

Recuperação do efluente líquido H_2SiF_6 da acidulação do SSP: Análise o comportamento dinâmico do filtro prensa através da simulação computacional

Recovery of liquid effluent H_2SiF_6 from SSP acidulation: Analysis of the dynamic behavior of the pressure filter by computational

Recuperación de efluente líquido H_2SiF_6 de la acidulación del SSP: Análisis del comportamiento dinámico del filtro prensa mediante simulación computacional

Recebido: 25/05/2021 | Revisado: 31/05/2021 | Aceito: 07/06/2021 | Publicado: 22/06/2021

Camila Marques Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4969-6769>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: camilacostabh@hotmail.com

Gustavo Silva Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0727-0287>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: guiusilva2@hotmail.com

Pedro Camilo Ramos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-218X>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: pedrocamiloramos@gmail.com

Anamaria de Oliveira Cardoso

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4518-075X>
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
E-mail: anamaria.cardoso@ict.ufvjm.edu.br

Resumo

A produção de fertilizantes fosfatados tem como uma das principais etapas do processo produtivo a acidulação da rocha fosfática que, através do ácido sulfúrico, para obtenção do ácido fosfórico, um dos principais produtos intermediários da indústria de fertilizantes. Essa etapa do processo já é bastante utilizada para a produção de diversos tipos de fertilizantes, entre eles o Super Fosfato Simples (SSP), gerando o efluente líquido ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6) como subproduto oriundo de reações secundárias do processo. Neste trabalho, desenvolve-se a modelagem e simulação das etapas de filtração e consolidação no filtro prensa, equipamento utilizado para a recuperação do efluente líquido da produção de SSP, a fim de que este possa ser utilizado no próprio processo produtivo, auxiliando na eficiência da etapa de acidulação da rocha fosfática, auxiliando na redução dos custos de produção e promovendo assim um processo produtivo mais sustentável de fertilizantes fosfatados. Este estudo prevê uma recuperação de 92,07% do ácido alimentado e retenção de 73,38% dos sólidos.

Palavras-chave: Ácido fluorsilícico; Filtro prensa; Acidulação; SSP; Simulação.

Abstract

Acidification of phosphate rock as one of the mainstages of the production process of phosphate fertilizers. Sulfuric acid is used to obtain phosphoric acid, one of the intermediate products of the fertilizer industry. This stage of process is already widely used for production of several types of fertilizers, among them Simple Super Phosphate (SSP), generating the liquid effluent hexafluorsilicic acid (H_2SiF_6) as a by-product from secondary reactions in the process. In this works, we simulate a mathematical model to represent dynamic behavior of filtration and consolidation in pressure filter, equipment used to recover H_2SiF_6 in production of SSP, in order that it can be used in process itself, helping in the efficiency of acidulation stage of phosphate rock, reducing production costs and promoting a more sustainable process. This study predicts a recovery of 92,07% of H_2SiF_6 fed and retention of 73,38% of solids.

Keywords: Hexafluorsilicic acid; Pressure filter; Acidulation; SSP; Simulation.

Resumen

La producción de fertilizantes fosfatados tiene como una de las principales etapas del proceso productivo la acidificación de la roca fosfatada que, a través del ácido sulfúrico, para la obtención de ácido fosfórico, uno de los principales productos intermedios de la industria de fertilizantes. Esta etapa del proceso ya es ampliamente utilizada para la producción de varios tipos de fertilizantes, incluido el Super Fosfato Simple (SSP), que genera el efluente líquido ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6) como subproducto de reacciones secundarias en el proceso. En este trabajo se desarrolla el modelado y simulación de las etapas de filtración y consolidación en el filtro prensa, equipo utilizado

para la recuperación del efluente líquido de la producción de SSP, para que pueda ser utilizado en el propio proceso productivo, ayudando en la eficiencia de la fase de acidificación de la roca fosfatada, ayudando a reducir los costos de producción y promoviendo así un proceso de producción más sostenible de fertilizantes fosfatados. Este estudio predice una recuperación del 92,07% del ácido alimentado y una retención del 73,38% de sólidos.

Palabras claves: Ácido hexafluorsilícico; Filtro prensa; Acidificación; SSP; Simulación.

1. Introdução

Os fertilizantes são materiais de origem natural ou sintética cuja principal função é manter o solo com alto potencial produtivo após a retirada de elementos importantes a cada colheita através da reposição de elementos químicos no solo, indispensáveis para o crescimento das plantas (Dias & Fernandes, 2006).

São considerados alguns dos mais relevantes produtos da indústria química nacional, sendo grandes contribuintes para o Produto Interno Bruto (PIB), seja direta ou indiretamente, através da elevação da produtividade da agricultura, que apresentou um crescimento de 24,2 % em 2020 quando comparado ao do ano anterior. O faturamento da indústria de fertilizantes e corretivos de solo cresceu 10,65% em 2020 (CNA & CEPEA, 2021). Porém, sabe-se que a produção interna não tem conseguido suprir a demanda nacional, resultando em um aumento nas importações, principalmente de insumos e produtos intermediários para a indústria de fertilizantes (Costa & Silva, 2012). Diante desse cenário, é importante o desenvolvimento de estratégias que tornem os processos deste setor mais sustentáveis, econômicos e produtivos.

