

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL – CAMPUS FELIZ

GUILHERME DA SILVA GIULIANI

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO
DE FILTRO PRENSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientador: Dr. Matheus Felipe Pedrotti

FELIZ

2024

GUILHERME DA SILVA GIULIANI

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM PROTÓTIPO
DE FILTRO PRENSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Me. Flávia Dagostim Minatto

Prof.^a. Dra, Nicécia Chies da Fré

ORIENTADOR

Prof. Dr. Matheus Felipe Pedrotti

Feliz, 26 de Novembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS – Campus Feliz)**, por fornecer condições para a realização deste trabalho.

A todos os docentes do curso de **Bacharelado em Engenharia Química** por todos os ensinamentos e conselhos, sendo fundamentais para meu crescimento durante o curso.

Ao Prof. Dr. **Mateus Felipe Pedrotti**, pela orientação, paciência, pelos conselhos e ensinamentos durante toda a realização deste projeto.

Aos membros da banca avaliadora pela oportunidade de apresentar o projeto e pelas sugestões de melhoria dadas ao trabalho realizado.

Aos meus pais, **Alberto Giuliani e Eurenice Maria da Silva Giuliani**, por todo o apoio incentivo, conselhos, ensinamentos e por sempre estarem ao meu lado durante todas as dificuldades enfrentadas até aqui.

Aos meus **colegas e amigos**, por toda a caminhada, companheirismo e conhecimentos trocados durante todo o curso.

RESUMO

Filtros tipo prensa são amplamente empregados em diversas indústrias, processos produtivos e em etapas de tratamento de água e efluentes. Possuem estrutura geralmente baseada em placas e quadros com meio filtrante entre cada parte do equipamento. Este trabalho possui como objetivo desenvolver um protótipo de filtro prensa de quadros e placas em escala de bancada para uso didático no IFRS Campus Feliz. O protótipo desenvolvido foi desenhado através do software AutoCAD e posteriormente impresso a partir de técnica de impressão 3D. Para montagem do restante da estrutura necessária para funcionamento do protótipo foram utilizadas tubulações, bomba e suportes disponíveis no laboratório de Engenharia Química do campus. O objetivo da construção do protótipo proporcionou um melhor entendimento prático de conhecimentos relacionados a operações unitárias de filtração aos discentes do curso e visa agregar ainda mais qualidade a formação dos estudantes. O protótipo possui 124,62 mm de largura, 89,94 mm de altura e espessuras de 10 mm para os quadros e placas centrais e 15 mm para as placas de entrada e saída do filtro. Para a realização dos testes de influência do meio filtrante e influência da pressão de operação será utilizada uma suspensão modelo a base de água e carbonato de cálcio. Foram realizados testes com pressões de operação de 0,02; 0,04; 0,06; 0,10; 0,12 e 0,20 bar. O protótipo apresentou condições de operação adequadas, principalmente a 0,10 bar, onde a pressão se manteve constante e apresentou a melhor formação de torta entre os testes realizados, apresentando valores de RSD próximos aos 10% para K_p e B , entretanto, são necessários ajustes e melhorias tanto na estrutura do protótipo quanto no que se refere ao meio filtrante utilizado. Os dados obtidos neste trabalho podem servir como uma base para futuras melhorias, refinando o equipamento e possibilitando testes em condições mais variadas. Pode-se concluir, portanto, que os objetivos propostos para este trabalho foram cumpridos, sendo possível, desenvolver um protótipo de filtro prensa em escala de bancada e realizar testes relacionados a sua eficiência nas condições estabelecidas durante o desenvolvimento do projeto.

Palavras-chave: Filtro tipo prensa. Protótipo didático. Impressão 3D. Meio filtrante. Pressão manométrica de operação.

ABSTRACT

Press-type Filters are widely used in various industries, production processes, and in water and wastewater treatment stages. They typically have a structure based on plates and frames with a filter medium between each part of the equipment. This study aims to develop a bench-scale prototype of a plate-and-frame press filter for educational use at IFRS Campus Feliz. The prototype was designed using AutoCAD software and subsequently manufactured using 3D printing technology. For assembling the remaining structure necessary for the prototype's operation, piping, a pump, and supports available in the campus Chemical Engineering laboratory were utilized. The objective of constructing the prototype was to provide a practical understanding of filtration-related unit operations to students in the program, thereby enhancing the quality of their education. The prototype measures 124.62 mm in width, 89.94 mm in height, with frame and central plate thicknesses of 10 mm and inlet/outlet plate thicknesses of 15 mm. To conduct tests on the influence of the filter medium and operating pressure, a model suspension based on water and calcium carbonate was used. Tests were performed at operating pressures of 0,02; 0,04; 0,06; 0,10; 0,12 and 0,20 bar. The prototype demonstrated adequate operating conditions, particularly at 0,10 bar, where pressure remained constant, yielding the best cake formation among the tests conducted. At this pressure, RSD values close to 10% were obtained for Kp and B. However, adjustments and improvements are needed both in the prototype's structure and in the filter medium used. The data obtained in this study can serve as a basis for future improvements, refining the equipment and enabling tests under more varied conditions. It can thus be concluded that the objectives proposed for this study were met, successfully developing a bench-scale press filter prototype and conducting tests related to its efficiency under the conditions established during the project.

Keywords: Press-type filter. Educational prototype. 3D printing. Filter medium. Operating gauge pressure.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	6
<i>1.1 OBJETIVOS.....</i>	<i>7</i>
1.1.1 Objetivo Geral.....	7
1.1.2 Objetivos Específicos.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
<i>2.1 OPERAÇÃO UNITÁRIA DE FILTRAÇÃO.....</i>	<i>8</i>
<i>2.2 TIPOS DE FILTROS.....</i>	<i>13</i>
2.2.1 Filtros à vácuo.....	13
2.2.1.1 Filtro rotativo tipo tambor.....	13
2.2.1.2 Filtro plano ou tipo mesa.....	14
2.2.2 Filtros de pressão.....	15
<i>2.3 FILTRO PRENSA.....</i>	<i>15</i>
2.3.1 Construção.....	15
2.3.2 Funcionamento.....	16
2.3.3 Limpeza.....	17
2.3.4 Cálculos de desempenho e tempo.....	18
2.3.4.1 Tempo de filtração.....	18
2.3.4.2 Tempo de lavagem da torta.....	19
2.3.4.3 Desempenho.....	19
2.3.5 Vantagens e Desvantagens.....	20
<i>2.4 OUTROS TRABALHOS.....</i>	<i>20</i>
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
<i>3.1 MATERIAIS.....</i>	<i>23</i>
<i>3.2 DIMENSIONAMENTO.....</i>	<i>24</i>
<i>3.3 MÉTODOS.....</i>	<i>27</i>
3.3.1 Avaliação da influência do meio filtrante.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
<i>4.3 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO.....</i>	<i>33</i>
4.3.1 Testes a 0,02 bar de pressão de operação.....	34
4.3.2 Testes a 0,04 bar de pressão de operação.....	36
4.3.3 Testes a 0,06 bar de pressão de operação.....	38
4.3.4 Testes a 0,10 bar de pressão de operação.....	40
4.3.4 Testes a 0,12 e 0,20 bar de pressão de operação.....	42
4.3.5 Comparativo.....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	44
6 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS.....	45
REFERÊNCIAS.....	46

1 INTRODUÇÃO

Os processos de filtração são utilizados nos mais diversos tipos de indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas, entre outras, e com as mais diversas finalidades. A operação unitária de filtração consiste na separação de materiais sólidos contidos em um fluido. O fluido pode ser um líquido ou gás que seja capaz de transpassar uma membrana porosa e permeável (tecido, papel, entre outros) (MATOS, 2015).

Na filtração o meio poroso utilizado é denominado filtro ou meio filtrante e o fluido que atravessa o filtro é chamado de filtrado. Durante o processo de filtração o material particulado presente na fase fluida pode se acumular no filtro, também atuando e ajudando na operação de filtração, e sendo chamada de torta de filtração (CREMASCO, 2018).

A operação unitária de filtração pode ser empregada por gravidade, a pressão elevada, vácuo, centrífuga ou por outro método que promova a separação da fase sólida da fase fluida (DALBERTO *et al.*, 2021). A filtração pode ser empregada durante etapas dos diversos processos produtivos dentro de uma indústria para a obtenção de um produto e até mesmo durante etapas posteriores como o caso de tratamentos de efluentes. Um dos tipos de filtro mais utilizados nas indústrias é o filtro prensa, pois possui uma grande variedade de aplicações e, entre os filtros de pressão com operação por batelada, o filtro prensa de quadros e placas é o mais utilizado (CREMASCO, 2018).

O protótipo de filtro prensa desenvolvido é do tipo de placas e quadros, projetado através do software AutoCAD e, posteriormente, impresso através de técnica de impressão 3D. O meio filtrante utilizado é tecido, o que facilita a passagem de filtrado e retenção de sólidos. Para realização de comparações entre dados teóricos e experimentais foi preparada uma solução de água e calcário e, então, foram realizados testes para observar como a vazão e a pressão se comportam durante o funcionamento do equipamento e suas respectivas influências no desempenho do filtro.

A criação de um protótipo didático, em âmbito acadêmico, em escala reduzida pretende auxiliar e possibilitar um entendimento e melhor visualização do funcionamento de um filtro prensa possibilitando a análise dos diversos parâmetros que podem influenciar no desempenho do equipamento. A utilização de um protótipo auxilia também a aplicação de forma prática de conceitos abordados de forma teórica durante a graduação

e contribui para uma melhor formação dos discentes. Portanto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e analisar o desempenho de um protótipo de filtro prensa, para posterior utilização como instrumento didático ou para realização de pesquisas no campus da instituição.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver, construir e analisar o desempenho de um protótipo de filtro prensa, em escala de bancada, para experimentos didáticos.

1.1.2 Objetivos Específicos

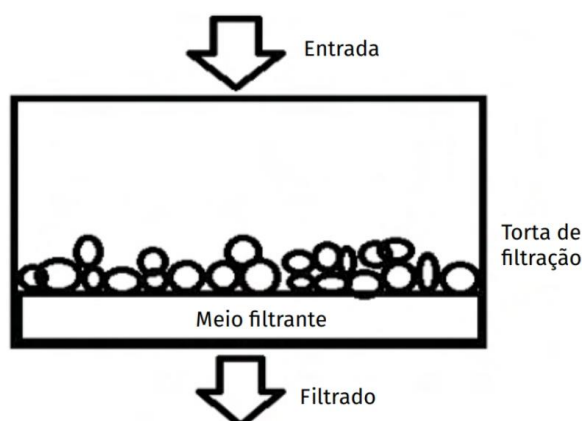
- a) Desenvolver e construir um filtro prensa em escala de bancada e de baixo custo, utilizando software AutoCAD para realização do projeto e, posteriormente, técnica de impressão 3D e materiais já presentes no laboratório de engenharia química do campus para construção do protótipo;
- b) Analisar a eficiência do protótipo de filtro prensa a partir de testes com variações de parâmetros operacionais como pressão, vazão e temperatura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OPERAÇÃO UNITÁRIA DE FILTRAÇÃO

A operação unitária de filtração pode ser caracterizada por um processo no qual ocorra a separação de partículas sólidas de uma fase fluida utilizando um meio poroso (HOWE *et al.*, 2016). Um processo de filtração pode ser descrito conforme a Figura 1. Na Figura 1 podemos observar o fluxo de entrada da mistura de fluido e material sólido, a formação da torta e do meio filtrante onde ambos atuam na remoção de material particulado da mistura e por fim o fluxo de filtrado após o término do processo de filtração.

