte: Autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PROTÓTIPO DO FILTRO

Os materiais selecionados para a fabricação das peças do filtro estão listados a seguir.

Tarugo de alumínio 6" (152,40mm) com 50mm de espessura (figura 47a) para fabricação do maciço.

Tarugo de nylon 6 Ø150mm X 130mm (figura 47b) para fabricação do anel menor e anel maior.

Tubo redondo de alumínio ½" X 1/8" (12,7mm externo X 3,17mm interno) com 99cm (figura 47c) para fabricação do tubo.

A fabricação da tela ficou por conta de uma gráfica, que neste caso, utilizou policarbonato transparente.

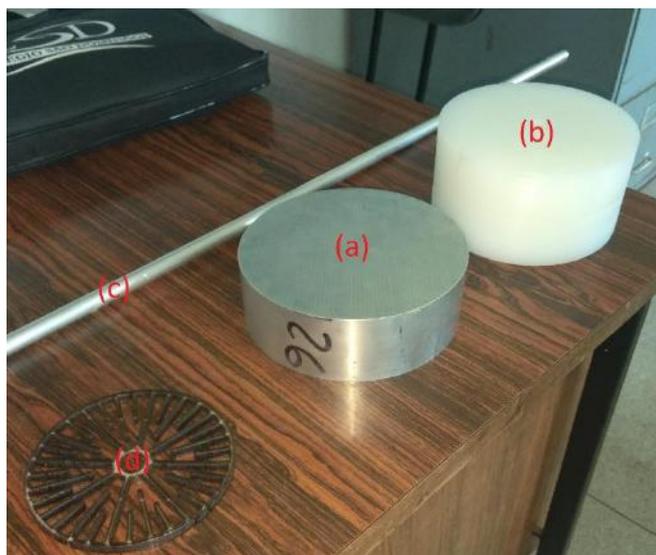


Figura 47 - Materiais para a fabricação do filtro.
Fonte: Autoria própria.

Torneou-se o maciço no laboratório de usinagem do CEFET, sua execução foi fácil, porém exigiu-se uma alteração pequena do projeto inicial, pois o torno não conseguiu segurar o tarugo para fazer os detalhes laterais da peça, o que exigiu uma parte central superior mais larga, como indicado na figura 48.

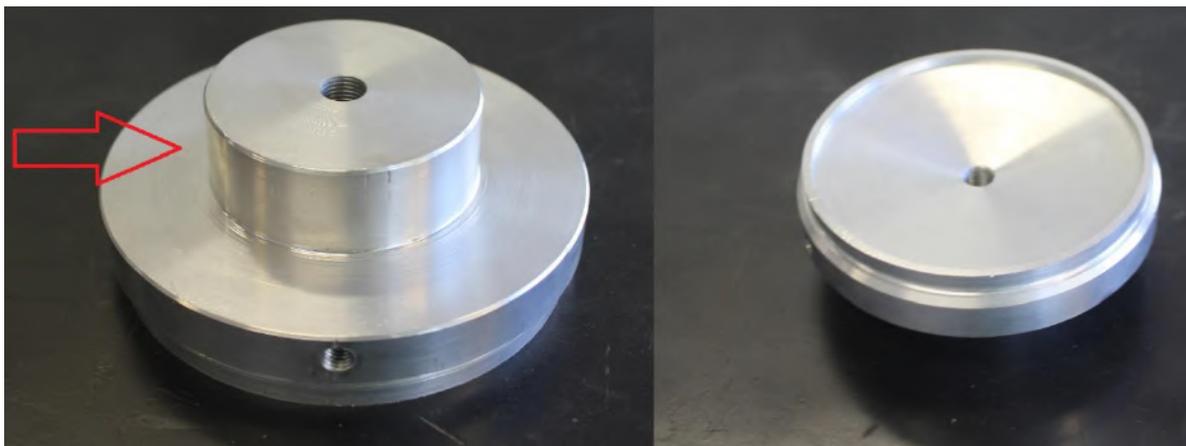


Figura 48 - Maciço torneado finalizado.
Fonte: Autoria própria.

A tela foi fabricada por uma gráfica a parte, devido à complexidade da peça, exigiu-se uma máquina CNC. No caso, utilizou-se uma CNC de corte por CO₂ para um policarbonato de 6mm de espessura, o resultado é mostrado na figura 49.



Figura 49 - Tela em policarbonato finalizada.
Fonte: Autoria própria.

Para o anel menor e maior (figura 50a e 50b), torneou-se o nylon. Devido a pequena espessura das paredes dos anéis, houve uma dificuldade na fixação do torno, o que levou a uma perda de material, impossibilitando a fabricação de um anel maior com 4 polegadas. O rasgo lateral também ficou comprometido devido ao risco de perder a peça. A junção do anel maior e menor ficou um pouco dificultada devido as várias tentativas de correção de diâmetro interno, porém não impediu a execução dos testes para este trabalho.