O nitrogênio, fósforo e potássio são os elementos químicos principais que compõem as moléculas essenciais dos vegetais, estando presentes em grande parte dos fertilizantes, sendo disponibilizado ao solo em grande quantidade, sendo classificados como macronutrientes primários (Cunha, 2017). O fósforo é caracterizado por sua baixa disponibilidade no solo no Brasil, além da tendência em reagir com outros elementos como ferro e alumínio, o que faz com que a demanda por fertilizantes que contenham este nutriente seja alta apesar de ser um dos nutrientes cuja exigência pelas plantas seja uma das menores em relação aos demais macronutrientes (Almeida, 2019).

Os fertilizantes fosfatados, mais utilizados, são obtidos através da acidulação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, etapa na qual é produzido o ácido fosfórico para a formação dos fertilizantes fosfatados intermediários (Elisario, 2013). A produção do superfosfato simples (SSP) tem como base a reação entre o fosfato de cálcio, oriundo da apatita, e o ácido sulfúrico, tendo como subprodutos principais $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e o ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6), sendo este resultante de uma reação secundária de absorção do ácido fluorídrico (HF) pela sílica do concentrado fosfático, produzido na etapa de lavagem dos gases (Monteiro, 2008), conforme a reação apresentada na Equação 1:



O H_2SiF_6 pode ser recuperado através da filtração para a retirada de sólidos, realizada em filtro prensa. Após esta etapa o mesmo pode ser comercializado para outras indústrias ou ainda aplicado no próprio processo como agente de solubilização da rocha fosfática, diminuindo os custos com ácido sulfúrico para a etapa de acidulação do processo (Monteiro, 2008).

Diante deste cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dinâmico de um filtro prensa através do estudo de caso quantitativo da aplicação do mesmo para a recuperação de ácido hexafluorsilícico, a partir da simulação computacional do modelo matemático que representa o comportamento do sistema. Além disso, as condições operacionais do processo são avaliadas de modo a maximizar a eficiência de recuperação do produto de interesse, otimizando o sistema.

2. Metodologia

O presente estudo é uma pesquisa científica aplicada, cuja finalidade prática é possibilitar a compreensão teórica de um problema específico, contribuindo com o desenvolvimento de novas pesquisas. A metodologia é baseada nas definições do método científico quantitativo (Pereira et al., 2018) e na metodologia de simulação, estruturada nos seguintes passos: formulação do problema, definição do modelo, construção e verificação do programa computacional, validação do modelo, realização das execuções de simulação, análise de resultados e documentação e implementação (Gavira, 2003). A definição do modelo foi feita a partir da revisão de conceitos e referências bibliográficas já existentes para este tipo de equipamento aplicado a outros tipos de suspensões e a resolução do mesmo foi feita utilizando o software livre Scilab, em sua versão atual (6.0.1).

2.1 A produção de SSP e o efluente líquido H_2SiF_6

De maneira geral, o processo de produção de fertilizantes inicia-se com a exploração de recursos naturais que fornecem as matérias primas básicas, seguida da acidulação para formação das matérias-primas secundárias que resultam nos fertilizantes básicos, até chegar nas misturas finais de fertilizantes, de acordo com as especificações necessárias para sua aplicação no solo (V. P. Dias & Fernandes, 2006). A extração e transformação desses minerais em fertilizantes em sua forma final passa por muitas etapas importantes antes de chegar aos produtores agrícolas (Dias & Lajolo, 2010). A Figura 1 apresenta as principais etapas de transformação que ocorrem na indústria de fertilizantes.

A produção do superfosfato simples e de outros fertilizantes fosfatados inicia-se com a extração do minério de fosfato de minas a céu aberto ou jazidas, sendo a rocha submetida a um processo de beneficiamento por rota úmida, para aumento da concentração de fosfato, submetendo-a a etapas de fragmentação, homogeneização e moagem úmida. As etapas seguintes consistem na separação da magnetita e retirada dos minerais acessórios, como calcita, por separação magnética, na qual a magnetita é retirada. Em seguida, tem-se a retirada dos demais minerais acessórios, em especial a calcita, por meio de condicionamento, flotação, desaguamento e filtração. Por fim, o material concentrado passa por um secador rotativo e está pronto para seguir para as próximas etapas (Monteiro, 2008).

Figura 1-Etapas do ciclo produtivo de fertilizantes.



Fonte: Adaptado de Cunha (2017).

Depois da rocha fosfática passar pelo beneficiamento, ela é enviada para as unidades industriais químicas onde começa o processo de produção de fertilizantes com a reação entre o concentrado fosfático e o ácido sulfúrico em um reator

químico. É através do ácido sulfúrico que o fertilizante irá receber mais um de seus elementos principais, o enxofre (Elisario, 2013). No Brasil, a principal maneira de produção de fertilizantes fosfatados é através do processo contínuo em que ocorre a decomposição da apatita. Nesse processo, têm-se além da formação do ácido fosfórico diluído, o ácido fluorídrico e o sulfato de cálcio (gesso), que são resultados da reação entre o ácido sulfúrico e a apatita.