Figura 1 – Processo de filtração.



Fonte: Adaptado de Dalberto *et al.* (2021)

A torta de filtração pode ser caracterizada como compressível – são afetadas pela queda de pressão e pelo aumento da espessura da torta, por exemplo – ou incompressível – não sofrem com possíveis variações operacionais. É importante salientar que o tipo de torta de filtração gera mudanças no processo de filtração, entretanto esta depende de características do material sólido (DALBERTO *et al.*, 2021).

Para obtenção da equação do tempo de filtração deve-se primeiramente obter as equações para previsão do comportamento da queda de pressão em casos de torta incompressível e para pressão total constante, para isso pode-se partir do princípio de que existem duas resistências durante a filtração: a torta e o meio filtrante. No início a resistência da torta é baixa, pois há pouca ou nenhuma formação, e aumenta no decorrer

do processo (GEANKOPLIS, 2018). A queda de pressão total, portanto, pode ser definida como:

$$\Delta P = P_A - P_B = (P_A - P') + (P' - P_B) = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (1)$$

Onde:

ΔP : queda de pressão total [Pa];

ΔP_c : queda de pressão na torta [Pa];

ΔP_m : queda de pressão no meio filtrante [Pa];

P_A : pressão no ponto A [Pa];

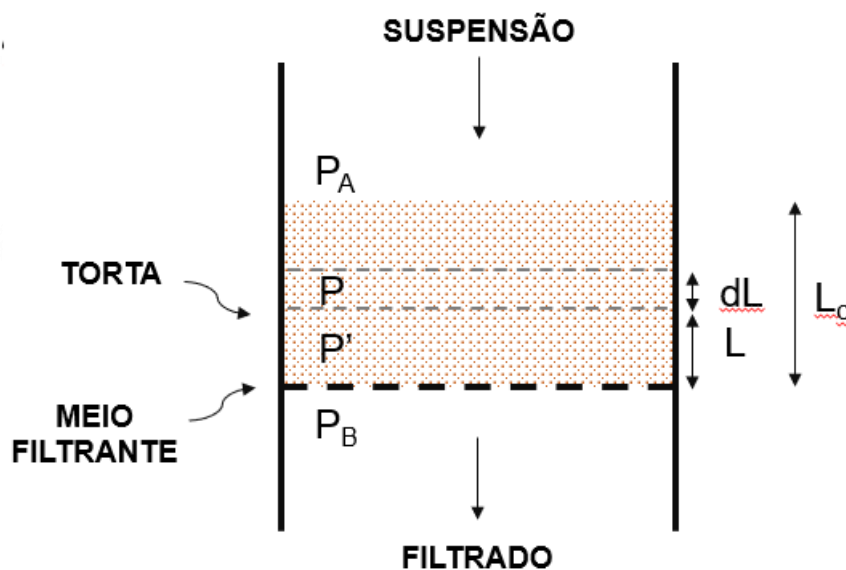
P_B : pressão no ponto B [Pa];

P : pressão da camada dL [Pa];

P' : pressão na interface da torta com o meio filtrante [Pa].

A Figura 2 apresenta um esquema da formação da torta durante a filtração e apresenta os termos da equação acima indicados para melhor entendimento.

Figura 2 – Esquema da formação da torta



Fonte: Elaborado pelo autor de acordo com Geankoplis, 2024.

O termo dL , presente na Figura 2, corresponde a uma fina camada de torta que está distante L do meio filtrante e sob uma pressão P . Para relacionar a distância L a queda de pressão total (ΔP), pode-se supor que a velocidade do filtrado é pequena e o fluxo é laminar, dessa forma, utiliza-se o primeiro termo da equação de Ergun para descrever esse comportamento (GEANKOPLIS, 2018).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{dP}{dL} = \frac{150\mu(1 - \varepsilon)^2 v}{(\phi D_s)^2 \varepsilon^3} \quad (2)$$

Onde:

μ : viscosidade do fluido [Pa.s];

ε : porosidade da torta;

Φ : esfericidade das partículas;

D_s : diâmetro de Sauter [m];

v : velocidade linear do filtrado baseada na área do filtro [m/s ou m³/(m².s)].

Normalmente a queda de pressão total é expressa a partir da razão da área superficial pelo volume das partículas presente na solução, dessa forma pode-se substituir o termo $D_s\Phi$ por $6(V_p/A_p)$ (GEANKOPLIS, 2018).

$$\frac{dP}{dL} = \frac{4,17\mu(1 - \varepsilon)^2 \left(A_p/V_p\right)^2 v}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

Onde:

V_p : volume de uma partícula [m³];

A_p : área de uma partícula [m²].

O termo referente a velocidade linear (v) é definido como:

$$v = \frac{dV/dt}{A} \quad (4)$$

Onde V = volume de filtrado coletado a partir do início da filtração até o tempo t [m³].

O volume de sólidos presente na camada é obtida por:

$$V_s = A(1 - \varepsilon)dL \quad (5)$$

A massa de partículas (dm) na camada depende do volume de sólidos e dessa forma pode-se escrever dL como função de dm , obtendo:

$$dL = \frac{dm}{\rho_s(1 - \varepsilon)A} \quad (6)$$

Reorganizando a equação para queda de pressão e substituindo dL obtem-se:

$$dP = \frac{k_1 \mu (1 - \varepsilon) \left(\frac{A_P}{V_P} \right)^2 v}{A \rho_s \varepsilon^3} dm \quad (7)$$

Onde $K_1 = 4,17$ e $\rho_s =$ densidade das partículas sólidas $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Integrando na equação acima dP de P' a P_A e dm de 0 a m_c obtemos a equação da queda de pressão para uma torta incompressível.

$$P_A - P' = \Delta P_c = \frac{k_1 \mu (1 - \varepsilon) \left(\frac{A_P}{V_P} \right)^2 v}{A \rho_s \varepsilon^3} m_c \quad (8)$$

Onde $m_c =$ massa de sólidos na torta $[\text{kg}]$.

Com intuito de simplificar a equação, define-se o termo da resistência específica da torta (α), dado em m/kg , que depende das propriedades da torta, no caso de tortas incompressíveis, independe da queda de pressão e caracteriza pontualmente a torta (FRANÇA, MASSARANI, 2018). Pode-se definir α de três maneiras:

$$\alpha = \frac{k_1 \left(\frac{A_P}{V_P} \right)^2 (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \rho_s} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{k_2 (1 - \varepsilon)}{(\phi D_s)^2 \varepsilon^3 \rho_s} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{\Delta P_c A}{\mu m_c v} \quad (11)$$

Para que seja possível calcular a queda de pressão total precisa-se também definir os termos referentes a queda de pressão no meio filtrante, partindo então da definição da resistência específica do meio filtrante (R_m), dado em m^{-1} (Equação 12). A resistência específica do meio filtrante varia de acordo com a queda de pressão, sendo significativa no início do processo de filtração e atingindo um valor constante ao longo do processo (GEANKOPLIS, 2018).

$$R_m = \frac{(P' - P_B)}{\mu v} = \frac{\Delta P_m}{\mu v} \quad (12)$$

A queda de pressão total é dada pela soma de dois termos, um referente a queda de pressão na torta e outro referente a queda de pressão no meio filtrante, conforme Equação 13 (GEANKOPLIS, 2018).

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m \quad (13)$$

Retomando as equações obtidas anteriormente para ΔP_c e ΔP_m e substituindo e organizando na equação acima obtemos:

$$\Delta P = \mu v \left(\frac{\alpha m_c}{A} + R_m \right) \quad (14)$$

Definindo os termos para massa da torta seca (m_c) e substituindo o termo da velocidade linear (v), pode-se reorganizar a equação para se obter uma relação entre a variação de tempo e volume da torta, dessa forma, precisa-se também definir o termo para a concentração corrigida de sólidos na suspensão de alimentação (c_s) (GEANKOPLIS, 2018).

$$m_c = V c_s \quad (15)$$

$$v = \frac{dV}{A dt} \quad (16)$$

$$c_s = \frac{c_f}{1 - \left[\frac{m_f}{m_c} - 1 \right] \frac{c_f}{\rho}} \quad (17)$$

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A \Delta P} \left(\frac{\alpha V c_s}{A} + R_m \right) \quad (18)$$

Onde:

c_s : concentração corrigida de sólidos na suspensão de alimentação [kg/m^3];

c_f : concentração de sólidos na suspensão de alimentação [kg/m^3];

m_f : massa da torta úmida [kg];

m_c : massa da torta seca [kg];

ρ : densidade do filtrado [kg/m^3];

ρ_s : densidade de partículas sólidas na torta [kg/m^3].

A partir da Equação 18 podemos realizar a multiplicação entre os termos presentes, reorganizar a equação e definir as variáveis K_p , dado em s/m^6 , e B , dado em s/m^3 , para obter a equação para filtração quando a ΔP é constante (GEANKOPLIS, 2018).

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 \Delta P} V + \frac{\mu}{A \Delta P} R_m \quad (19)$$

$$K_p = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 \Delta P} \quad (20)$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A \Delta P} \quad (21)$$

$$\frac{dt}{dV} = K_p V + B \quad (22)$$

Por fim, para chegarmos à equação para obtenção do tempo de filtração (t) basta reorganizar a equação e integrar com os limites de integração de 0 a t e de 0 a V para dt e dV , respectivamente, obtendo:

$$t = \frac{K_p}{2}V^2 + BV \quad (23)$$

Ao passar o termo em comum V para o outro lado realizando divisão obtém-se uma equação de reta que possui formato “ $y = ax + b$ ”, dessa forma, sendo possível observar o comportamento de t/V e V no decorrer do processo de filtração.

2.2 TIPOS DE FILTROS

Os tipos de filtros podem ser classificados em dois grandes grupos: filtros de pressão ou simples e filtros a vácuo. É importante ressaltar que alguns filtros podem fazer parte dos dois grupos como o caso dos filtros rotativos, por exemplo, e dependem da aplicação desejada para a escolha do funcionamento (CREMASCO, 2018). A seguir serão abordados brevemente cada um dos tipos e suas principais características operacionais.

2.2.1 Filtros à vácuo

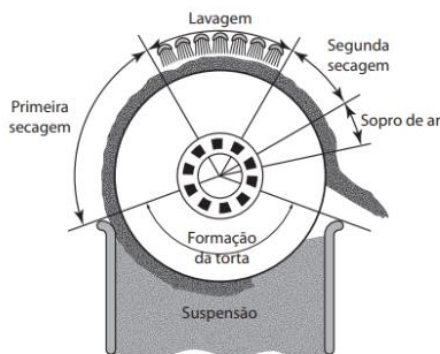
Os filtros do tipo à vácuo operam a pressão negativa e podem possuir alimentação tanto pelo topo quanto pelo fundo do equipamento. Dentre os que possuem alimentação pelo topo temos: filtros tipo horizontal, mesa, bandeja inclinada e o Nutsch. E dentre os que possuem alimentação pelo fundo existem: filtros rotativos tipo tambor e tipo a disco (CREMASCO, 2018). A seguir serão abordados brevemente alguns tipos de filtros com funcionamento a vácuo.

2.2.1.1 Filtro rotativo tipo tambor

O filtro rotativo tipo tambor opera a vácuo, de forma rotativa e contínua, o meio filtrante está ao redor de todo o tambor do equipamento e filtra a mistura de fluido e sólido

a partir do acionamento de válvula automática (MATOS, 2015). Este tipo de equipamento é bastante utilizado em indústria sucroalcooleiras no Brasil e a opção do filtro caracteriza-se pela formação de tortas secas de pequena espessura (CREMASCO, 2018). Esse tipo de filtro, geralmente, opera com alimentação pelo fundo. A Figura 3 apresenta um esquema simples do funcionamento deste tipo de filtro.