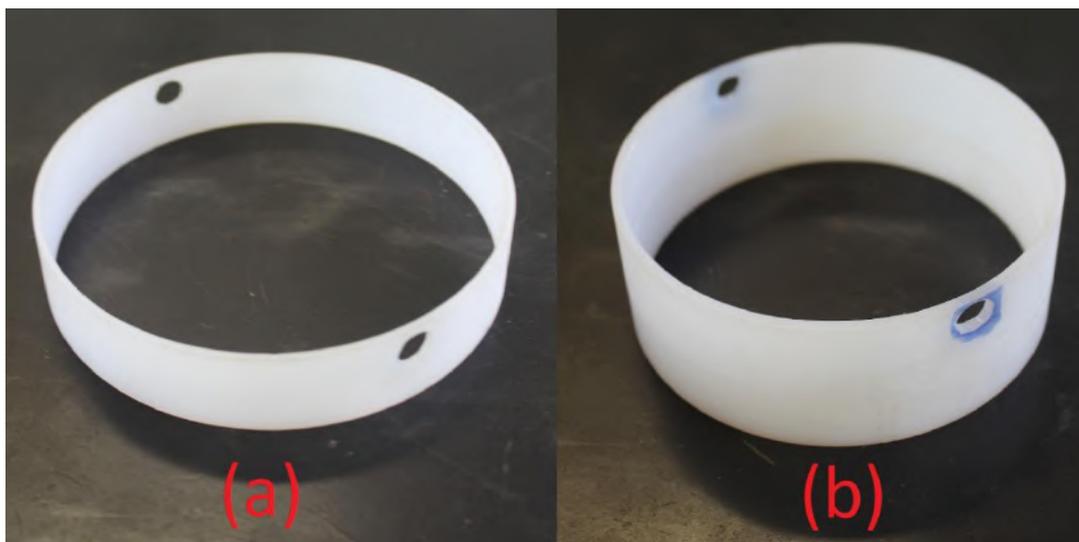


Figura 50 - Anel Menor (a), Anel Maior (b).
Fonte: Autoria própria.

O tubo (figura 51) foi facilmente fabricado utilizando as ferramentas de rosca manuais, não houve nenhuma variação para o projeto inicial.

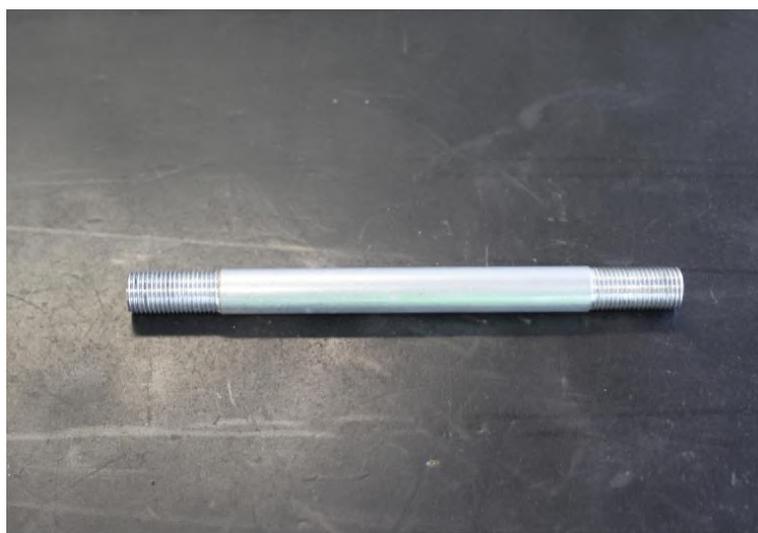


Figura 51 - Tubo finalizado.
Fonte: Autoria própria.

O apoio para o filtro, apresentado na figura 52, foi construído com madeira e ferragens. As hastes laterais são rosqueáveis, o que permite uma alteração da altura dos deques e um desmonte mais fácil. Os dois deques horizontais possuem uma abertura no centro que servem para apoiar o filtro na posição de filtragem (deque inferior) e secagem (deque superior).



Figura 52 - Apoio do Filtro.
Fonte: Autoria própria.

4.2. TESTE PRELIMINAR

O resultado do teste preliminar, utilizando apenas água de torneira, foi satisfatório. Não foi encontrado nenhum ponto com vazamento de água nem ar. Todas as conexões foram devidamente fortalecidas com veda rosca e não foi necessário a utilização de braçadeiras.

4.3. ANÁLISE QUALITATIVA

A figura 53 apresenta os resultados dos testes 1 e 3 onde utilizou-se o anel menor com e sem a tela, respectivamente. Enquanto a figura 54 mostra os resultados dos testes 2 e 4 que foram realizados com o anel maior com e sem a tela, respectivamente. Primeiramente, analisou-se o formato das tortas no filtro para verificar se houve uma variação no formato devido à presença ou não da tela.



Figura 53 - Comparativo teste 1 (esquerda) e 3 (direita).
Fonte: Autoria própria.



Figura 54 - Comparativo teste 2 (esquerda) e 4 (direita).
Fonte: Autoria própria.

Percebeu-se que os testes com a tela (figura 53 e 54 à esquerda), possuem um aspecto mais retilíneo na torta, o que melhorou a aferição da espessura da torta. Mesmo com a tela, o teste 1 (figura 53 à esquerda) mostrou um leve abaulamento do tecido em pequenos pontos do tecido, onde possuem áreas mais livres na tela (sem contenção), já para o teste 3 (figura 54 à esquerda) não foi tão visível.

Devido à falta da tela, para os testes 2 e 4 o abaulamento foi bem mais acentuado, o que pode causar alteração nas especificações do tecido. Observou-se uma retenção de bolhas de ar no centro da torta, tal efeito foi mais acentuado na presença do anel maior (figura 54 à direita). A retenção de bolhas pode ser explicada pelo ar retido na hora do mergulho do filtro na polpa, devido a tensão superficial da bolha.

Para analisar o efeito do anel maior, comparou-se os testes 1 e 2, apresentados na figura 55, e os testes 3 e 4, ilustrados na figura 56. Pelos resultados encontrados

até então, a presença da tela se faz importante no teste. No entanto, para analisar a diminuição do efeito de borda e a influência da agitação sobre a formação da torta, esperava-se um volume maior de torta formada. Devido ao baixo volume, decidiu-se tentar verificar através de análises quantitativas.



Figura 55 - Comparativo dos testes 1 (esquerda) e 2 (direita).
Fonte: Autoria própria.