Quando o concentrado fosfático é tratado com o ácido sulfúrico, e levado diretamente para um reator do tipo correia para solidificar-se durante alguns dias, teremos a formação do fertilizante Superfosfato Simples (SSP). Neste segundo momento, tem-se o ataque lento do ácido fosfórico ao mineral fosfático que não reagiu. Estes efluentes líquidos ácidos surgem a partir do ácido fluorídrico gasoso e umidade gerados no ataque do ácido fosfórico ao mineral fosfático. Ao passar pelo sistema de lavagem estes gases são removidos e a sílica do concentrado fosfático absorve o HF, enquanto a água é transformada em ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6). Para que se possa utilizar o ácido gerado, ele passa por um filtro, geralmente do tipo prensa, para a retirada de sólidos, gerando um subproduto. O ácido filtrado pode ser utilizado em uma possível comercialização para outras indústrias ou como agente de solubilização da rocha fosfática diminuindo gastos com ácido sulfúrico no início do processo, enquanto os sólidos removidos podem ser úteis na granulação de fertilizantes já que possuem nutrientes (Monteiro, 2008).

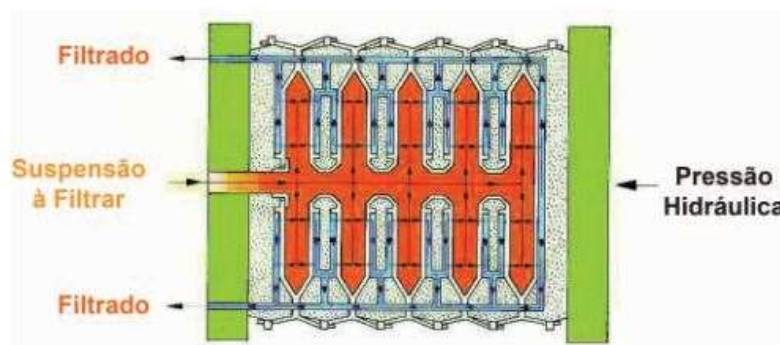
2.2 O princípio da filtração e o filtro prensa

A filtração é uma das aplicações mais comuns nos processos de separação de misturas de sólidos e líquidos ou gás. É um processo mecânico em que se utiliza uma superfície porosa (filtro) para reter o sólido de suspensões líquidas e, também para separação de partículas sólidas de gases.

O filtro prensa é um equipamento usado para separação de materiais líquidos e sólidos, foi introduzido na indústria principalmente para redução de volume e peso de lamas pelo processo de desidratação. Este tipo de filtro teve uma aceitação industrial tardia quando comparado com outros equipamentos do gênero, pois era considerado uma máquina de trabalho intensiva e pouco automatizada em suas primeiras criações. Isso mudou com a implementação de mecanismos avançados que obtinham tortas de baixa umidade com descarga automática e que permitem a lavagem do pano ao término do ciclo de filtração (Foust et al., 1982).

O filtro do tipo filtro prensa de câmaras é caracterizado por ter as placas de filtração com depressões colocadas justapostas. O furo central de cada placa revestida com lonas forma um canal de alimentação de suspensão nas câmaras. Conforme a suspensão passa pelo canal e em seguida é prensada, o filtrado escoar por uma torneira de saída existente em cada placa., a fim de facilitar a manutenção. A filtração é efetiva devido a prensagem do material através do conjunto de placa. A Figura 2 apresenta o princípio de funcionamento de um filtro prensa tipo câmara.

Figura 2- Princípio de funcionamento do filtro prensa do tipo câmara.

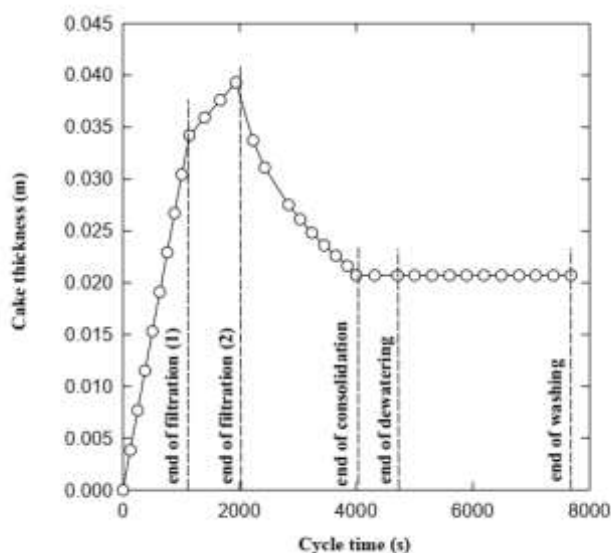


Fonte: Portal do Tratamento de Água (2017).

Devido a sua ampla aplicação na indústria de fertilizante, este foi o tipo de filtro prensa utilizado como objeto de estudo para o desenvolvimento deste trabalho. Neste filtro, a lama é alimentada nas câmaras através de orifícios a partir de uma bomba, mantendo a pressão variável a uma vazão constante ou variável, de acordo com o tipo de bomba. Nesta fase, conhecida como fase de filtração primária, se a câmara não é completamente pela torta que cresce simultaneamente nos dois lados desta, inicia-se a fase secundária, na qual a suspensão residual será filtrada a pressão constante pelo movimento de um diafragma flexível (Tarleton & Wakeman, 1994b; Wakeman & Tarleton, 1994). Para filtros que não contém diafragma, a fase de filtração secundária é desconsiderada, iniciando a fase de consolidação, logo após a filtração primária.

