
PREDIÇÃO DO TEMPO DE REALIZAÇÃO DE EXPERIMENTO EM FILTRO PRENSA: UM ESTUDO A PARTIR DE DADOS EMPÍRICOS E TEÓRICOS

PREDICTION OF EXPERIMENTAL TIME FOR FILTER PRESSING: A STUDY FROM EMPIRICAL AND THEORETICAL DATA

Isabela Ferreira Nunes ¹

Bruna Almeida Rocha ¹

Geovanina Prado Alves ¹

Igor Brumano Coelho Amaral ¹

Arlete Barbosa dos Reis ²

Resumo: A filtração é um método de separação mecânica de partículas por meio do uso de um meio filtrante, com objetivo de dissociar partículas sólidas presentes em um líquido. O objetivo deste trabalho é desenvolver o método de utilização de filtro a vácuo em escala laboratorial para determinar condições ótimas de operação em um filtro prensa, para filtração em escalas maiores. A filtração em escala de bancada foi realizada utilizando uma suspensão de carbonato de cálcio, e os experimentos para a determinação de parâmetros como resistividade da torta e resistência do meio filtrante foram realizados com o uso de uma amostra de jeans. A partir da teoria da filtração de tortas incompressíveis, foi possível estimar a relação entre o tempo de filtração e a área do meio filtrante, com ensaios realizados no filtro à vácuo. Ajustando o tempo de filtração em um filtro prensa para as mesmas condições de concentração e meio filtrante, obteve-se, como predição, o tempo esperado para filtração da suspensão. O resultado obtido encontra-se dentro do tempo esperado para a filtração, considerando que as diferenças operacionais do filtro prensa causam uma melhoria experimental em relação ao filtro a vácuo.

Palavras-chaves: Operação Unitária; Meio Filtrante; Resistividade; Resistência.

Abstract: Filtration is a method of mechanical particle separation using a filter medium to dissociate solid particles from a liquid. The aim of this work is to establish the method of using a vacuum filter on a laboratory scale to determine optimal operating conditions on a filter press, for filtration on larger scales. We did a bench-scale filtration using a calcium carbonate suspension, and we did experiments for controlling parameters such as pie resistivity and filter media resistance using a sample of jeans fabric. From the theory of incompressible cake filtration, it was possible to estimate the relationship between the filtration time and the area of the filter medium, with tests performed on a vacuum filter. By adjusting the filtration time in a filter press to the same conditions of concentration and filter medium, we obtained the expected time for filtration of the suspension as an indicator. The result obtained is within the expected time for filtration, considering that the operating differences of the filter press cause an experimental improvement over the vacuum filter.

Keywords: Unitary Operation; Filter media; Resistivity, Resistance.

¹Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM e-mail: isabfn@gmail.com; bruna.rocha1994@gmail.com; geovanina_prado@hotmail.com; igor.brumano@ict.ufvjm.edu.br

²UFVJM – Curso de Engenharia Química e-mail: arlete.reis@ict.ufvjm.edu.br

1 Introdução

A técnica de separação de misturas heterogêneas compostas por sólidos dispersos em meio líquido é denominada filtração. Emprega-se um filtro para separar as fases, consistindo na passagem do fluido sobre um meio filtrante, causado pela diferença de pressão presente no meio, resultando na formação de uma torta sólida depositada sob o meio filtrante (SILVA; FREITAS; SILVEIRA, 2012; SILVA; DUARTE, 2009). Os processos de filtração são utilizados para produção de cerveja, vinhos e outros, extração de corante, tratamento de água e outros (JOSÉ *et al.*, 2019; SOUSA; COSTA; FOGAÇA, 2019; OTENIO *et al.*, 2008; UENOJO; PASTORE, 2007).

Dentre as diversas formas de filtração existem as que dependem da ação do vácuo, a partir de um processo de diferença de pressão nos dois lados do filtro em virtude do aumento no fluxo do filtrado devido à sucção provocada pelo vácuo. Sua montagem consiste em um frasco Kitassato, provido de um funil de Büchner conectado a uma bomba de vácuo (SILVA; FREITAS; SILVEIRA, 2012). A filtração a vácuo, além de ser mais rápida em relação a outros tipos, como por exemplo a filtração por gravidade, é indicada quando a fase líquida da mistura tem viscosidade elevada (BASTOS; AFONSO, 2015).