Figura 56 - Comparativo entre os testes 3 (esquerda) e 4 (direita).
Fonte: Autoria própria.

4.4. ANÁLISE QUANTITATIVA

A partir de todos os dados coletados, compôs-se a tabela 5. A taxa unitária de filtração não foi multiplicada por nenhum fator de escala.

Tabela 5 - Resultado quantitativos dos testes de folha

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Tortaúmida (g)	46	63	32	26
Torta Seca (g)	34	46	24	20
Água (g)	12	17	8	6
Umidade (%)	26,1	27,0	25,0	23,1
Massa Filtrado (g)	110	156	106	96
Espessura da torta (mm)	2,36	3,25	2,01	1,86
Turbidez (FTU)	240	248	261	252
Taxa unitária de filtração (kg/h/m ²)	146,39	198,06	103,34	86,11

Analisando os valores da taxa unitária de filtração (TUF), percebeu-se que os testes 1 e 2, que utilizaram a tela, apresentaram maior produtividade e resultados melhores em relação a massa de torta seca que os testes 3 e 4 que não utilizaram a mesma.

Avaliando os testes onde foi utilizado o anel maior ao invés do anel menor, no caso os testes 2 e 4, verificou-se uma maior razão de filtração apenas do teste 2 em relação ao 1, enquanto o teste 4 possui um valor menor de massa de torta seca em relação ao teste 3, mesmo que seja um valor pequeno, o que não era de se esperar. Com isso, observou-se que a presença da tela interfere mais significativamente nos resultados que o anel maior e além disso, a combinação da tela e do anel maior contribuíram para obtenção da maior produtividade do filtro.

Todas as amostras de filtrado, apresentadas na figura 57, passaram por um teste de turbidez para composição da tabela 5. Percebeu-se, pelos valores e aparência do filtrado, que não teve uma variação significativa na turbidez. Devido à baixa porcentagem de sólidos e falta de um equipamento específico para aferição de sólidos para este caso não foi possível medir a porcentagem de sólidos no filtrado.



Figura 57 - Filtrados.
Fonte: Autoria própria.

Quanto á espessura da torta, os valores foram obtidos por pontos próximo ao centro do meio filtrante (Figura 58). Apesar do paquímetro oferecer uma precisão de duas casas decimais, estas casas não possuem tanta confiabilidade devido a variação da espessura ao longo do meio filtrante.



Figura 58 - Aferição da espessura da torta.
Fonte: Autoria própria.

Já as tortas foram removidas por uma espátula, aferidas as massas úmidas, levadas à estufa, e posteriormente, aferiu-se as massas secas. As tortas secas obtidas estão expostas na figura 59.



Figura 59 - Massa das tortas secas.
Fonte: Autoria própria.

A umidade, assim como a turbidez não apresentou valores tão distantes, tais variáveis dependem quase que diretamente do tipo de tecido e das características do material a ser filtrado. No entanto, o teste 4 (sem o uso da tela e com anel maior) apresentou a menor umidade da torta (23,1% contra 27,0% do teste 2), porém com a menor produtividade. Com menor massa retida na torta, mantendo o mesmo tempo de ciclo, a secagem foi mais eficiente, gerando uma torta menos úmida.

5. CONCLUSÃO

O conteúdo deste trabalho se iniciou contextualizando sobre o teste, introduzindo e definindo o conceito, funcionamento e variações do filtro folha. Esta pesquisa inicial fornece uma base teórica mais rica para informar sobre como prosseguir com a realização do teste, entendendo seus princípios, variações, referência, vantagens e desvantagens. Além de proporcionar o desenvolvimento de um projeto para criação do equipamento.

Em seguida, tratou-se sobre a fabricação do filtro e sua montagem, mostrando detalhadamente todo o desenvolvimento e procedimento para validação e avaliação do protótipo de filtro folha com alimentação inferior. Em relação ao equipamento projetado e o executado, alcançou-se devidamente os objetivos físicos do protótipo, criando um filtro totalmente funcional e prático, que atende as exigências do teste.

Já a realização do teste, com o rejeito de minério de ferro proveniente de Itatiaiuçu-MG, confirmou, diante dos resultados qualitativos encontrados, que a utilização do filtro com a tela e o anel maior oferece uma qualidade maior à torta formada. Para os dados quantitativos, observou-se que o filtro em sua montagem com tela e anel maior possui um efeito sinérgico sobre a taxa unitária de filtração, em comparação com a montagem sem tela e sem anel menor, ouve um aumento de 92% na TUF, passando de 103,34 para 198,06 kg/h/m². Enquanto que a menor umidade da torta foi obtida sem a tela e com o anel maior.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos a serem realizados, sugere-se novos testes utilizando outras amostras e meios filtrantes específicos. Além disso, correlacionar os resultados do teste com os equipamentos industriais.

Uma outra sugestão, refere-se à criação de peças auxiliares ao protótipo de filtro desenvolvido que permita a utilização do mesmo para testes com alimentação superior e lateral, como ilustrada na figura 18.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, S. C. **Filtragem de minérios de ferro - comparação entre métodos de filtragem de laboratório:** Testes de Folha e de Funil de Büchner. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 137 p.

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

CONCHA, F. A. **Solid-Liquid Separation in the Mining Industry.** 1ª. ed. Concepción: Springer, v. 105, 2014.

DAHLSTROM, D. A.; SILVERBLATT, C. E. **Solid/Liquid separation equipment and scale-up.** Croydon: [s.n.], 1977.

AKERS, D. J. ; MOSS, E. A. **Dewatering of Mine Drainage Sludge, Phase II.** Washington: Office of Research and Monitoring, 1973.

EIMCO. **EIMCO Filter Test – Leaf Kit – Introduction Booklet.** [S.l.]: [s.n.], 1987.