Ao atingir uma quantidade suficiente de suspensão filtrada (fase de consolidação) e as duas tortas de cada lado da câmara se encontram, inicia-se a fase de desidratação da torta, feita através de um jato de ar. Por fim, a lavagem da torta é realizada, completando o ciclo, antes da retirada da torta. O perfil da espessura da torta em cada uma das fases do ciclo é apresentado na Figura 3 (Tarleton & Wakeman, 1994b).

Figura 3- Espessura total da torta por câmara versus tempo de ciclo do filtro.



Fonte: Tarleton & Wakeman (1994b).

Pelo perfil apresentado é possível verificar que a torta tende a aumentar o seu tamanho em toda a primeira fase, chamada filtração, chegando ao valor máximo ao fim desta. A fase de filtração é caracterizada por uma alimentação realizada de maneira contínua, o que justifica o aumento de massa de sólidos dentro do filtro e consequente aumento da espessura da torta. A filtração secundária permite que a suspensão residual seja filtrada a pressão constante a partir do movimento do diafragma flexível do filtro. Após esta etapa, ocorre um aumento de pressão no sistema, geralmente gerada por um macaco hidráulico, que caracteriza a etapa de consolidação na qual a torta é comprimida, resultando na extração de volume de filtrado residual na torta. O ciclo se encerra com as etapas de desidratação e lavagem, ambas com a espessura da torta se mantendo constante e igual ao ponto alcançado ao final da etapa de consolidação.

2.3 Modelo Matemático

Para o desenvolvimento do modelo matemático do sistema, analisou-se, inicialmente, a etapa de enchimento do filtro, denominada fase de filtração. Assume-se que a suspensão a ser filtrada é composta apenas de sílica e ácido hexafluorsilícico,

com 10% de sólidos na suspensão a uma vazão de 3,4 m³/h. Nesta etapa, o volume de filtrado e largura de torta são, inicialmente, iguais a zero. A partir desse instante, com a vazão de líquido que flui, inicia-se a fase de filtração, que se estende até atingir a largura de torta ideal. Para a melhor operação do filtro, a largura de torta escolhida foi metade da largura da câmara de filtração. O processo é realizado com variação de pressão ao longo do tempo, com formação de uma torta com característica compressível. Para este trabalho, apenas as fases de filtração e consolidação serão abordadas.

Nesta etapa, há dois tipos de resistência ao fluxo, a primeira que se relaciona com a formação da torta e uma segunda que se relaciona com o meio filtrante. A queda de pressão total ($\Delta P [kPa]$) é o somatório das quedas de pressão resultantes das duas resistências (ΔP_1 e ΔP_2), e relacionando a massa de sólidos da suspensão (m) e a velocidade linear, têm-se a variação do volume de filtrado, representado na Equação 2:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu(\alpha_{av} cV + AR)} \quad (2)$$

na qual A é a área de filtragem, μ é a viscosidade do líquido, α_{av} a resistência específica média da torta, c a concentração efetiva da alimentação, V o volume de filtrado e R a resistência específica do meio filtrante.

A concentração efetiva de sólidos e a resistência específica da torta na Equação 2 são dependentes da pressão e são calculados conforme apresentados nos trabalhos de Tarleton (1998) e Tarleton & Wakeman (2005a, 2005b), considerando que a torta formada é compressível e há variação de pressão. A resistência específica média da torta é dada pela Equação 3:

$$\alpha_{av} = \alpha_0 (1 - n) \Delta P^n \quad (3)$$

na qual $\alpha_0 = \frac{180(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p^2 \rho_s v_s}$, na qual ε é a porosidade da torta, d_p o diâmetro da partícula e v_s o fator de forma (Boucier, 2016).

Uma vez que se sabe que a pressão do processo de filtração varia na medida em que a torta no filtro vai se formando, uma vez que as partículas da suspensão são retidas no meio filtrante e dificultam a passagem do líquido, o volume de filtrado pode ser dado pela Equação 4, considerando que ΔP pode ser definida a partir da curva característica da bomba.

$$V = \frac{A}{\alpha_{av} \mu c} \left(A \frac{\Delta P}{q} - \mu R \right), V(0) = 0 \quad (4)$$

sendo $\left(\frac{\Delta P}{q} \right) = \frac{\mu R}{A}$ para $V = 0$. Esta relação define a queda de pressão inicial que o sistema precisará ter para iniciar o processo de filtração. A filtração acaba por limitações físicas, seja pelo tamanho da câmara do filtro usado, em que a torta atinge sua espessura máxima, ou por uma quantidade de massa de torta pré-estabelecida pelo filtro para o seu bom funcionamento. A espessura máxima da torta é dada pela Equação 5.

$$L = \frac{s[\rho_s(m_{av} - 1) + \rho_l] \left(A \frac{\Delta P}{q} - \mu R \right)}{\alpha_{av} \mu c \rho_s (1 - m_{av} \varepsilon)} \quad (5)$$

na qual que ρ_l é a densidade do líquido, ρ_s a densidade do sólido da suspensão, $m_{av} = 1 + \frac{\rho_l \varepsilon}{\rho_s}$ a razão mássica de torta molhada e seca, s a fração mássica de sólidos na alimentação. Além disso, a relação de vazios na torta ε definido como $\varepsilon_0 - b \cdot \log(\Delta P)$, sendo ε_0 , n , e b são constantes empíricas de “scale-up”, derivadas de uma sequência de testes e experimentos

a pressão constante (Tarleton & Wakeman, 2005b). O tempo final de etapa de filtração é dado pela Equação 6, aproximada através da regra do trapézio:

$$t_f = \int_0^V (1/q) dV \approx \sum_0^V \frac{(V)_i - (V)_{i-1}}{2} \left(\frac{1}{q}_i + \frac{1}{q}_{i-1} \right) \quad (6)$$