Figura 3 – Esquema de funcionamento do filtro rotativo tipo tambor

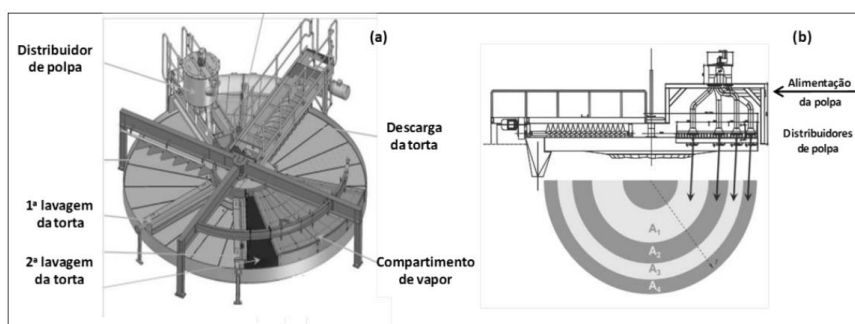


Fonte: Adaptado de Cremasco, 2018.

2.2.1.2 Filtro plano ou tipo mesa

O filtro plano ou tipo mesa possui um disco horizontal que possui vários setores girando em torno de um eixo vertical, a alimentação ocorre em todo o disco para formação de uma torta homogênea em todo o equipamento, além disso as tubulações para geração de vácuo são distribuídas por todo o disco permitindo que a torta seja desaguada à medida que o disco se movimenta (FRANÇA, MASSARANI, 2018). Na Figura 4 é mostrado um exemplo de filtro tipo mesa.

Figura 4 – Filtro plano ou tipo mesa



Fonte: Adaptado de França e Massarani, 2018.

2.2.2 Filtros de pressão

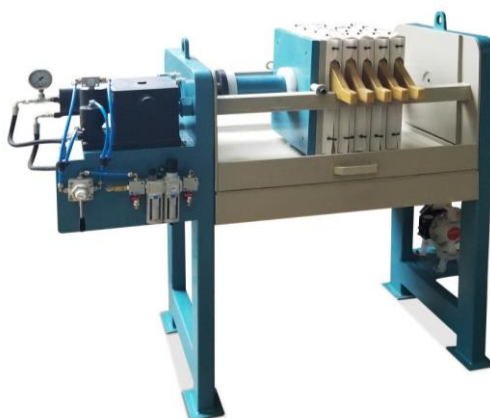
Os filtros de pressão ou simples são aqueles que, em geral, operam em sistemas batelada ou contínuos e incluem lavagem do meio filtrante e forma de descarga da torta ao fim do ciclo de filtração, com exceção dos filtros de pressão do tipo tambor rotativo (CREMASCO, 2018). Dentre os tipos de filtros de pressão podemos citar: filtro prensa, de quadros, de folhas, entre outros.

2.3 FILTRO PRENSA

2.3.1 Construção

O filtro prensa basicamente consiste em placas e/ou quadros alternados de forma sequencial e separados entre si por um meio filtrante, geralmente, a base de algodão ou material sintético (CREMASCO, 2018., MATOS, 2015). A configuração de montagem do filtro pode variar de acordo com o fluido a ser filtrado, podendo assim ser apenas montado com planas ou com placas e quadros. A Figura 5 apresenta um filtro prensa de placas.

Figura 5 – Filtro prensa

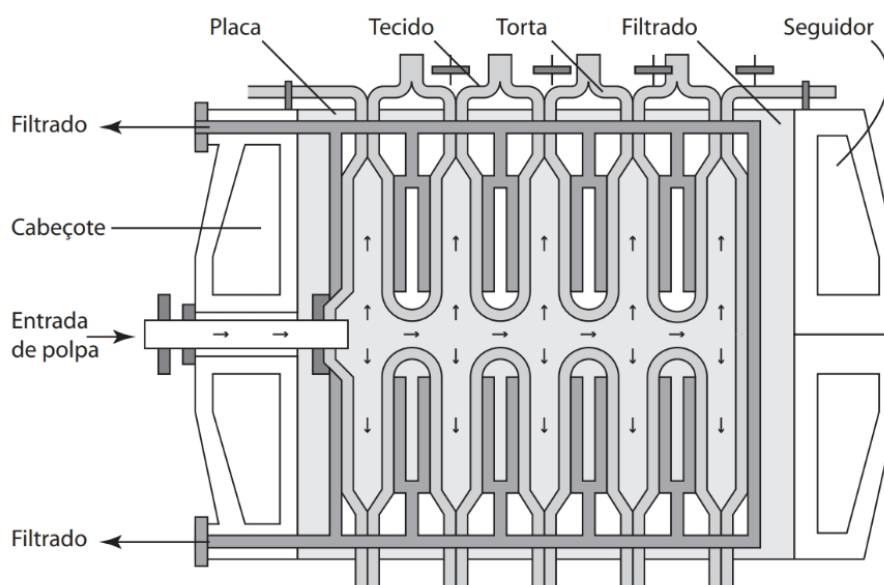


Fonte: Michelin, 2019.

2.3.2 Funcionamento

No filtro o fluido é bombeado através das placas já prensadas, dessa forma escoando através de todo o equipamento (CREMASCO, 2010). Os sólidos presentes no fluido ficam retidos entre as placas e o meio filtrante e apenas o filtrado passa pelo material filtrante e é direcionado para a descarga (DALBERTO *et al.*, 2021). O material sólido que fica retido no interior do filtro se acumula formando uma torta que auxilia ainda mais na filtração do fluido (MATOS, 2015). A Figura 6 apresenta um esquema do funcionamento de um filtro prensa e a Figura 7 apresenta o fluxo do fluido no interior do filtro.

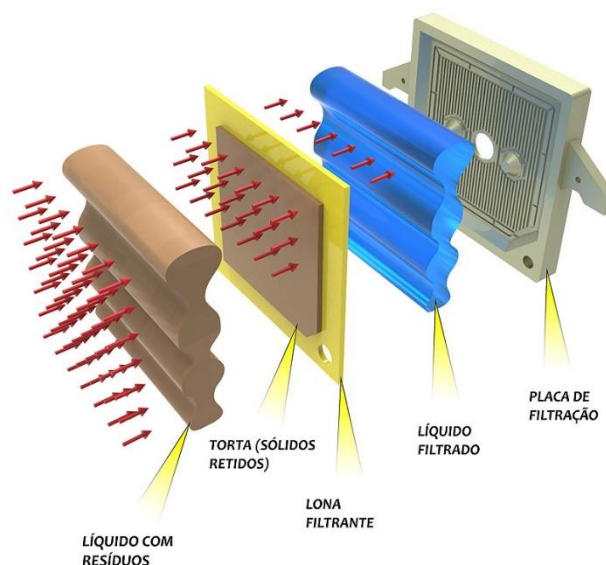
Figura 6 – Esquema de funcionamento de um filtro prensa



Fonte: Adaptado de Cremasco, 2018.

Como podemos observar na Figura 6, o esquema apresenta alimentação do fluido de forma central no filtro, formação de torta entre as placas e remoção do filtrado pela parte inferior e superior do equipamento. A entrada de fluido e saída de filtrado podem variar de acordo com o equipamento e modelo do filtro prensa, entretanto, a formação da torta ocorre obrigatoriamente sempre entre as placas.

Figura 7 – Fluxo de fluido no interior do filtro prensa



Fonte: Grabe Equipamentos Industriais.

No esquema apresentado na Figura 7, o fluido contendo sólido passa pelo meio filtrante onde os sólidos ficam retidos e então o líquido já filtrado passa pela placa que realiza a descarga do filtrado.

2.3.3 Limpeza

Em sistemas que operam em batelada, a limpeza do filtro prensa é realizada apenas quando a formação da torta chega em sua capacidade máxima, neste momento o filtro deve ser desmontado ou aberto para que a torta formada seja removida e o meio filtrante seja lavado ou substituído (MATOS, 2015). Modelos de filtro prensa mais atuais possuem sistemas de montagem e desmontagem automatizados, assim como, a injeção de ar comprimido no interior no filtro para secagem da torta antes da sua remoção (DALBERTO *et al.*, 2021). O meio filtrante também pode ser limpo sem que seja removido do equipamento, de forma manual ou automática, através de lavagem hidráulica ou sistema de retrolavagem (FOUST, 1982).

Em sistemas que operam continuamente, a suspensão, a torta e o filtrado são formados de maneira contínua (FOUST, 1982). Em sistemas contínuos de grande escala existe a possibilidade da operação do filtro de forma parcial, ou seja, em parte do filtro

realiza-se a filtração e em parte do filtro realiza-se a remoção da torta e limpeza do meio filtrante, tornando o processo contínuo.

2.3.4 Cálculos de desempenho e tempo

Com relação ao funcionamento e desempenho de um filtro prensa, alguns cálculos podem ser realizados anteriormente ao seu uso como, por exemplo, tempo teórico de filtração e outros após o seu uso como, por exemplo, o cálculo de desempenho do equipamento. Os cálculos detalhados e suas variáveis são apresentados nas seções a seguir.

2.3.4.1 Tempo de filtração

O tempo de filtração pode ser definido como o tempo necessário para que a torta ocupe todo o volume disponível nas placas ou quadros e, portanto, o cálculo do tempo de filtração, t_f , é uma correlação entre o volume de filtrado (V_f), a concentração de sólidos no fluido (c) e o volume da torta (v_t) (FRANÇA, MASSARANI, 2018).

$$t_f = \frac{\mu_f \cdot (\alpha) \cdot \rho_f \cdot c}{2 \cdot (\Delta P)} \cdot \left(\frac{V_f}{A}\right)^2 \quad (24)$$

$$c = \frac{(\varepsilon_s) \cdot \rho_s \cdot v_t}{\rho_f \cdot V_f} \quad (25)$$

$$v_t = \frac{A}{2} \cdot e \quad (26)$$

Substituindo as equações de concentração de sólidos e volume da torta na equação do tempo de filtração e reorganizando obtém-se:

$$t_f = \frac{1}{8} \cdot \frac{\mu_f \cdot (\alpha) \cdot (\varepsilon_s)^2 \cdot \rho_s^2 \cdot e^2}{\rho_f \cdot c \cdot (\Delta P)} \quad (27)$$

Onde:

t_f : tempo de filtração [s];

μ_f : viscosidade dinâmica do fluido [kg/(m.s)];

α : resistividade média da torta [m/kg];

- ε_s : fração volumétrica de sólidos;
 ρ_s : densidade dos sólidos [kg/m³];
 ρ_f : densidade do fluido [kg/m³];
 e: espessura dos quadros [m];
 c: concentração de sólidos no fluido [kg/m³];
 ΔP : queda de pressão no filtro [Pa].