ELAN. Rotâmetros. **ELAN Equipamentos Industriais LTDA**, 2018. Disponível em: <<http://www.elan.ind.br/valvulas/rotametros.html>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

NOTAS DE AULAS, A. D. UNIMAP - Universiti Malaysia Perlis. **KEJURUTERAAN BIOPROSES**, 2014. Disponível em: <http://portal.unimap.edu.my/portal/page/portal30/Lecturer%20Notes/KEJURUTERAAN_BIOPROSES/Semester%202%20Sidang%20Akademik%2020132014/BIOPROCESS%20ENGINEERING%20PROGRAMME/Third%20Year/ERT%20320%20-%20BIOSEPARATION%20ENGINEERING/3rd%20lecture%20pdf%20II.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2018.

NUNES GOMES, M. V. **Teste de Folha em Filtragem:** uma reavaliação. Belo Horizonte: UFMG, 1999.

OLIVEIRA, M. S. **Apostila de prática experimental de tratamento de minérios.** Araxá: CEFET-MG, 2015.

PURCHAS, D. B. **Solid/liquid separation technology.** Croydon: [s.n.], 1981.

RURALBAN. VACUÔMETRO. **RuralBan.com**, 2018. Disponível em: <<https://www.ruralban.com/ordenhadeira-mecanica/partes-e-pecas/outros/vacuometro>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

RUSHTON, A.; WARD, A. S.; HOLDICH, R. G. **Solid-Liquid Filtration and Separation Technology**. Weinheim: VCH, 1996.

RUTHVEN, D. M. **Physical Adsorption: Experiment, Theory, and Applications**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, v. 49, 1997.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **TRATAMENTO DE MINÉRIOS: PRÁTICAS LABORATORIAIS**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

STAUCH, C. **Tecidos Técnicos para Filtração - Seminário de filtração**. Catalão: UFG, 2013.

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

TAGGART, A. F. **HANDBOOK OF MINERAL DRESSING: ORES AND INDUSTRIAL MINERALS**. New York: Digital Library Of India, 1927.

VALADÃO, G. E. S. **Notas de Aula do Curso de Especialização em Recursos Minerais - DEMIN: ENM 526 – Separação Sólido e Líquido**. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/Liquid Separation: Principles of Industrial Filtration**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, 2005a.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/Liquid Separation: Scale-up of Industrial Equipment**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, 2005b.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. **Solid/Liquid Separation: Equipment Selection and Process Design**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, 2007.

ANEXO 1 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Tabela 6 - A1 - Distribuição granulométrica do Rejeito de Ferro.

Massa inicial (g)			201,68		
Mesh (#)	Abertura(mm)	Massa retida(g)	Retido simples (%)	Retido acumulado (%)	Passante (%)
30	0,592	1,87	0,93	0,93	99,07
45	0,352	1,75	0,87	1,80	98,20
65	0,209	7,33	3,65	5,46	94,54
80	0,176	5,3	2,64	8,10	91,90
100	0,148	6,64	3,31	11,40	88,60
120	0,124	10,56	5,26	16,67	83,33
150	0,105	10,49	5,23	21,89	78,11
170	0,088	20,91	10,42	32,31	67,69
200	0,074	9,22	4,59	36,90	63,10
230	0,062	12,57	6,26	43,17	56,83
270	0,052	8,9	4,43	47,60	52,40
325	0,044	8,7	4,33	51,94	48,06
400	0,037	2,47	1,23	53,17	46,83
-400	-0,037	94	46,83	100,00	0,00
Total (g)		200,71	Perca de massa (%)		0,48