A partir do momento em que a espessura máxima atingida, inicia-se a etapa de consolidação. Esta fase é realizada com o auxílio do macaco hidráulico acoplado ao sistema, com uma pressão constante pré-estabelecida. O tempo desta fase costuma ser adotado como o mesmo da fase de filtração e a área ativa do filtro é dividida por dois $A_c = A/2$. Nesta fase, o volume de filtrado e a espessura da torta são dados pelas Equações 7 e 8:

$$V_T = V_{pr} + V_c = V_{pr} + A_c(L_{pr} - L_c) \quad (7)$$

$$L_c = L_{pr} - (L_{pr} - L_\infty) \frac{\sqrt{\frac{4(j_H)^2 T_c}{\pi}}}{\left[1 + \left(\sqrt{\frac{4(j_H)^2 T_c}{\pi}} \right)^{2\nu^{1/2\nu}} \right]} \quad (8)$$

sendo $T_c = \frac{i^2 C_e t_c}{\omega_0^2}$, i é o número de superfícies de drenagem no filtro prensa, ν o índice de comportamento de consolidação, j_H o fator de área de consolidação efetiva, L_{pr} a espessura final da torta na etapa de filtração e t_c o tempo de consolidação. Os parâmetros espessura da torta em um tempo de consolidação infinito (L_∞), coeficiente de consolidação modificado (C_e) e volume de sólidos por unidade de área filtrante (ω_0) são definidos nas Equações 9-11, respectivamente.

$$L_\infty = \frac{M_s(1+(\epsilon_{mv})_\infty)}{A_c \rho_s} \quad (9)$$

$$C_e = C_{e0} \Delta p_c^Y \quad (10)$$

$$\omega_0 = \frac{M_s}{\rho_s A_c} \quad (11)$$

3. Resultados e Discussão

3.1 Delimitação do problema

Inicialmente, foram definidos os parâmetros relativos às partículas de material que estão presentes na suspensão, antes do início do processo de filtração. Considerou-se como hipótese, que as partículas de sílica da suspensão têm comportamento semelhante às partículas de carbonato de cálcio (CaCO_3), tomando como base a densidade e a solubilidade destas em água. Os parâmetros das partículas, meio filtrante e suspensão utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1-Parâmetros do modelo.

Parâmetro	Descrição	Valor
Dp	Diâmetro da partícula [m] ¹	5,7.10 ⁻⁶
v_s	Constante de forma da partícula [-] ¹	1
n	Fator de compressibilidade [-] ¹	0,43
Γ	Índice de consolidação [-] ²	0,1
B	Índice de compressibilidade [-] ²	0,1
β₁	Índice de compressibilidade [-] ²	0,55
ε	Porosidade [-] ²	0,68
C_{e0}	Coefficiente de consolidação modificado [m ² /s] ²	1.10 ⁻⁸
e₀	Relação de vazios [-] ²	3
e₀₁	Relação de vazios [-] ²	1,63
Rs	Resistencia específica do meio filtrante [m ⁻¹] ³	6,36.10 ⁹
ω	Área de filtração [m ²] ³	64,35
ρ_s	Densidade do sólido [kg/m ³] ¹	2650
ρ	Densidade do líquido [kg/m ³] ⁴	1170
s	Concentração de sólidos na alimentação [w/w] ⁵	0,10
μ	Viscosidade do líquido [Pa s] ⁴	0,06
q₀	Vazão de alimentação [m ³ s ⁻¹] ⁵	6,177.10 ³

Fonte: 1- Boucier (2016); 2-Tarleton & Wakeman (1994b); 3-Watson-Marlow Bredel (2017); 4-Anglo American (2014) ; 5-Autores.

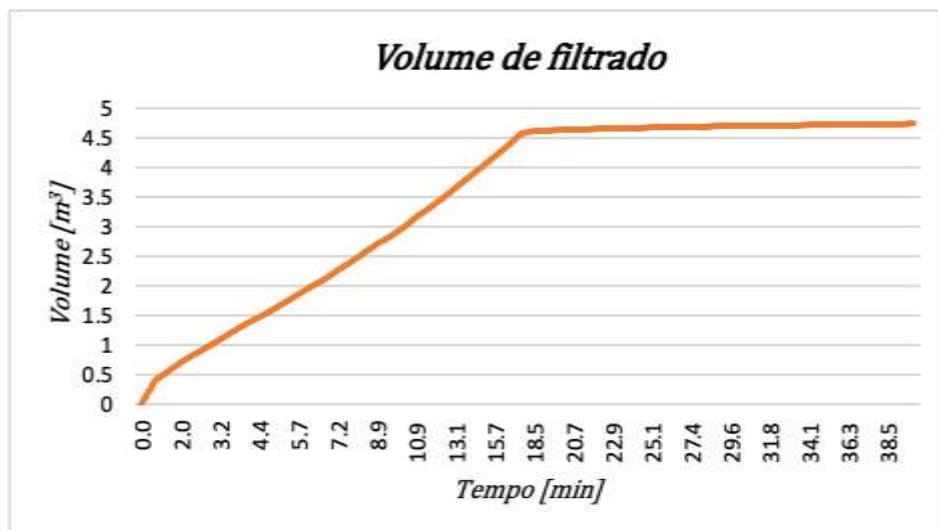
Considerou-se o tempo total para as duas primeiras fases do processo de filtração igual a 40 minutos. Para atingir este tempo total, utilizou-se uma bomba da fabricante Watson-Marlow Bredel modelo 65, para a temperatura de operação de 60°C (Watson-Marlow Bredel, 2017). Os dados foram utilizados para definir a relação entre a vazão e a pressão através do ajuste polinomial de segunda ordem.