2.3.4.2 Tempo de lavagem da torta

O tempo de lavagem da torta é uma etapa geralmente utilizada em processos hidrometalúrgicos em que o filtrado é o produto de interesse das operações. Para realização da lavagem considera-se que a etapa seja realizada sob as mesmas condições que o processo de filtração e pode ser calculado conforme a equação abaixo (FRANÇA, MASSARANI, 2018).

$$t_l = 6 \cdot \beta \cdot \frac{\rho_f \cdot c \cdot t_f}{\varepsilon_s \cdot \rho_s} \quad (28)$$

Onde:

- t_l : tempo de lavagem da torta [s];
 β : relação entre o volume de líquido de lavagem e o volume de torta;
 ε_s : fração volumétrica de sólidos;
 ρ_s : densidade dos sólidos [kg/m³];
 ρ_f : densidade do fluido [kg/m³];
 t_f : tempo de filtração [s];
 c: concentração de sólidos no fluido [kg/m³];

2.3.4.3 Desempenho

O desempenho do filtro prensa é definido como o volume de filtrado (V_f) produzido durante o tempo necessário para um ciclo completo (tempo de filtração, tempo de lavagem da torta e tempo de montagem e desmontagem do equipamento) (FRANÇA, MASSARANI, 2018).

$$P = \frac{V_f}{t_f + t_l + t_d} \quad (29)$$

Onde:

P: desempenho do filtro prensa [m^3/s];

V_f : volume de filtrado [m^3];

t_f : tempo de filtração [s];

t_l : tempo de lavagem da torta [s];

t_d : tempo de desmontagem, limpeza e montagem do filtro [s];

2.3.5 Vantagens e Desvantagens

Na Quadro 1 abaixo podemos observar vantagens e desvantagens relacionadas a escolha do filtro prensa como equipamento de filtração.

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens do filtro prensa

Vantagens	Desvantagens
Espaço para instalação do equipamento é menor quando comparado a outros equipamentos de filtração.	Eficiência de filtração diretamente relacionada as características do resíduo.
Torta formada apresenta baixo teor de umidade.	Difícil lavagem do meio filtrante e do interior do equipamento, sendo necessário desmontar/abrir o filtro. Em caso de aplicação em indústrias de alimentos e fármacos se torna uma desvantagem preocupante.
Produção de líquidos limpos por meio da circulação do filtrado.	As placas e os quadros podem sofrer fissuras ou rompimentos.
Possibilidade de automação do funcionamento.	A operação do equipamento necessita energia elétrica e pessoas qualificadas.

Fonte: Adaptado de Cremasco, 2018.

2.4 OUTROS TRABALHOS

Cazumbá e Nascimento (2022), realizaram estudo baseado em conceitos teóricos de filtração para aplicação em equações de balanço de massa e equação geral de filtração, obtendo uma equação para desenvolvimento de um filtro prensa para projeto piloto e

posterior *scale up* para um projeto industrial, entretanto, o estudo desenvolvido foi apenas de forma teórica e, portanto, não obtiveram um protótipo a partir das equações obtidas durante o estudo de caso presente no trabalho.

Gomes e Batista (2019), realizaram um estudo para implementação de um filtro prensa automatizado como equipamento substituto para uma barragem de rejeitos presente na mineração Serra Grande no município de Crixás no estado de Goiás. Realizaram uma análise quantitativa e qualitativa da possível implementação do equipamento com intuito de apresentar a viabilidade. A partir de revisões bibliográficas e estudos teóricos realizaram o desenvolvimento de um protótipo para realização de testes e obtenção de resultados para apresentação da proposta. Na Figura 8 pode-se observar o protótipo desenvolvido por Gomes e Batista para realização de experimentos.

Figura 8 – Protótipo de filtro prensa desenvolvido por Gomes e Batista.



Fonte: Gomes e Batista (2019).

O protótipo desenvolvido por Gomes e Batista (2019), Figura 7, possuía sistema de automatização PLC (Controle lógico programável) visando aumentar o desempenho do equipamento.

Silveira (2021), realizou estudo teórico dos conceitos de filtração e de desempenho operacional nominal e real de filtros prensa através de cálculos e dados informados pelos fabricantes e realizou considerações relacionadas a melhoria do

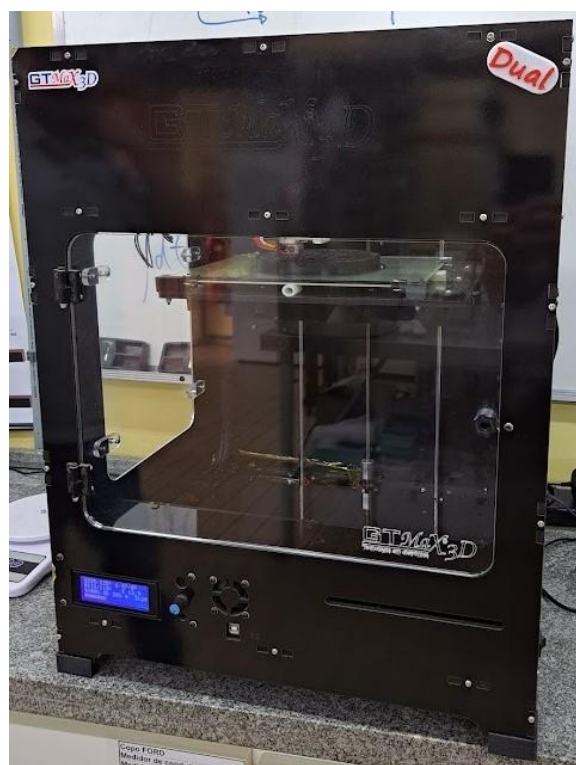
desempenho dos equipamentos. Assim como no trabalho realizado por Gomes e Batista (2019), Silveira (2021) também realizou estudos relacionados a usinas de mineração.

3 MATERIAIS E METÓDOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização da construção do protótipo de filtro prensa foi utilizado o software AutoCAD 2022 para desenvolvimento do design e após foi realizada a impressão das peças do protótipo através de técnica de impressão 3D. A impressora disponível para a impressão foi do modelo GTMax3D Core A1 Dual, conforme pode ser visto na Figura 9.

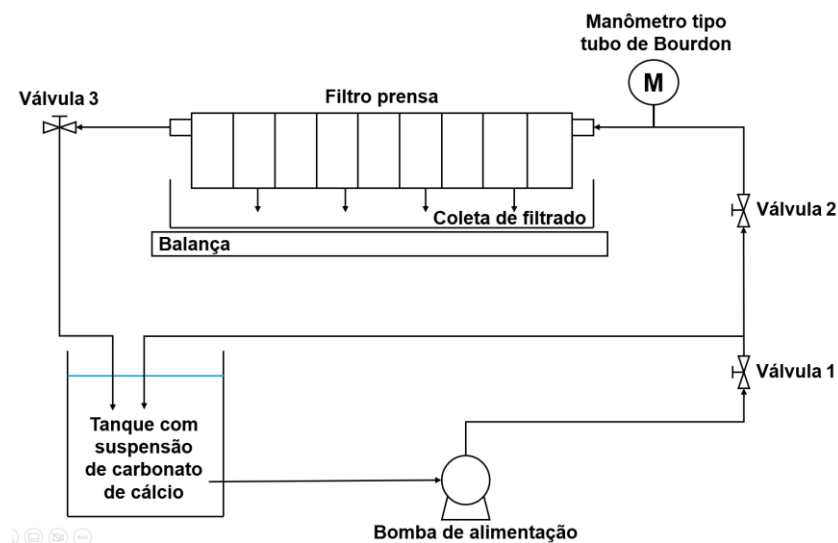
Figura 9 – Impressora 3D modelo GTMax3D Core A1 Dual.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O material utilizado para a impressão foi filamento de acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), do fornecedor 3DLab. Para realizar a conexão entre a entrada do filtro a bomba de alimentação e a saída e o tanque onde estava a solução de alimentação foram utilizados tubos e conexões de policloreto de vinila (PVC). Todos os materiais utilizados para a fabricação do filtro são de fácil acesso e estavam presentes no laboratório de engenharia química do IFRS – Campus Feliz. A Figura 10 apresenta um esquema de como foi realizada a operação do protótipo.

Figura 10 – Esquema de operação do protótipo de filtro prensa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A operação do protótipo contou com três válvulas manuais sendo:

Válvula 1: responsável por definir a vazão de alimentação;

Válvula 2: responsável por iniciar e cessar a alimentação do protótipo;

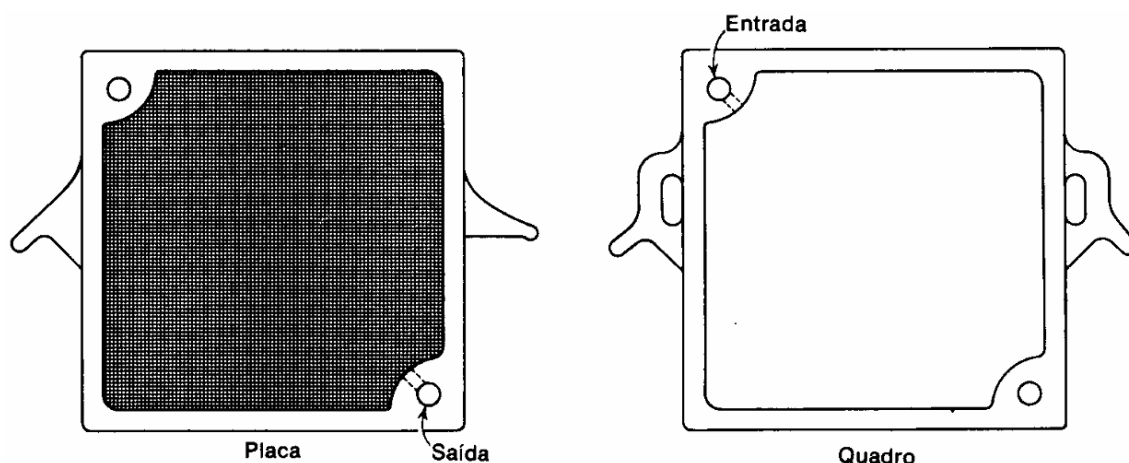
Válvula 3: responsável pelo controle da contra-pressão.

De maneira simplificada, para iniciar a operação do protótipo, a válvula 3 deve estar totalmente aberta e as válvulas 1 e 2 totalmente fechadas. Para iniciar o funcionamento do equipamento, abre-se totalmente a válvula 2 e após gradualmente realiza-se a abertura da válvula 1 até que a pressão de operação desejada seja atingida. Após para realizar a manutenção e controle da pressão de operação são realizados ajustes na posição da válvula 3. Além disso, para o monitoramento da massa de filtrado coletado foi utilizada uma balança, posicionada logo abaixo do tanque de coleta. Com o intuito de coletar os dados dos testes foi realizada a filmagem de todos os experimentos e posteriormente os dados foram planilhados e tratados.

3.2 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento do protótipo foi inicialmente baseado na Figura 11 retirada do livro Princípio das Operações Unitárias, do autor Foust (1982).

Figura 11 – Placa e quadro para filtro prensa

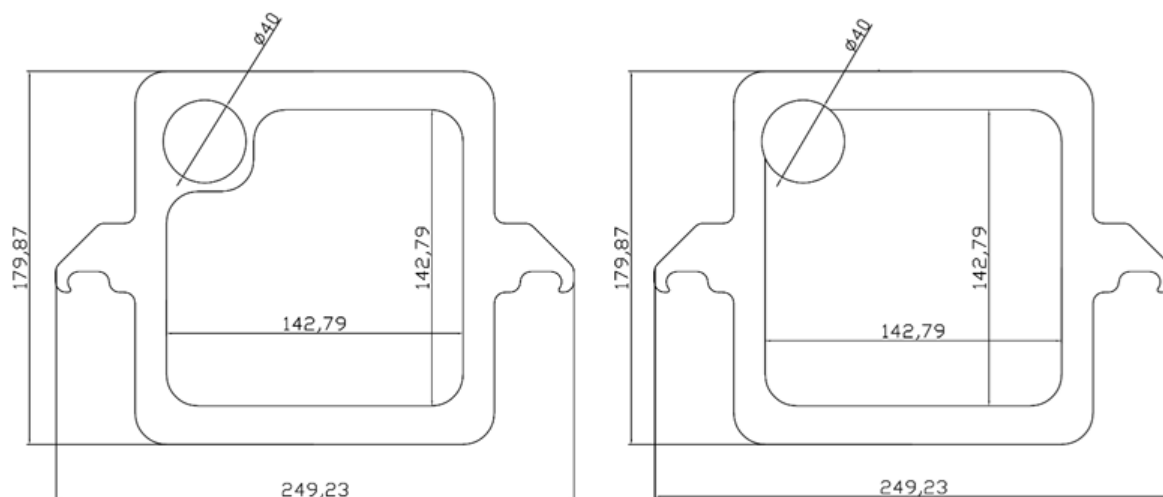


Fonte: Adaptado de Foust, 1982.