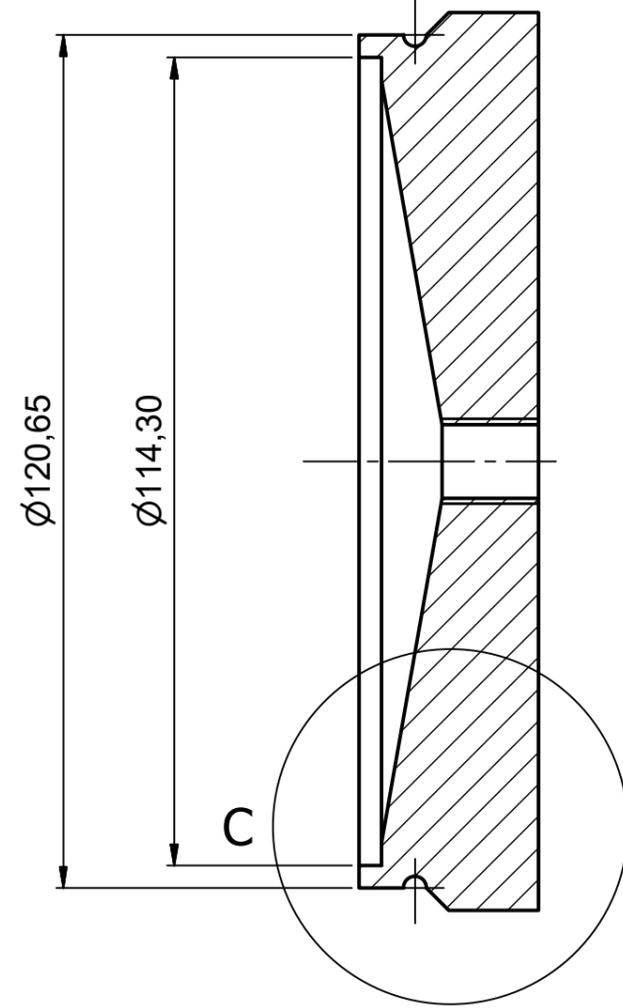
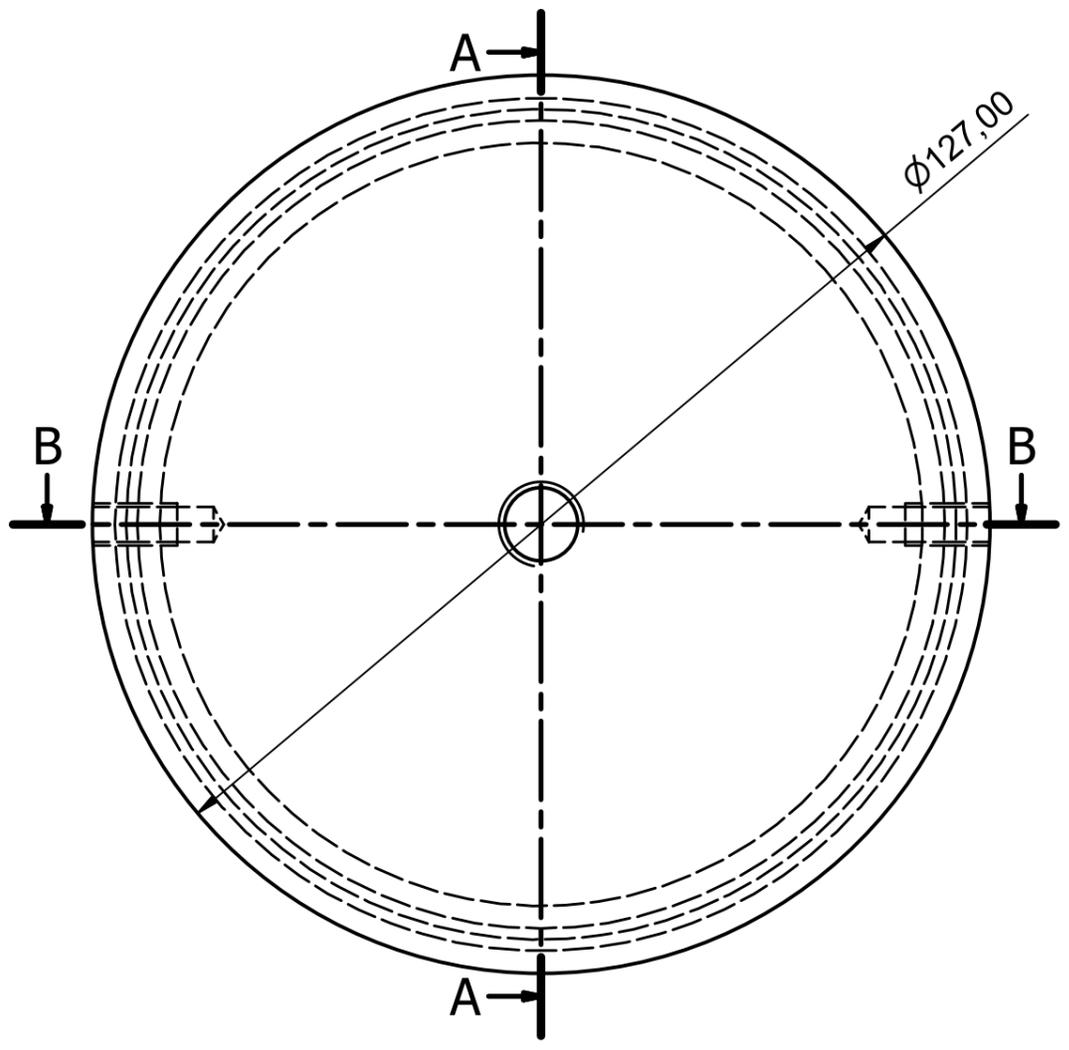
ANEXO 2 – TEMPO DE FILTRAGEM

Tabela 7 - A2 - Dados do tempo de filtração.

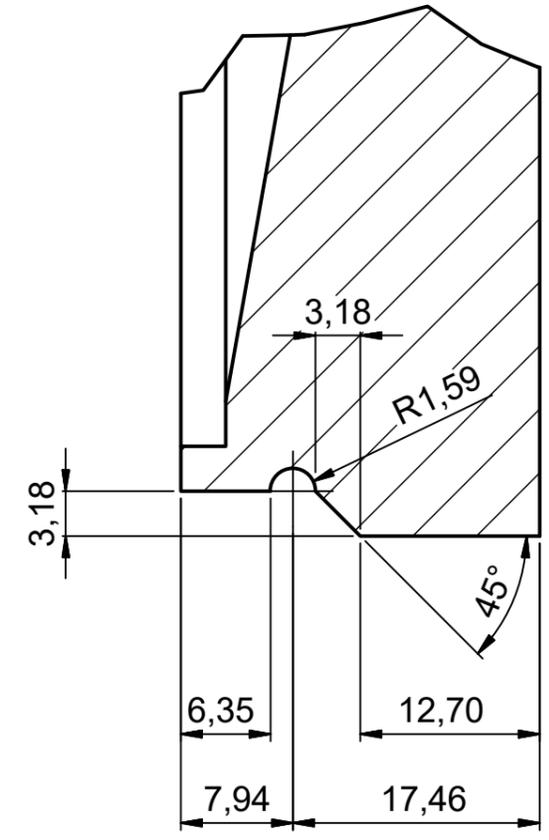
Tempo (s)	Massa de filtrado (g)
5	4
10	10
15	18
20	26
25	28
30	32
35	38
40	44
45	47
50	50
60	58
70	66

Tempo (s)	Massa de filtrado (g)
80	72
90	80
100	86
110	92
120	100
130	106
140	112
150	118
160	124
170	128
180	134