A partir da Equação 4 e da relação definida, estabeleceu-se a queda de pressão inicial de, aproximadamente, 36,6 kPa e uma vazão de 6,17.10⁻³ m³/s. A partir daí, variou-se a diferença de pressão até que a torta atingisse uma espessura de 15mm, com base na faixa de operação definida pelo manual do fabricante de filtros prensa Andritz (Andritz, 2018), correspondente ao fim da filtração e começo da fase de consolidação. A pressão de alimentação considerada foi de 800kPa enquanto a saída deve ser de, no mínimo, 100kPa. Sendo assim a queda de pressão máxima estipulada é de 700kPa. A pressão da fase de consolidação foi definida como 1000 kPa.

3.2 Resultados via simulação

A resolução do modelo foi obtida a partir de simulação realizada no *software* livre *Scilab*, a partir da a definição de alguns parâmetros específicos para o processo estudado. As Figura 4Figura 5 apresentam a variação do volume de filtrado e da espessura da torta durante o processo.

Figura 4-Variação do volume de filtrado nas fases de filtração e consolidação.



Fonte: Autores.

Pelos perfis obtidos é possível identificar a fase de filtração, na qual caracteriza-se por um comportamento ascendente tanto para o volume de filtrado quanto para a espessura da torta crescem, de maneira semelhante, alcançando um volume de filtrado de 4,577 m³ e na espessura pré-estabelecida de 15 mm. Pode-se observar que a espessura da torta cresce linearmente com o tempo e nota-se o mesmo perfil parabólico da fase de consolidação, perfil esperado para este tipo de filtro, conforme apresentado na Figura 3. É importante ressaltar que filtro utilizado pelos autores contém diafragmas, o que explica a presença de uma filtração secundária.

Figura 5- Variação da espessura da torta nas fases de filtração e consolidação.



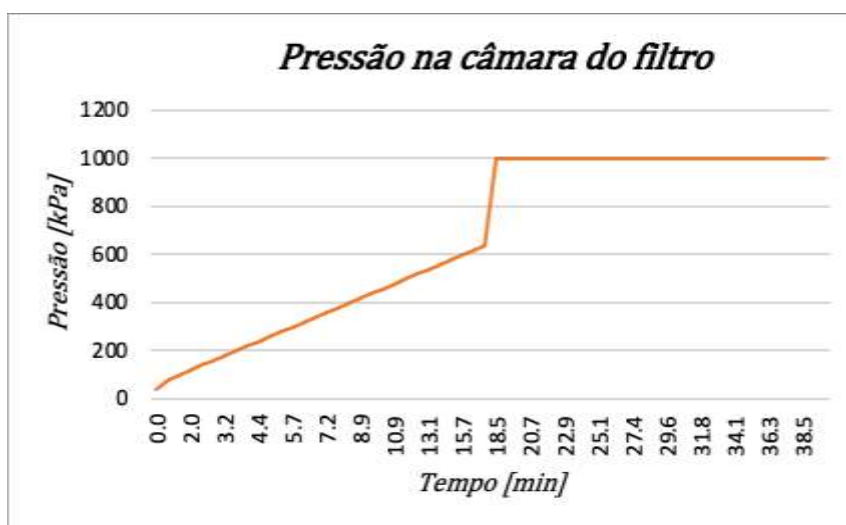
Fonte: Autores.

Ao iniciar a fase de consolidação, na qual a alimentação é suspensa e a prensa começa a exercer a sua força, percebe-se que a espessura da torta diminui com o passar do tempo, chegando a 10 mm no tempo de 40 min, apresentando um perfil

parabólico nesta fase e, ao mesmo tempo, o volume de filtrado aumenta levemente, uma vez que o líquido restante da torta é forçado a passar pela tela filtrante, juntando-se ao material filtrado, alcançando o valor de 4,744 m³/s. Na Figura 6 apresenta-se o comportamento da pressão na câmara do filtro durante as fases de filtração e consolidação.

É possível observar um perfil quase linear para a etapa de filtração, saindo de uma diferença pressão de 36,6 kPa e indo até 616,6 kPa, e logo em seguida um salto para a pressão de consolidação, de 1000 kPa, que permanece constante até o final do processo. Pelo perfil obtido é possível notar os tempos de cada fase, sendo a filtração partindo do tempo zero a 17,7 min e a consolidação vindo logo em seguida até 39,9 min aproximadamente. Os resultados obtidos apresentam o perfil esperado para este tipo de filtro, sem a fase de filtração secundária, conforme apresentado nos trabalhos de Tarleton (1998b), Tarleton & Wakeman (1994a, 1994b).