Entretanto este modelo possivelmente apresentaria algumas dificuldades principalmente relacionadas a retirada de filtrado do equipamento e diminuição da área de filtração disponível e, portanto, realizou-se modificações no modelo inicial chegando ao modelo apresentado na Figura 12 em 2D e posteriormente convertido para 3D presente nas Figuras 13 e 14.

A Figura 12 apresenta à esquerda o desenho em 2D dos quadros e à direita o desenho das placas em 2D – todas as medidas presentes no desenho estão em milímetros.

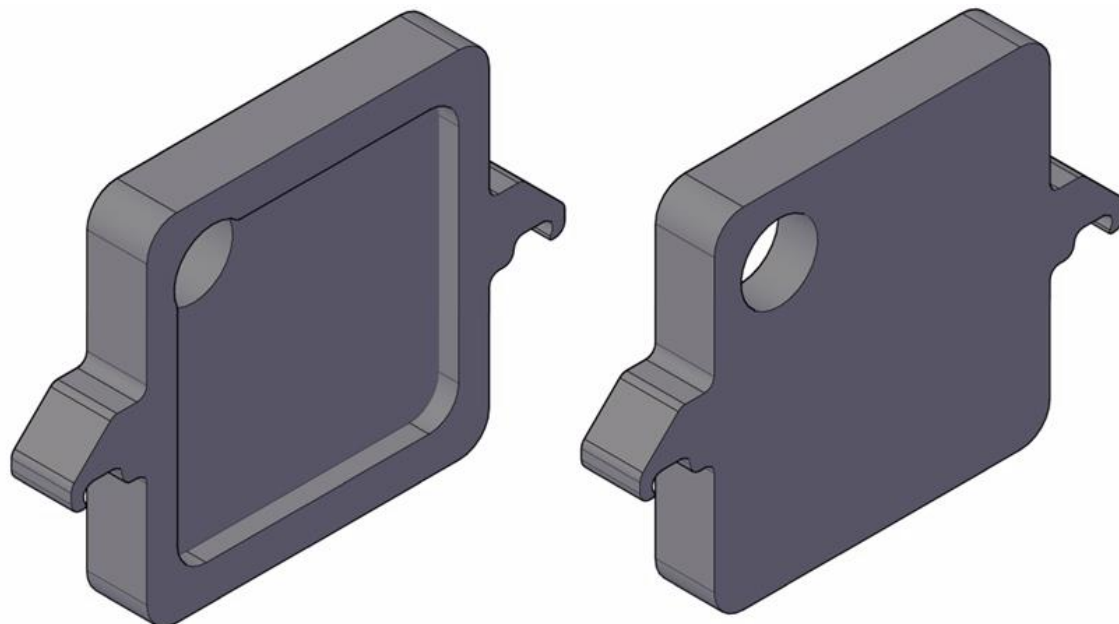
Figura 12 – Desenho das placas e quadros do protótipo em 2D



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 13 apresenta à esquerda o desenho em 3D da placa de entrada do filtro e à direita o desenho em 3D da placa de saída.

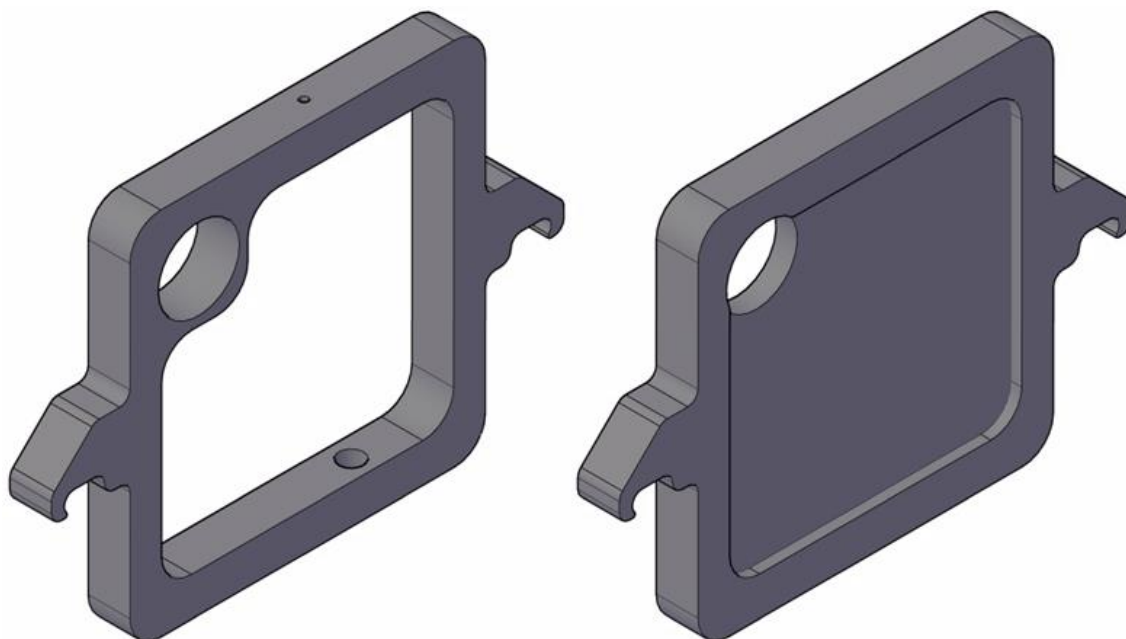
Figura 13 – Desenho das placas de entrada e saída do protótipo em 3D



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 14 apresenta à esquerda o desenho em 3D dos quadros do filtro e à direita o desenho em 3D das placas centrais.

Figura 14 – Desenho das placas centrais e quadros do protótipo em 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O projeto inicial do protótipo tem dimensões de 249,23 mm de largura e 179,87 mm de altura. As placas de entrada e saída tinham espessura de 30 mm devido a necessidade do encaixe das tubulações de alimentação e saída de solução sobressalente, já os quadros e demais placas tinham 20 mm de espessura. A abertura utilizada para a alimentação do filtro e passagem de solução pelos quadros e placas centrais tinham 40 mm de diâmetro. O filtrado seria removido do equipamento pelos quadros que tinham aberturas na parte inferior para que o filtrado escoasse para um tanque de armazenagem.

Para o preparo da suspensão modelo, foram utilizados 1,5 kg de carbonato de cálcio (CaCO_3) PA da marca Quimesp, suspensos em uma massa de 50 kg de água. Com intuito de que a suspensão presente no tanque de alimentação permanecesse sempre em constante processo de agitação foi adicionada uma ramificação na tubulação de saída da bomba para que ocorresse uma realimentação no tanque, isso fez com que as partículas não sedimentassem no fundo do tanque.

3.3 METÓDOS

3.3.1 Avaliação da influência do meio filtrante

Para realizar a avaliação do meio filtrante foram utilizados materiais com diferentes composições e características. O meio filtrante mais adequado foi o que permitiu a passagem da maior quantidade de água possível sem que permitisse a passagem de sólidos durante o processo de filtração. Foi pré-determinado um intervalo de tempo e todos os testes foram realizados com a mesma vazão de alimentação e 0,10 bar de pressão manométrica. A escolha do meio filtrante adequado dependeu de três fatores: a resistência do meio filtrante, pois a operação deveria ocorrer sem que houvesse ruptura, a qualidade da filtragem, ou seja, se material particulado conseguiu transpassar o meio filtrante ou não, e da capacidade de vedação entre as peças do protótipo. A partir dessas informações foi selecionado o material mais adequado para realização dos testes de pressão de operação. Os materiais utilizados para esta avaliação foram papel filtro, filtro de fibra de celulose e sintética e tecido 100% poliéster.

3.3.2 Avaliação da influência da pressão de operação

Para realização da avaliação da influência da pressão foram ajustadas as válvulas de entrada e saída de suspensão em diferentes posições, de tal forma que isso impactasse na pressurização do equipamento, dessa forma foram realizados testes com diferentes valores de pressão de operação para observar o comportamento do protótipo. Os testes foram realizados a 0,02; 0,04; 0,06; 0,10; 0,12 e 0,20 bar de pressão manométrica. Todos os testes foram realizadas até que o reservatório de coleta de filtrado chegasse a sua capacidade máxima, a partir desse momento o teste era encerrado e os dados compilados e tratados. A partir dos dados obtidos nos testes foram plotados gráficos de volume versus tempo/volume.

Os valores das equações de reta obtidos foram utilizados para os cálculos de K_p , B , α e R_m . Para o cálculo de K_p e B foi realizado o cálculo da média dos parâmetros obtidos em cada equação de reta (Equação 23). O cálculo de K_p foi feito com base na média do primeiro termo das equações de reta multiplicado por dois. Para o cálculo do parâmetro B foi realizado o cálculo da média do segundo termo das equações de reta. Para o cálculo de α e R_m , utilizou-se das equações 30 e 31 abaixo.

$$\alpha = \frac{A^2 \Delta P K_p}{\mu c_s} \quad (30)$$

$$R_m = \frac{B \Delta P A}{\mu} \quad (31)$$

Os valores para α e R_m obtidos para cada um dos testes foram compilados e foi realizado o cálculo de média para os três valores. Foi realizado o cálculo de ambos os parâmetros para cada um dos testes e após realizado o cálculo de média para obtenção do valor final do parâmetro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESENHO E ESTRUTURA DO PROTÓTIPO

Após a realização da primeira impressão do protótipo notou-se a necessidade de adequação de alguns pontos em sua estrutura, a Figura 15 mostra as peças impressas conforme o projeto inicial.

Figura 15 - Peças do projeto inicial



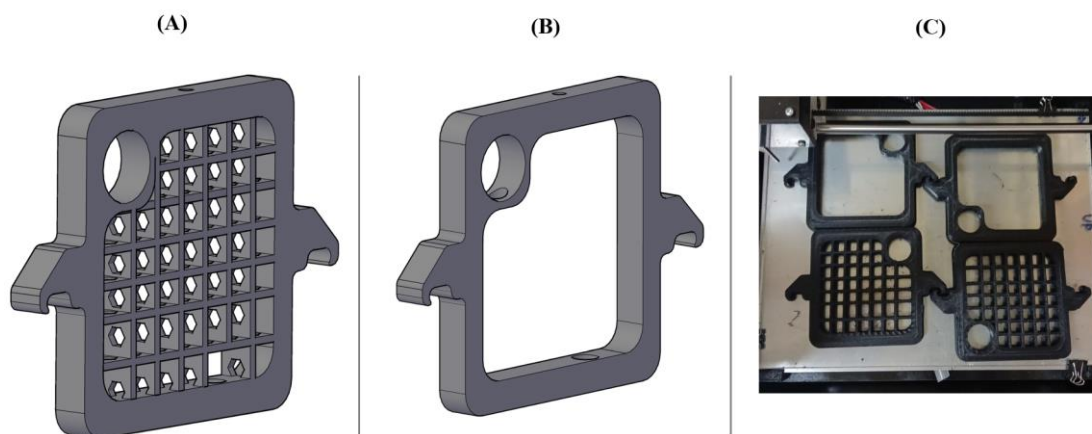
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O projeto inicial do protótipo possuía placas centrais e espaçadores vazados para o posicionamento do meio filtrante, entretanto essa configuração, possivelmente causaria alguns problemas durante o funcionamento do protótipo como, por exemplo, vazamentos indesejados, má formação da torta, deslocamento do meio filtrante durante a operação, entre outros. Dessa forma, foram realizadas alterações no projeto inicial, dentre as mudanças realizadas estão:

- a) Adição de grade de suporte nos quadros, para melhor posicionamento do meio filtrante: visando uma melhor fixação do meio filtrante e melhor formação da torta.
- b) Remoção da parte central das placas centrais: visando um melhor escoamento da solução e melhor funcionamento do protótipo.
- c) Redução da escala de impressão das peças do filtro.