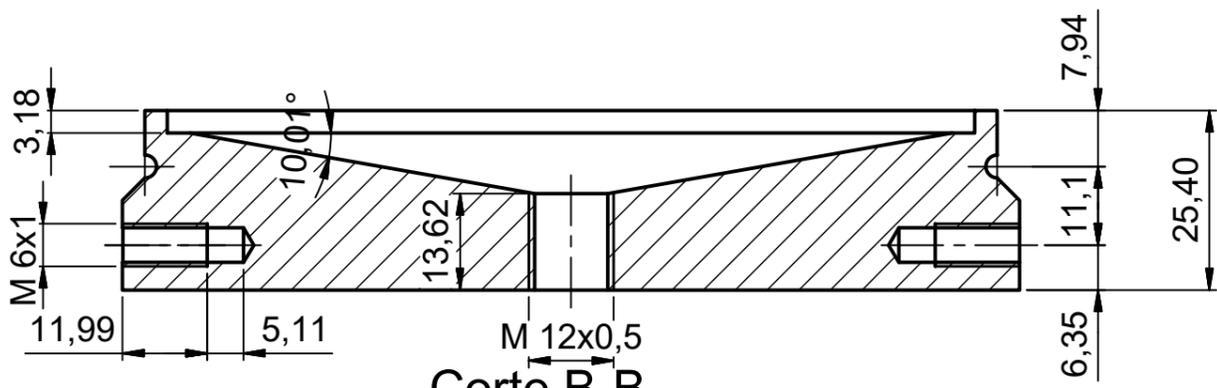
APÊNDICE – Projetos



Corte A-A

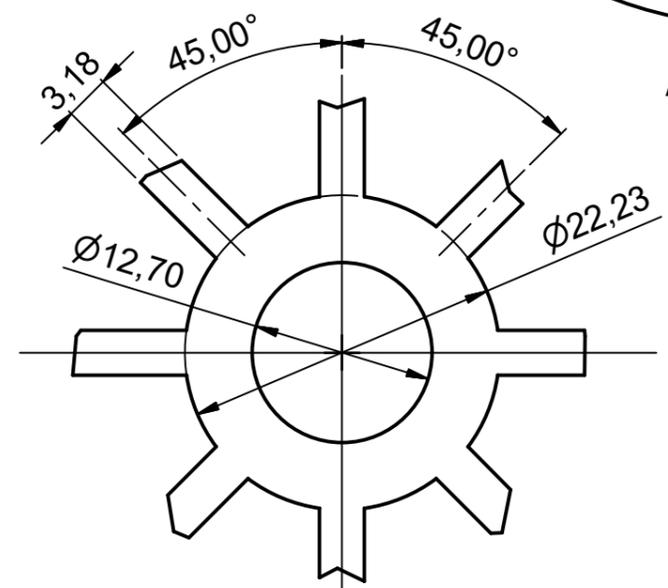
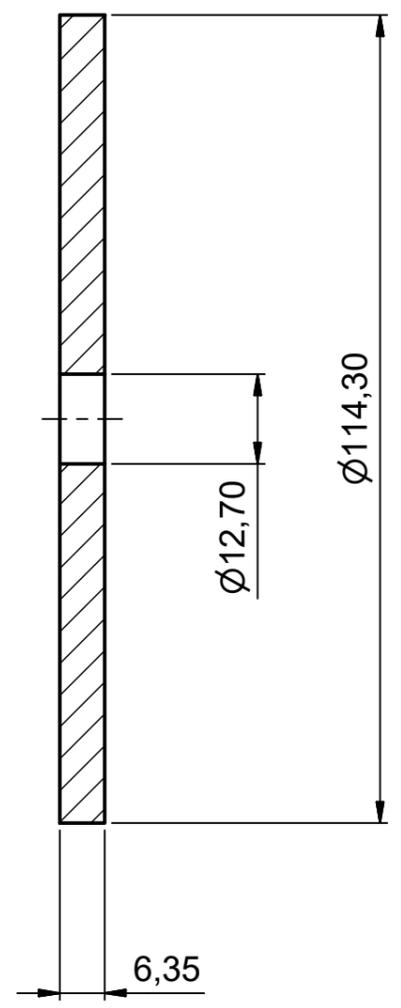
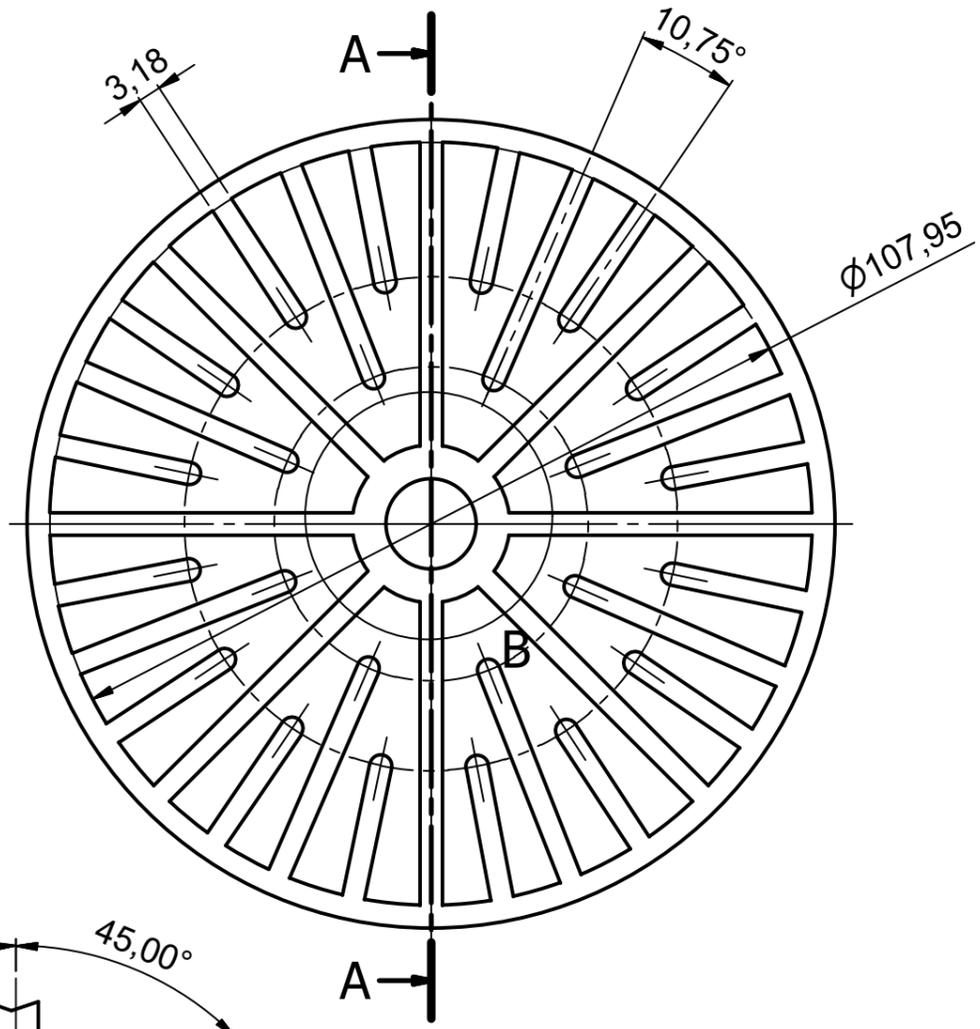