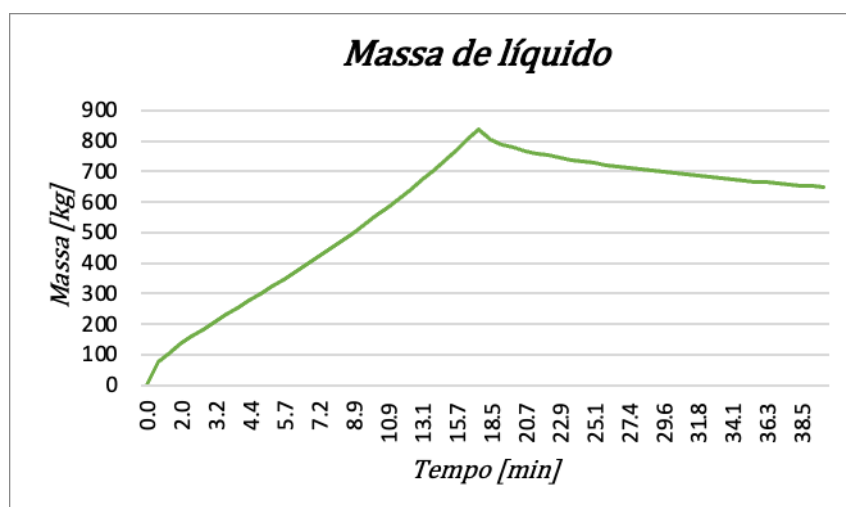
Figura 6- Variação de pressão na câmara do filtro nas fases de filtração e consolidação.



Fonte: Autores.

As massas de líquido e sólido na câmara são também variáveis relevantes para que se conheça o comportamento do sistema. Os perfis do comportamento dinâmico destas variáveis são apresentados nas Figura 7 e Figura 8.

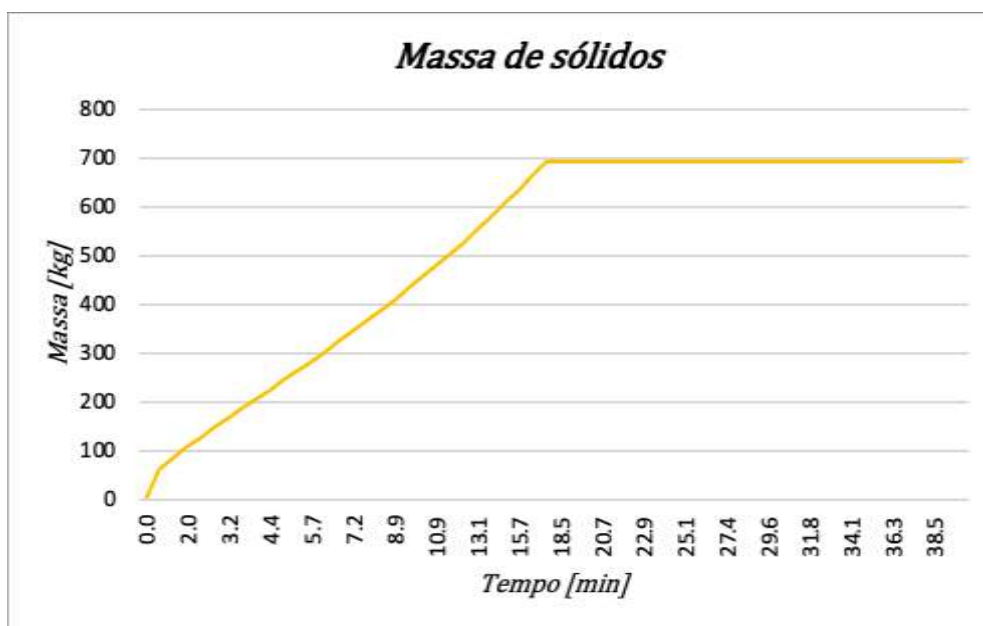
Figura 7- Comportamento dinâmico da massa de líquido nas fases de filtração e consolidação.



Fonte: Autores.

A partir do comportamento apresentado na Figura 7, nota-se que a massa de líquido inicialmente aumenta de forma linear, considerando que há alimentação de suspensão de forma constante no filtro até o fim da fase de filtração, até atingir um valor máximo. Após o instante 17,7 min, com o início da fase de consolidação e a pressão exercida pela prensa, o volume de líquido na torta tende a diminuir de forma gradual, com valor inicial de 839,78 kg e alcançando o valor de 649,19 kg ao fim desta fase, o que corresponde a uma redução de 22,7% de massa de líquido retido na torta contida na câmara do filtro.

Figura 8- Comportamento dinâmico da massa de sólidos retida no filtro nas fases de filtração e consolidação.



Fonte: Autores.

A massa de sólidos cresce de maneira similar a massa de líquido na etapa de filtração, porém, permanece constante igual a 693,46 kg na etapa de consolidação. Este comportamento ocorre uma vez que durante a filtração há alimentação constante da suspensão de sílica e ácido hexafluorsilícico porém, após esta etapa a alimentação é encerrada, o que faz que não haja mais variação na massa de sólidos. A torta possui cerca de 51,65% de sólidos em sua composição e teor de umidade passando de 54,77% no início da etapa de consolidação para cerca de 48,35%, sendo este último parâmetro de grande relevância no processo considerando que após a retirada da torta do filtro, esta deverá passar por um processo de secagem para descarte ou utilização para outros fins.