Todas as alterações foram realizadas visando obter uma melhor estrutura e resistência para o protótipo, além disso a redução na escala de impressão foi realizada visando uma maior velocidade na impressão das peças e ainda a redução de material necessário para a produção do protótipo. As peças com as alterações podem ser visualizadas na Figura 16.

Imagens 16 – Peças modificadas: (A) Novo projeto das placas centrais; (B) Novo projeto dos quadros e (C) Novas peças impressas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O projeto final do protótipo possui 124,6 mm de largura, 89,9 mm de altura e espessuras de 10 mm para os quadros e placas centrais e 15 mm para as placas de entrada e saída do filtro.

4.2 INFLUÊNCIA DO MEIO FILTRANTE

O meio filtrante mais adequado foi permeado apenas pela parte líquida da suspensão de carbonato de cálcio que foi utilizada para os experimentos, ou seja, o meio filtrante reteve partículas sólidas em sua superfície realizando a formação da torta e fazendo com que apenas a parte líquida escoasse para fora.

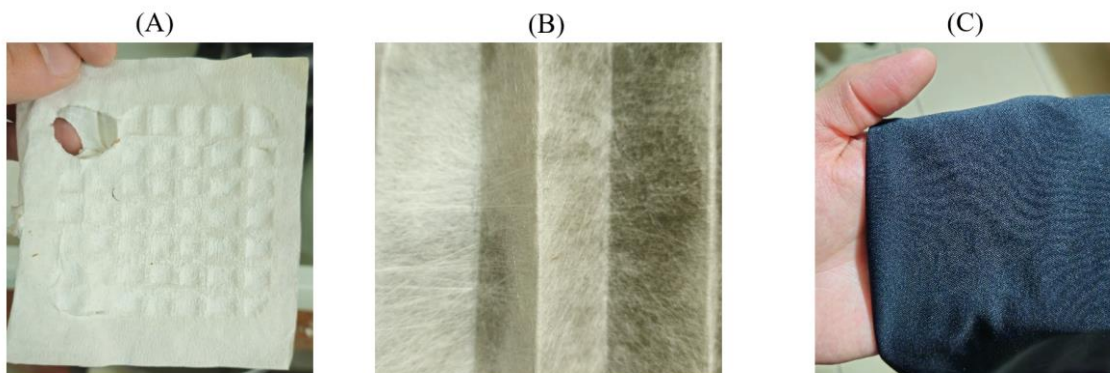
Além disso o meio filtrante mais adequado as condições em que os testes foram realizados precisou suportar a pressão manométrica de 0,10 bar sem que se rompesse durante a operação do equipamento.

Os testes para meio filtrante foram realizados utilizando três materiais distintos, sendo eles:

- a) Papel filtro, Figura 17 (A), utilizado comumente em laboratórios.

- b) Filtro de fibra de celulose e sintética, Figura 17 (B), material comumente encontrado em filtros de ar-condicionado para veículos.
- c) Tecido 100% poliéster, Figura 17 (C), encontrado em camisetas de prática esportiva.

Figura 17 – Meios filtrantes testados: (A) Papel filtro; (B) Filtros de fibra de celulose e sintética e (C) Tecido 100% poliéster



Fonte. Elaborado pelo autor, 2024.

Durante os testes foram levados em consideração os seguintes pontos para escolha do meio filtrante: capacidade de filtração do meio filtrante, resistência e capacidade de “vedação” do filtro. O papel filtro apresentou boa capacidade de filtração e boa capacidade de vedação para o protótipo, entretanto, quando submetido a maior fluxo de alimentação da suspensão rompeu-se, conforme mostrado na Figura 18, apresentando baixa resistência e, dessa forma, foi descartada a sua utilização como meio filtrante para o protótipo.

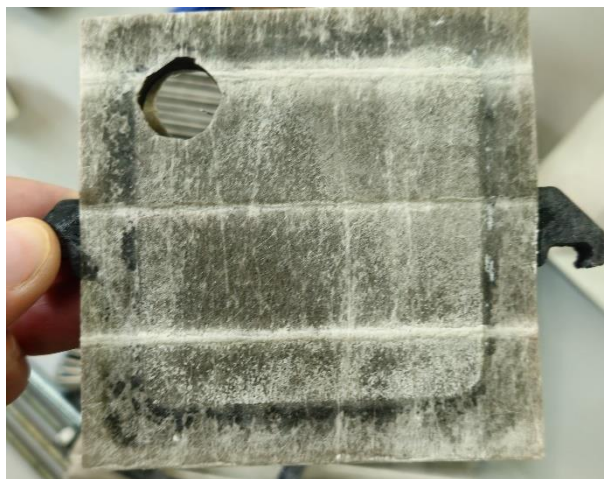
Figura 18 – Filtro de papel rompido após teste



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O filtro de fibra de celulose e sintética apresentou boa capacidade de filtração e boa resistência, entretanto devido a sua espessura e rigidez não apresentou boa capacidade de vedação para o protótipo e, portanto, também foi descartado o seu uso como meio filtrante para o protótipo. Na Figura 19 pode ser observado o filtro já posicionado na placa.

Figura 19 – Filtro de fibra de celulose posicionado na placa



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Dentre os três materiais avaliados, o tecido 100% poliéster foi o que apresentou melhor combinação entre boa capacidade de filtração, vedação e resistência, além disso propiciou uma boa formação de torta durante o funcionamento do protótipo. A Figura 20 apresenta a torta formada durante a avaliação do material, portanto, foi decidido utilizá-lo como meio filtrante para os testes de variação de pressão de operação do protótipo.

Figura 20 – Tecido 100% poliéster com a torta formada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

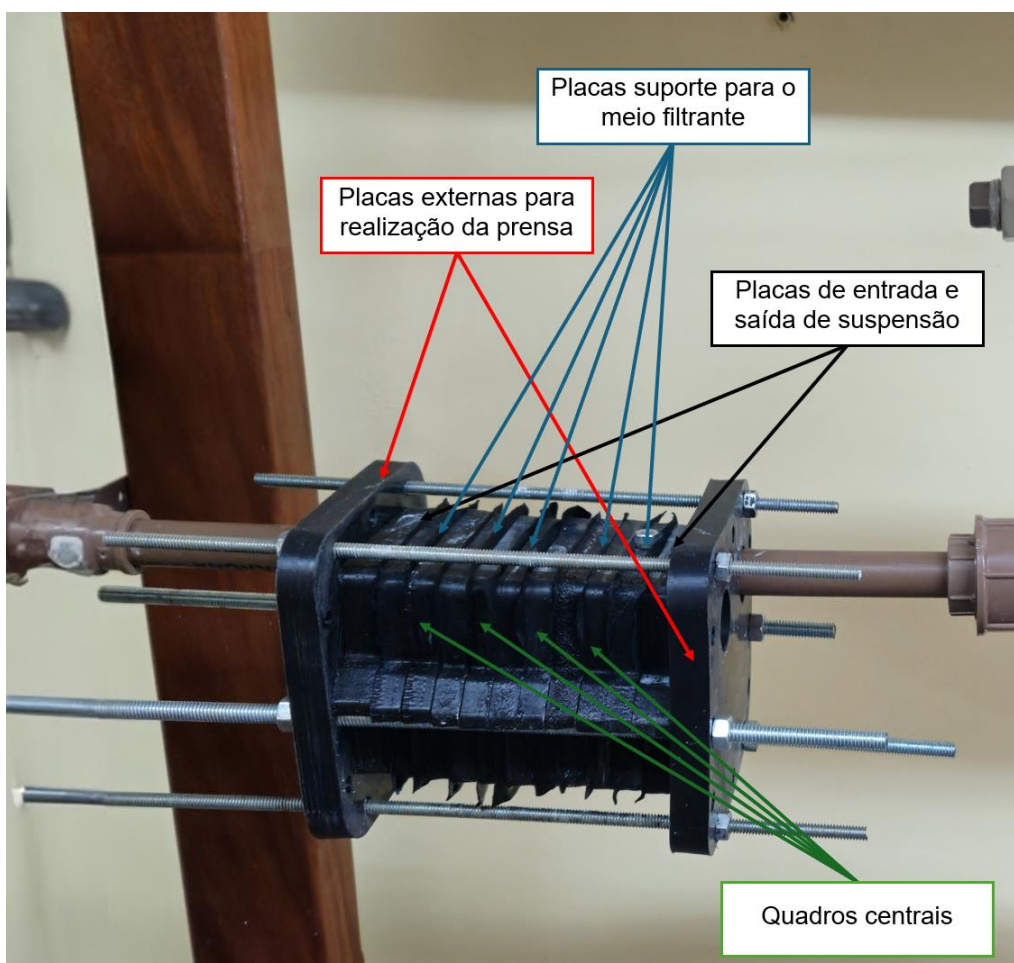
4.3 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO

Todos os testes relacionados a influência da pressão de operação no funcionamento do protótipo e no comportamento do meio filtrante foram realizados utilizando a seguinte configuração de montagem do protótipo:

- a) Duas placas externas para realização da prensa;
- b) Uma placa de entrada e uma placa de saída;
- c) Cinco placas suporte para o meio filtrante;
- d) Quatro quadros centrais;

Para a realização dos testes foi preparada uma solução com 1,5 kg de carbonato de cálcio e 50 Kg de água. A configuração de montagem do protótipo para os testes pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Configuração de montagem para os testes de pressão de operação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3.1 Testes a 0,02 bar de pressão de operação

Nos testes realizados a 0,02 bar de pressão de operação notou-se que realizando a operação a uma pressão demasiadamente baixa a formação da torta é prejudicada (Figura 22). Além disso, torna-se difícil manter a pressão de operação constante fazendo com que em determinados momentos a vazão de alimentação seja cessada até que a pressão de operação seja retomada.