Outros filtros comumente utilizados são os que atuam por pressão aplicada. Tal processo é recomendado quando o sólido que compõe a torta obstrui os poros do meio filtrante, propondo a aplicação de uma força, normalmente hidráulica ou pneumática, sobre essa torta. Nessa classe utiliza-se muito o filtro-prensa, formado por uma série de placas que são apertadas firmemente uma contra as outras, com o meio filtrante sobre cada lado de uma das placas ou quadros. No filtro de quadros as placas são quadradas, com faces da prensa planas e sucessivas, e, em cada lado da placa, há um meio filtrante onde é depositado a torta após a filtração. O conjunto é composto um sistema hidráulico, pelas placas e por canais de alimentação da suspensão e se saída do filtrado (GAUTO; ROSA, 2011).

Os meios filtrantes considerados eficientes devem, segundo MacCabe *et al.* (1993), possuir boa retenção dos sólidos a serem filtrados sem impedir a passagem do fluido; fornecer um filtrado claro; possuir boa resistência química e física, sendo capaz de suportar as condições do processo; permitir que a torta seja retirada de forma limpa e completa; e ser de baixo custo.

No âmbito desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo comprovar por meio de modelos matemáticos a equivalência de área do meio filtrante entre o filtro à vácuo e o filtro-prensa, confirmando a hipótese de que o tempo de filtração a ser utilizado neste equivale com o tempo teórico estudado. Para tanto, foram considerados dados obtidos a partir de experimentos realizados em sistema de filtração a vácuo e modelagem matemática.

2 Materiais e Métodos

Os experimentos de filtração à vácuo foram realizados em escala de bancada com a utilização de funil de Büchner e frasco Kitassato acoplado à bomba peristáltica ajustada em 60 rpm alimentada com suspensão sob agitação constante, afim de se obterem dados experimentais para cálculo do tempo de filtração utilizado no módulo filtro prensa. Foi utilizado 1 L de suspensão aquosa de carbonato de cálcio (CaCO_3) na concentração de 20g/L, obtida a partir da moagem em moinho de facas de giz comercial uniformizado em tamis 24 mesh. O meio filtrante utilizado foi o tecido jeans (comercial). O experimento permitiu coletar, a cada 100 mL, dados referentes à queda de pressão da bomba, assim como o tempo necessário para toda a filtração.

Assim, a partir dos cálculos realizados na filtração a vácuo, foi possível obter a relação entre o tempo e a área do meio filtrante a fim de se estimar e ajustar o tempo total de filtração e calcular os parâmetros a serem reproduzidos no módulo didático filtro prensa. Para tanto foram preparados 20L da mesma suspensão de CaCO_3 , mantida sob agitação constante, no

tanque de alimentação. O experimento teve início com a abertura da válvula que permite a passagem da suspensão, em seguida, a bomba hidráulica foi acionada para que o fluido passasse pelo equipamento com a velocidade e pressão adequadas, possibilitando assim, a coleta de dados referentes à queda de pressão da bomba e também o tempo necessário para um ciclo de filtração.

2.2.1 Modelagem Matemática

O cálculo da resistividade da torta (α) é feito de acordo com a teoria da filtração para tortas incompressíveis de MacCabe *et al.* (1993), sendo afetada principalmente pelas propriedades da torta, como a porosidade e o diâmetro da partícula e pode ser definida pela Equação 1:

$$\alpha = \frac{\Delta p_c A}{m_c u \mu} \quad (1)$$

Sendo Δp_c queda de pressão na torta; A , área de filtração; m_c , massa de sólidos na torta; u , velocidade do filtrado; μ , viscosidade do filtrado.

A resistência da torta depende de sua compressibilidade. É possível obter os valores da resistividade média da torta (α) a partir de uma situação de formação de uma torta incompressível ou de compressibilidade desprezível, ou seja, com esta variável constante, é possível calcular valores de α como descrito na Eq. 1. A partir destes resultados, calcula-se também o valor relativo à resistência do meio filtrante (R_m).

Por sua vez, a resistência que o meio filtrante apresenta ao escoamento é influenciada pela queda de pressão, fazendo com que as partículas passem com maior velocidade pelo meio, aumentando a aderência de sólidos, conforme a Equação 2 (MACCABE *et al.*, 1993):

$$R_m = \frac{\Delta p_m}{u \mu} \quad (2)$$

Onde Δp_m é a queda de pressão no meio filtrante; u , a velocidade do filtrado; e μ , a viscosidade do filtrado.