4. Considerações Finais

A simulação é uma importante ferramenta para a compreensão dos princípios envolvidos nos processos químicos, auxiliando de forma efetiva na otimização destes. O modelo utilizado para o estudo do comportamento dinâmico do filtro prensa utilizado para a recuperação do ácido hexafluorsilícico apresentou-se adequado na para a compreensão das etapas de filtração e consolidação do processo, encontrando resultados consistentes que podem ser utilizados para avaliar a influência das variáveis de operação na eficiência do processo como pressão e tempo de consolidação. O volume de filtrado obtido ao fim da fase de consolidação é de cerca de, no mínimo, 4,77 m³ por ciclo, desconsiderando as etapas posteriores deste.

Para as condições estudadas, obteve-se uma retenção de cerca de 693,46 kg de sílica no filtro o que representa cerca de 73,38% dos sólidos alimentados durante o processo e uma recuperação de cerca de 92,07% do ácido hexafluorsilícico

apenas nas duas primeiras etapas da filtração. Os resultados obtidos possibilitam tornar o processo mais sustentável, otimizando a recuperação do produto de interesse e destinação para a etapa de acidulação da produção do SSP, tornando os custos desta ainda menores. O estudo das demais fases da filtração bem como a definição dos parâmetros para a sílica para melhor adequação do modelo estudado ao sistema são alguns dos objetivos que podem ser desenvolvidos em trabalhos futuros.

Referências

- Almeida, E. G. (2019). *Fertilizante de liberação lenta controlada e superfosfato simples no crescimento de mudas de maracujazeiro*. Universidade Federal Rural da Amazônia.
- Andritz. (2018). *Abrindo Caminhos para o futuro digitalizado - Andritz filtro prensa sidebar e overhead*. <https://www.andritz.com/resource/blob/254416/293235ed1ef8af04d274ff0b7c648e38/se-filter-cloth-data.pdf>
- Anglo American. (2014). *Ficha de Segurança de Produtos Químicos (FISQ)*.
- Boucier, D. (2016). Influence of particle size and shape properties on cake resistance and compressibility during pressure filtration. *Chemical Engineering Science*, 144, 176–187.
- CNA, C. da A. e P. do B., & CEPEA, C. de E. A. em E. A. (2021). *PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020*. https://www.cnabrasil.org.br/assets/arquivos/boletins/sut.pib_dez_2020.9mar2021.pdf
- Costa, L. M. da, & Silva, M. F. de O. (2012). A indústria química e o setor de fertilizantes. In *BNDES 60 anos: perspectivas setoriais*. (p. 12–60). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2025>
- Cunha, L. G. S. (2017). *Cenários e desafios da indústria de fertilizantes*. Universidade de Uberlândia.
- Dias, E. G., & Lajolo, R. D. (2010). O meio ambiente na produção de fertilizantes fosfatados no Brasil. In F. R. C. Fernandes, A. B. da Luz, & Z. C. Castilhos (Orgs.), *Agrominerais para o Brasil* (p. 105–124).
- Dias, V. P., & Fernandes, E. (2006). Fertilizantes: uma visão geral sintética. *BNDES setorial*, 24, 97–138.
- Elisario, A. C. D. (2013). *Simulação computacional e análise paramétrica de uma unidade industrial de descarga e estocagem de amônia líquida pressurizada*. Universidade Federal de Uberlândia.
- Foust, A. S., Wenzel, L. A., Clump, C. W., Maus, L., & Andersen, L. B. (1982). *Princípio das Operações Unitárias*. Editora Guanabara.
- Gavira, M. de O. (2003). *Simulação como ferramenta computacional de aquisição de conhecimento*. UFSCar.
- Monteiro, M. F. (2008). *Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfato simples*. Universidade Federal da Bahia.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica [recurso eletrônico]* (1ª edição). NTE/UFMS. https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1
- Portal do Tratamento de Água. (2017). *Filtro Prensa no tratamento de água e efluentes*. <https://tratamentodeagua.com.br/filtro-prensa-no-tratamento-de-agua-e-efluentes/>
- Tarleton, E. S. (1998a). A new approach to variable pressure cake filtration. *Minerals Engineering*, 11, 53–69.
- Tarleton, E. S. (1998b). Predicting the performance of pressure filters. *Filtration*, 35, 293–298.
- Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (1994a). A framework methodology for the simulation and sizing of diaphragm filter presses. *Minerals Engineering*, 7, 1411–1425.
- Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (1994b). The simulation, modelling and sizing of pressure filters. *Filtration and Separation*, 31(4), 393–397.
- Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (2005a). Filter Design Software (FDS) for Filter Process Simulation. *Improving process efficiency through filter scale-up and evaluation*.
- Tarleton, E. S., & Wakeman, R. J. (2005b). Computer software for the specification of solid/liquid separation equipment. *Filtech Conference*, 14–21.
- Wakeman, R. J., & Tarleton, E. S. (1994). A framework methodology for the simulation and sizing of diaphragm filter presses. *Minerals Engineering*, 7(11), 1411–1425.
- Watson-Marlow Bredel. (2017). *Bredel 65, Bredel 80 e Bredel 100*. https://www.wmftg.com/v1.0/Documents/knowledge-hub/Datasheets/br-pt-portuguese/Bredel-PT/wd-bredel_65_80_100-pt-06.pdf