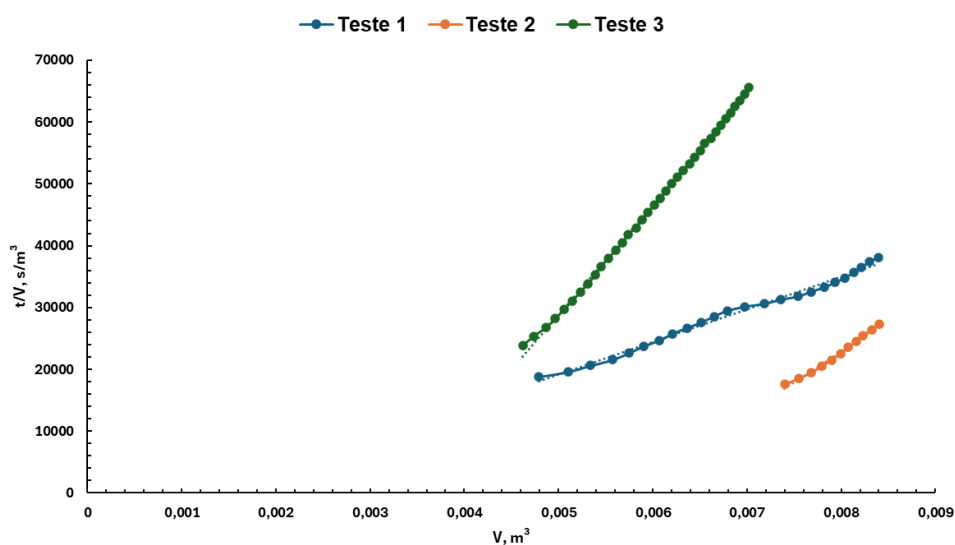
Figura 22 – Torta formada nos testes a 0,02 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Foi também possível observar que, devido à má formação da torta durante a operação, em determinados momentos o filtrado que saía pelo filtro era turvo indicando, portanto, uma filtração inadequada. Devido aos desvios observados durante os testes realizados a esta pressão, houve grande variabilidade nos resultados. Os dados coletados em cada um dos testes foram compilados e gráficos de volume (m^3) versus tempo/volume (s/m^3) foram plotados para obtenção dos parâmetros da equação de tempo de filtração, α e R_m . Os gráficos e equações obtidos em cada um dos testes realizados a 0,02 bar estão apresentados nas Figura 23.

Figura 23 – Gráficos dos resultados experimentos realizados a 0,02 bar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores obtidos para K_p e B a 0,02 bar estão descritos no Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de K_p e B para 0,02 bar

Parâmetro	K_p , s/m ⁶	$ B $, s/m ³
Teste 1	5,00E+06	7.264,4
Teste 2	1,00E+07	57.512
Teste 3	2,00E+07	60.156
Média	1,17E+07	41.644,1
RSD	65,5%	71,6%
Valor final	2,33E+07	41.644,1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores de α e R_m obtidos para cada um dos testes estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de α e R_m para 0,02 bar

Parâmetro	α , m/kg	$ R_m $, m ⁻¹
Teste 1	3,64E+09	6,73E+08
Teste 2	7,29E+09	5,33E+09
Teste 3	1,46E+10	5,58E+09
Média	8,50E+09	3,89E+09

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3.2 Testes a 0,04 bar de pressão de operação

Nos testes realizados a 0,04 bar de pressão de operação notou-se ainda uma formação de torta prejudicada pela pressão de operação baixa, Figura 24 – foi observada a quebra da torta durante a desmontagem do protótipo. A 0,04 bar de pressão já se tornou mais fácil o controle da pressão de operação para que se mantivesse constante o maior tempo possível e, deste modo, não houve interrupções na vazão de alimentação durante os testes.

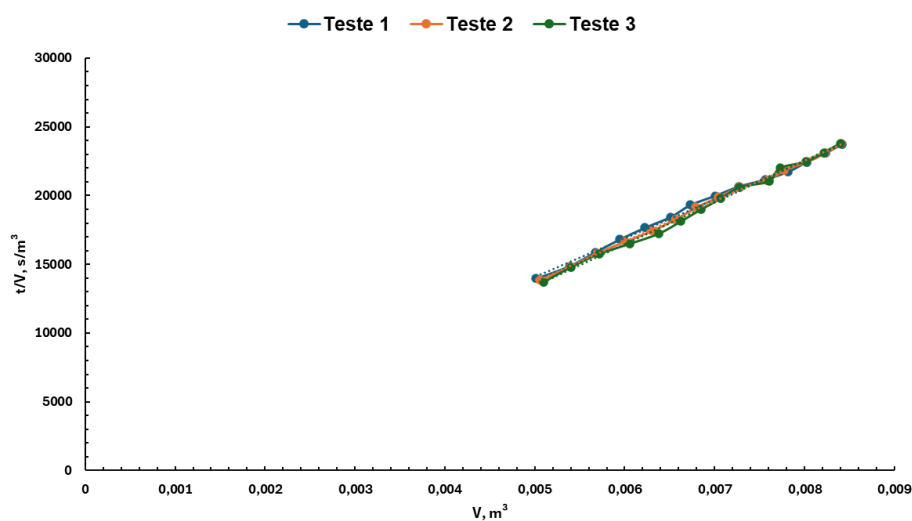
Figura 24 – Torta formada nos testes a 0,04 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os testes realizados a esta pressão de operação já apresentaram uma menor variabilidade. Os dados coletados em cada um dos testes foram compilados e gráficos de volume (m^3) versus tempo/volume (s/m^3) foram plotados para obtenção dos parâmetros da equação de tempo de filtração, α e R_m . Os gráficos e equações obtidos estão apresentados nas Figura 25.

Figura 25 – Gráficos dos resultados dos experimentos realizados a 0,04 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores obtidos para K_p e B estão descritos na Tabela 3:

Tabela 3 – Valores de K_p e B para 0,04 bar

Parâmetro	K_p , s/m ⁶	$ B $, s/m ³
Teste 1	2,82E+06	15,301
Teste 2	2,93E+06	907,05
Teste 3	3,04E+06	1.778,1
Média	2,93E+06	900,15
RSD	3,70%	97,9%
Valor final	5,86E+06	900,15

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores de α e R_m obtidos para cada um dos testes estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de α e R_m para 0,04 bar

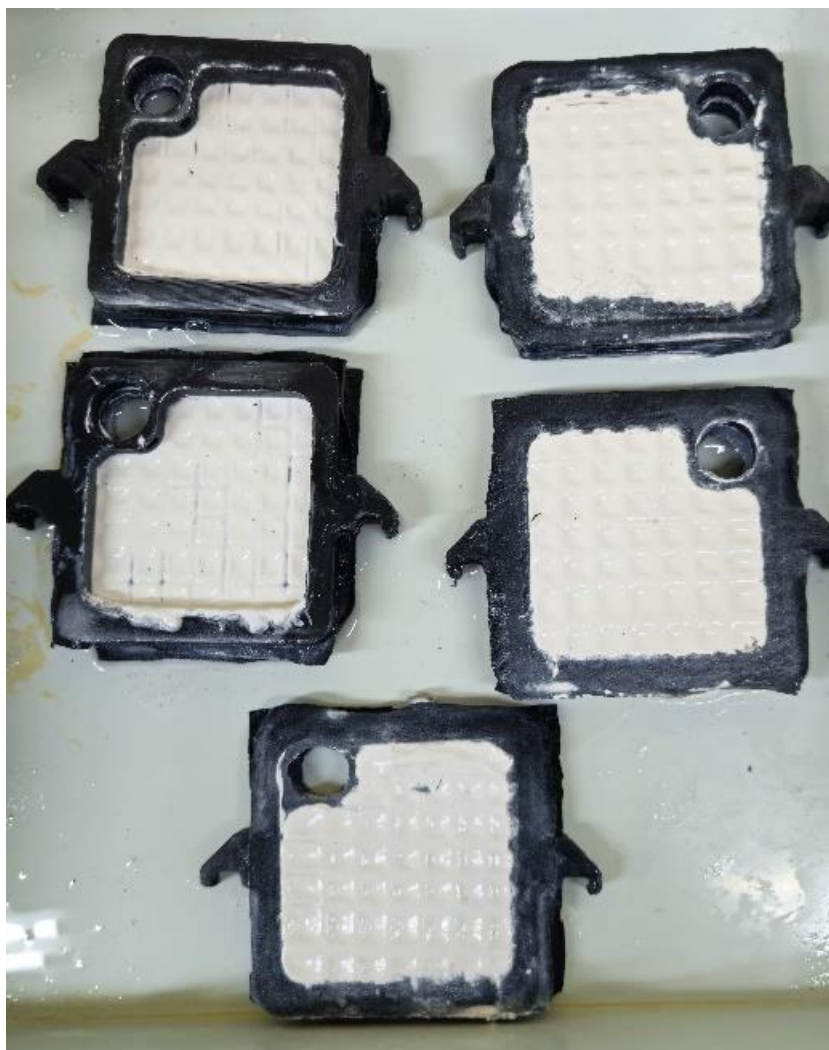
Parâmetro	α , m/kg	$ R_m $, m ⁻¹
Teste 1	4,11E+09	2,84E+06
Teste 2	4,27E+09	1,68E+08
Teste 3	4,43E+09	3,30E+08
Média	4,27E+09	1,67E+08

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3.3 Testes a 0,06 bar de pressão de operação

Nos testes realizados a 0,06 bar de pressão de operação notou-se uma melhora na formação da torta, Figura 26. A pressão de operação manteve-se constante durante praticamente todos os experimentos realizados e não houve interrupções na vazão de alimentação.

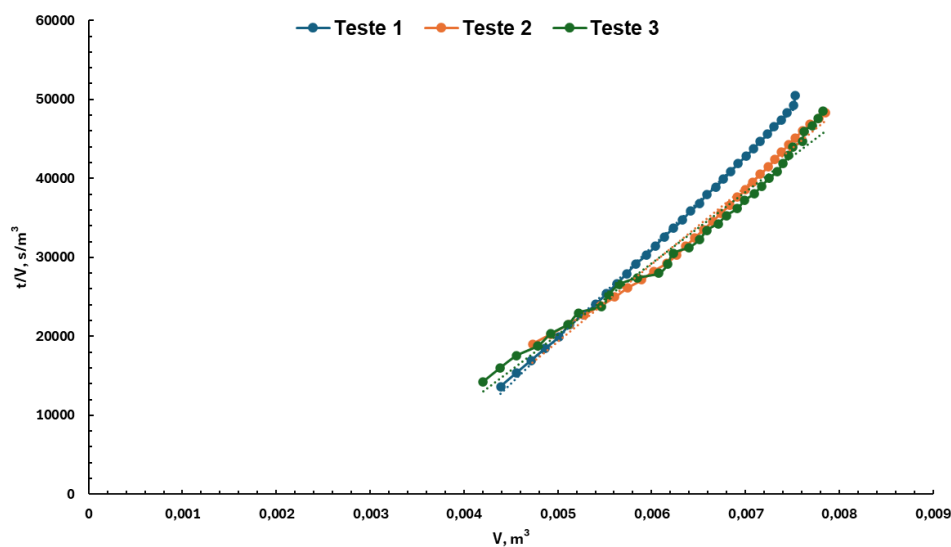
Figura 26 – Torta formada nos testes a 0,06 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os testes realizados a esta pressão de operação apresentaram valores bastante próximos. Os dados coletados em cada um dos testes foram compilados e gráficos de volume (m^3) versus tempo/volume (s/m^3) foram plotados para obtenção dos parâmetros da equação de tempo de filtração, α e R_m . Os gráficos e equações obtidos estão apresentados nas Figura 27.

Figura 27 – Gráfico dos resultados do Teste 1 a 0,06 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores obtidos para K_p e B :

Tabela 5 – Valores de K_p e B para 0,06 bar

Parâmetro	K_p , s/m ⁶	$ B $, s/m ³
Teste 1	1,00E+07	37.910
Teste 2	1,00E+07	29.525
Teste 3	9,00E+06	25.061
Média	9,67E+06	30.832
RSD	6,00%	21,2%
Valor final	1,93E+07	30.832

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores de α e R_m obtidos para cada um dos testes estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de α e R_m para 0,06 bar

Parâmetro	α , m/kg	$ R_m $, m ⁻¹
Teste 1	2,19E+10	1,05E+10
Teste 2	2,19E+10	8,21E+09
Teste 3	1,97E+10	6,97E+09
Média	2,11E+10	8,57E+09

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3.4 Testes a 0,10 bar de pressão de operação

Nos testes realizados a 0,10 bar de pressão de operação foi onde se obteve a melhor formação de torta, Figura 28. A pressão de operação manteve-se constante durante todos os testes realizados, não havendo interrupções na vazão de alimentação. Nessa condição de operação o filtro se comportou praticamente de maneira igual nos três testes realizados, havendo uma baixíssima diferença entre os valores obtidos.