Vista C - Escala 2:1



Corte B-B

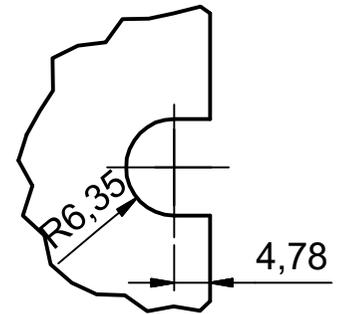
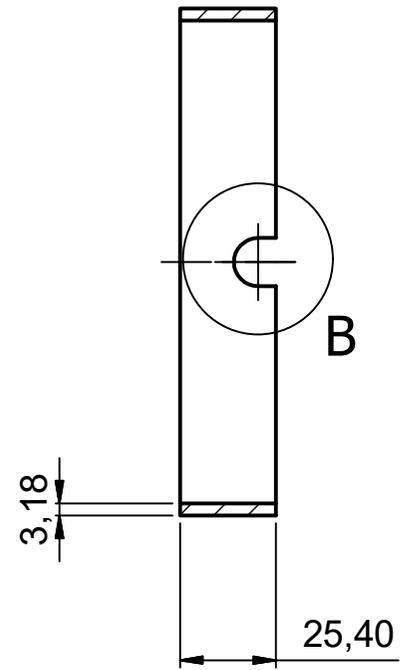
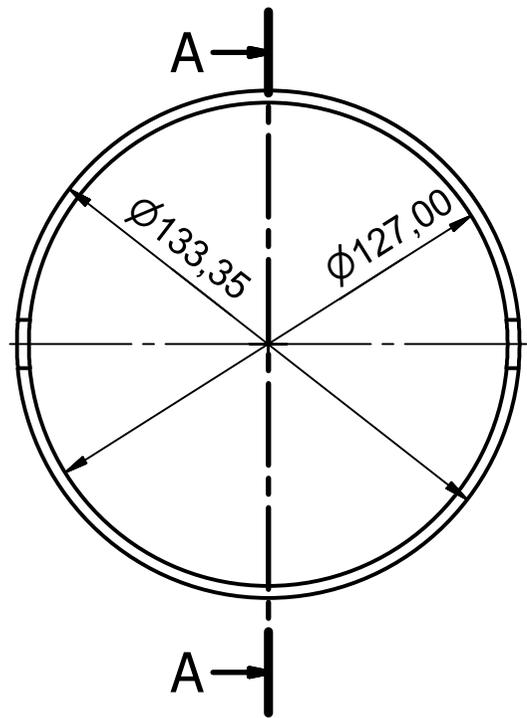
Projetado por Mateus de Paiva Cardoso	Verificado por Renato Montandon de Lima	Data 23/08/2018
CEFET - MG / CAMPUS ARAXÁ		Nome Protótipo Filtro Folha
		Parte Maciço
	Edição 1	Folha 1 / 1