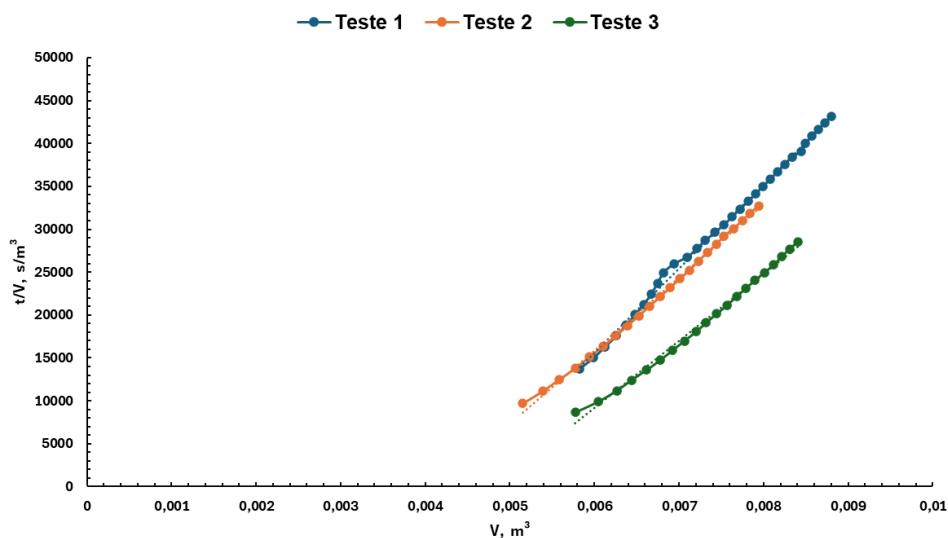
Figura 28 – Torta formada nos testes a 0,10 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os testes realizados a esta pressão de operação apresentaram valores bastante próximos e os dados coletados em cada um dos testes foram compilados e gráficos de volume (m^3) versus tempo/volume (s/m^3) foram plotados para obtenção dos parâmetros da equação de tempo de filtração, α e R_m . Os gráficos e equações obtidos estão apresentados nas Figura 29.

Figura 29 – Gráfico dos resultados do Teste 1 a 0,10 bar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os valores calculados para K_p e B estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de K_p e B para 0,10 bar

Parâmetro	K_p , $1/m^3$	$ B $, s/m^3
Teste 1	1,00E+07	43.170
Teste 2	8,00E+06	35.126
Teste 3	8,00E+06	37.716
Média	8,67E+06	38.670,7
RSD	13,3%	10,6%
Valor final	1,73E+07	38.670,7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na Tabela 6 estão presentes os valores de α e R_m obtidos para cada um dos testes.

Tabela 8 – Valores de α e R_m para 0,10 bar

Parâmetro	α , m/kg	$ R_m $, m^{-1}
Teste 1	3,64E+10	2,00E+10
Teste 2	2,92E+10	1,63E+10
Teste 3	2,92E+10	1,75E+10
Média	3,16E+10	1,79E+10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.3.4 Testes a 0,12 e 0,20 bar de pressão de operação

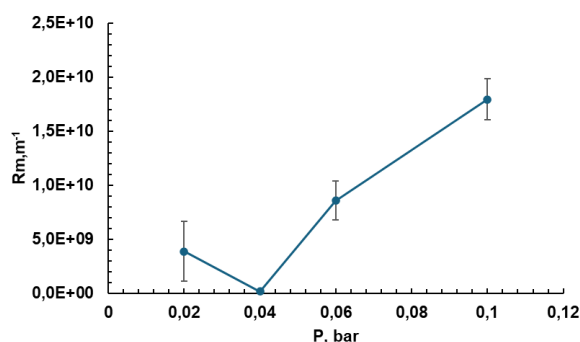
Inicialmente foi tentado realizar teste a 0,20 bar de pressão, entretanto, devido a vazão de filtrado no início dos testes e do tamanho do reservatório para coleta do filtrado, não foi possível realizar coleta de dados para essa condição operacional. Ao ser observado esse comportamento, houve tentativas de realização dos testes a 0,12 bar de pressão de operação, mas foi observado o mesmo problema.

Possivelmente esse fato é decorrente das características do meio filtrante adotado para a realização dos testes, se tratando de um material bastante poroso, dessa forma, em todos os testes realizados havia um tempo necessário para a formação da torta até que o filtrado obtivesse características adequadas. Devido à grande vazão observada nas tentativas de operação a 0,12 bar e a 0,20 bar de pressão o reservatório de coleta chegava ao seu volume total em um tempo demasiadamente curto, dessa forma, não tornando possível a coleta de dados experimentais para essas condições.

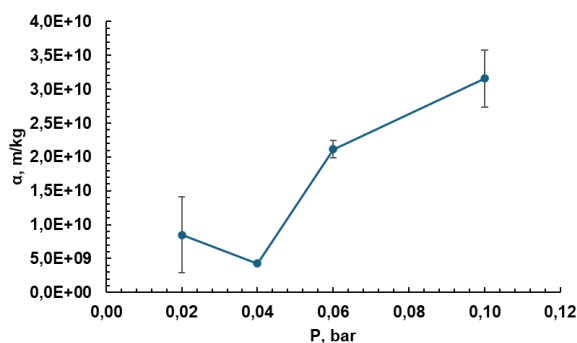
4.3.5 Comparativo

Com o intuito de realizar a comparação entre os parâmetros e equações obtidas para as pressões de operação de 0,02; 0,04; 0,06 e 0,10 bar, foram compilados os dados obtidos para R_m e α e gerados gráficos para visualização do comportamento da torta formada durante os testes e do meio filtrante empregado. Os gráficos gerados podem ser observados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Pressão de operação vs R_m



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 31 – Pressão de operação vs α 

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Como é possível observar nos gráficos, e já citado anteriormente na seção 4.3.1, os testes realizados a 0,02 bar de pressão apresentaram valores que não seguem o mesmo padrão de comportamento observado nos demais testes, isso possivelmente se deve pela pressão de operação demasiadamente baixa, causando má formação da torta, fazendo com que não houvesse um processo de filtração adequado.

Nos demais testes realizados (0,04; 0,06 e 0,1 bar) é possível observar uma certa linearidade entre os valores obtidos, indicando um comportamento coerente para os valores de R_m e α . Conforme ocorre o aumento da pressão há uma maior compactação da torta, como pode ser observado nos valores de α que aumentam conforme a pressão de operação aumenta. Além disso, é possível também observar que conforme ocorre o aumento da pressão de operação o meio filtrante torna-se cada vez menos restritivo, como observado nos valores de R_m que diminuem conforme a pressão de operação aumenta. Isso ocorre, possivelmente, pelas características do meio filtrante, como se trata de um material bastante maleável, conforme ocorre o aumento da vazão e da pressão, o material deve se deformar, aumentando seus poros, e tornando-se menos restritivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento de um protótipo de filtro-prensa em escala de bancada, foram realizadas modificações estruturais para melhorar o desempenho e prevenir vazamentos ou deslocamentos do meio filtrante. A estrutura original precisou de ajustes visando uma maior segurança e estabilidade durante a operação.

O meio filtrante escolhido inicialmente apresentou boa capacidade de vedação e resistência, porém apresentou limitações em pressões mais elevadas, como 0,12 e 0,20 bar, não apresentando capacidade de reter partículas sólidas de maneira eficiente. Nos testes à pressões de operação muito baixas, como 0,02 e 0,04 bar, também não foi observada uma boa formação de torta, tornando o processo de filtração pouco eficiente.

Em pressões próximas a 0,10 bar, o protótipo desenvolvido apresentou seu melhor desempenho, com boa formação de torta e manutenção da pressão de operação durante os experimentos, indicando ser a condição ideal para o meio filtrante utilizado. Para pressões acima de 0,10 bar, o sistema utilizado apresentou dificuldades, indicando a necessidade de melhorias tanto no meio filtrante quanto na capacidade dos reservatórios de alimentação e coleta disponíveis. Apesar das limitações observadas no projeto, este trabalho alcançou os objetivos propostos inicialmente, proporcionando uma base para futuros trabalhos de melhorias.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Como explanado durante a discussão dos resultados, o meio filtrante adotado para a realização dos experimentos desse trabalho não apresentou bom comportamento quando submetido a pressões de operação mais elevadas, dessa forma, é necessária a realização de novos experimentos com diferentes materiais visando obter um meio filtrante com características que suportem pressões de operação mais elevadas.

Além disso, há também a possibilidade de adequações no projeto do filtro para a realização de retrolavagem, dessa forma, tornando o protótipo mais eficiente e parecido com equipamento a nível industrial.

Também pode-se desenvolver um sistema para abertura e fechamento do protótipo de maneira mais ágil, pois atualmente trata-se de um sistema totalmente manual para realização da prensa.

Existe também a necessidade de implementação de reservatórios maiores tanto para a alimentação do protótipo, quanto para a coleta do filtrado, dessa forma, será possível realizar experimentos de maior duração sendo possível coletar uma maior quantidade de dados e mapear a condição de operação mais adequada para o protótipo desenvolvido.

REFERÊNCIAS

- CAZUMBÁ, N.; NASCIMENTO, I. E. **Filtração e o dimensionamento de um filtro prensa**. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Salvador (UNIFACS), 2022.
- CREMASCO, Marco Aurélio. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 3. São Paulo: Blucher, 2018. 1 recurso online. ISBN 9788521208563.
- DALBERTO, Bianca Thaís *et al.* **Operações unitárias de separação e transporte**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. 1 recurso online. ISBN 9786556902333.
- Filtro Prensa - Grabe Equipamentos Industriais**. Disponível em: <<https://www.grabe.com.br/filtro-prensa.php>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- Filtro prensa**. Disponível em: <<https://www.michelon.ind.br/produtos/br/1/filtro-prensa>>. Acesso em: 17 mar. 2024.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.14, p.597-647.
- FOUST, Alan *et al.* **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, c1982. 670 p. ISBN 9788521610380.
- GEANKOPLIS, C. J.; HERSEL, A. A.; LEPEK, D. H. **Transport processes and separation process principles**. 5. ed. Boston: Prentice Hall, 2018.
- GOMES, Larissa Barbosa; BATISTA, Flávio Lopes. **FILTRO PRENSA AUTOMATIZADO VIA PLC: PROTOTIPO CRIADO E APLICADO NA MINERAÇÃO SERRA GRANDE-ANGLOGOLD ASHANTI NO MUNICÍPIO DE CRIXÁS-GO**. Anais do 1º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsona. 2019; 1249-1269
- Impressora 3D Pro – GTMax 3D CoreA1v2 + 1 kg de filamento ABS**. Disponível em: <<https://www.gtmax3d.com.br/impressora-3d-pro/gtmax3d-core-a1v2>>. Acesso em: 13 maio. 2024.
- HOWE, Kerry J *et al.* **Princípios de tratamento de água**. São Paulo: Cengage Learning, 2016. 1 recurso online. ISBN 9788522124084.
- MATOS, Simone Pires de. **Operações unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos**. São Paulo: Erica, 2015. 1 recurso online. ISBN 9788536520018.
- SILVEIRA, Bruno Augusto Vilaça. **Análise do desempenho dos filtros prensa de uma empresa de minério de ferro do quadrilátero ferrífero**. 2021. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.