Detalhe B

Corte A-A

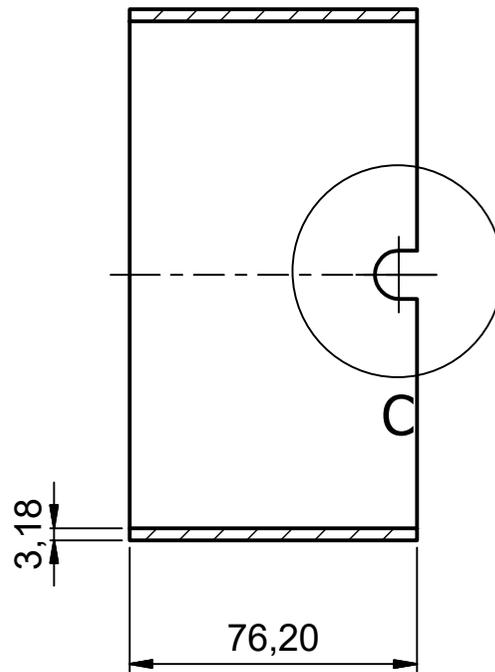
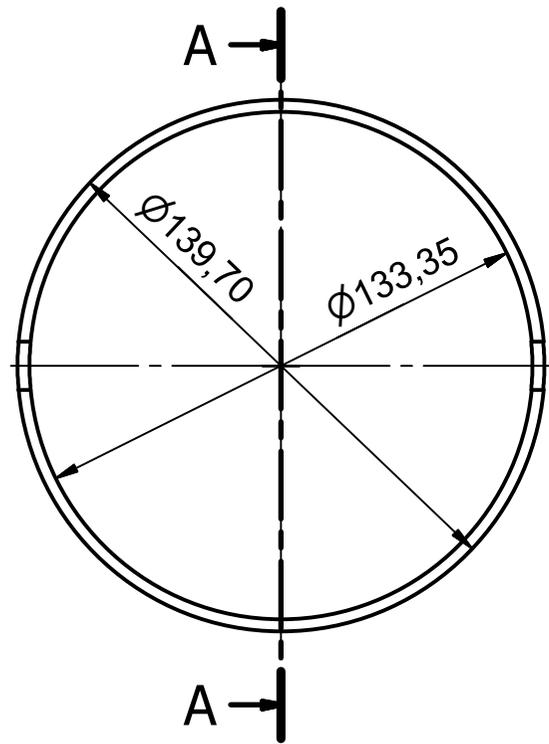
Projetado por Mateus de Paiva Cardoso	Verificado por Renato Montandon de Lima	Data 23/08/2018
CEFET - MG / CAMPUS ARAXÁ		Nome Protótipo Filtro Folha
Parte Tela	Edição 1	Folha 1 / 1



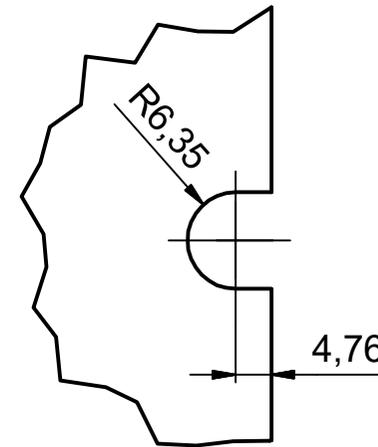
Corte A-A

Detalhe B

Projetado por Mateus de Paiva Cardoso	Verificado por Renato Montandon de Lima	Data 23/08/2018	
CEFET - MG / CAMPUS ARAXÁ		Nome Protótipo Filtro Folha	
		Parte Anel Menor	Edição 1

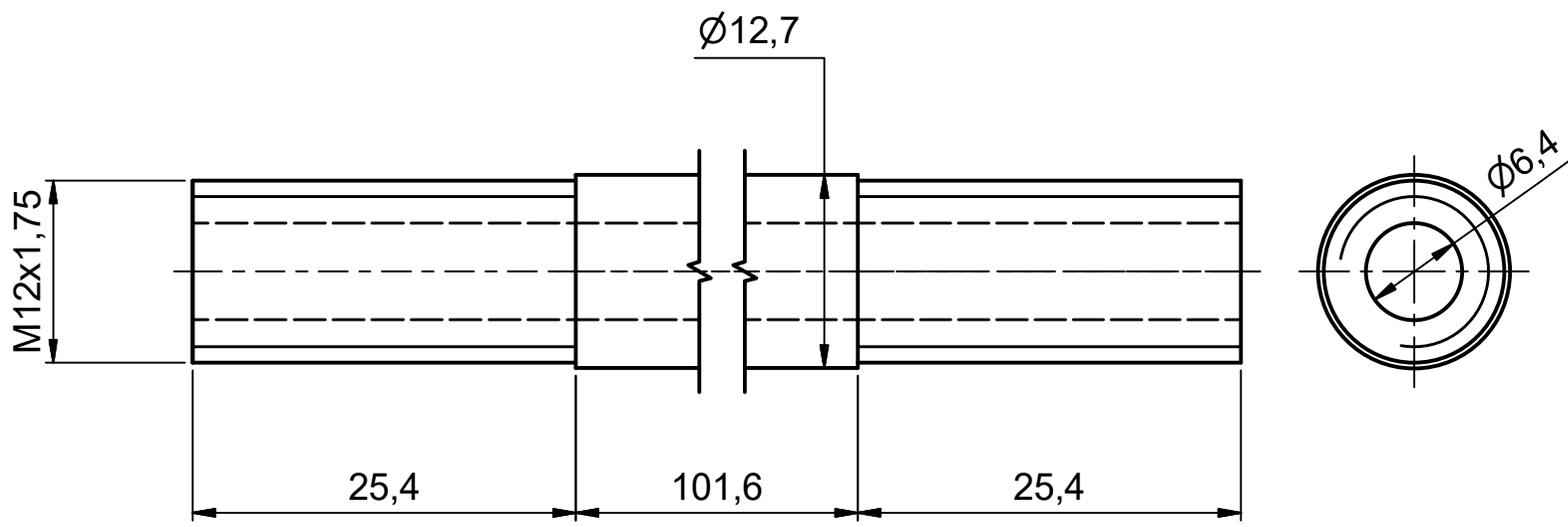


Corte A-A



Detalhe C

Projetado por Mateus de Paiva Cardoso	Verificado por Renato Montandon de Lima	Data 23/08/2018	
CEFET - MG / CAMPUS ARAXÁ		Nome Protótipo Filtro Folha	
		Parte Anel Maior	Edição 1



Projetado por Mateus de Paiva Cardoso	Verificado por Renato Montandon de Lima	Data 23/08/2018
CEFET - MG / CAMPUS ARAXÁ		Nome Protótipo Filtro Folha
		Parte Tubo
	Edição 1	Folha 2 / 1