De acordo com as Eq. 1 e 2, tem-se a queda de pressão total (Δp), como mostrado na Equação 3:

$$\Delta p = \Delta p_m + \Delta p_c = \mu u \left(\frac{m_c \alpha}{A} + R_m \right) \quad (3)$$

Sendo Δp a queda de pressão total; Δp_m , a queda de pressão no meio filtrante; Δp_c , queda de pressão na torta; μ , a viscosidade do filtrado; u , a velocidade do filtrado; m_c , a massa de sólidos na torta, α , a resistividade da torta; A , a área de filtração e R_m , a resistência do meio filtrante.

A velocidade linear u é dada pela Equação 4:

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

Em que dV/dt é a variação do volume do filtrado recolhido ao longo do tempo (t).

Tomando a massa das partículas depositadas no filtro por unidade de volume de filtrado (c) a massa de sólidos no filtro no tempo (t) é Vc , logo, tem-se a Equação 5:

$$m_c = Vc \quad (5)$$

Dessa forma, com as Eq. 4 e 5 na Eq. 3, obtém-se a Equação 6:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{A\Delta p} \left(\frac{\alpha c V}{A} + R_m \right) \quad (6)$$

Tendo em vista as constantes viscosidade do filtrado (μ), área (A), resistividade da torta (α), densidade da partícula (c) e resistência do meio filtrante (R_m), tem-se, com a filtração à pressão constante, as variáveis dependentes do volume (V) e do tempo (t), logo, segundo MacCabe *et al.* (1993), tem-se:

$$\frac{\mu R_m}{A\Delta p} = \left(\frac{dt}{dV} \right)_0 = \frac{1}{q_0} \quad (7)$$

Onde q_0 é a vazão do filtrado. A Eq. 6 pode ser reescrita, conforme a Equação 8:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{q} = K_c V + \frac{1}{q_0} \quad (8)$$

Onde K_c é a constante dada pela Equação 9:

$$K_c = \frac{\mu \alpha c}{A^2 \Delta p} \quad (9)$$

Integrando a Equação 8, tem-se a Equação 10:

$$\frac{t}{V} = \left(\frac{K_c}{2} \right) V + \frac{1}{q_0} \quad (10)$$

A Equação 10 é considerada uma função linear ($\frac{t}{V}$ x V) obtendo K_c e $\frac{1}{q_0}$ por meio dos coeficientes linear e angular da reta. Dessa forma, determinam-se os parâmetros: resistividade da torta (α) e resistência do meio filtrante (R_m).

O tempo de filtração pode ser determinado também a partir dos valores de α e R_m , conforme a Equação 11:

$$t = \frac{K_c V^2}{2} + V \frac{1}{q_0} \quad (11)$$

Sendo K_c dado pela Equação 9. Assim, tem-se a Equação 12, que define o tempo de filtração.

$$t = \frac{\mu \alpha c}{A^2 \Delta p} V^2 + \frac{\mu R_m}{A \Delta p} V \quad (12)$$

Com simplificações, as constantes de resistividade da torta (α) e resistência do meio filtrante (R_m) podem ser diretamente calculadas pelas Equações 13 e 14.

$$\alpha = \frac{K_c A^2 \Delta p}{\mu C} \quad (13)$$

$$R_m = \frac{1}{q_0} \frac{A \Delta p}{\mu} \quad (14)$$

3 Resultados e Discussões

O presente estudo foi realizado com base nos princípios de filtração, considerando como premissa, o tempo de filtração comumente dispensado na execução de ensaios de filtração à vácuo em escala de bancada.

Considerando os procedimentos teóricos, bem como as deduções matemáticas, é possível prever o tempo em que será possível concluir um mesmo experimento, sendo contudo, considerada uma reprodução em escala piloto e/ou em escalas maiores que as de bancada. Para tanto, os parâmetros necessários para calcular a resistividade da torta e a resistência do meio filtrante foram obtidos no ensaio de filtração a vácuo, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes de operação

Constante	Simbologia (Unidade)	Valores obtidos
Coeficiente angular	$K_c \left(\frac{s}{m^6} \right)$	$2,00 \times 10^8$
Coeficiente linear	$\frac{1}{q_0} \left(\frac{s}{m^3} \right)$	62 070
Diferença de pressão	$\Delta p \left(\frac{N}{m^2} \right)$	$3,73 \times 10^4$
Viscosidade do filtrado	$\mu (Pa \cdot s)$	$8,86 \times 10^{-4}$ a $(25^\circ C)$
Área de filtração	$A (m^2)$	$1,19 \times 10^{-2}$
Concentração da suspensão	$C \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$	20

Fonte: Autores.

Após definidas e elencadas todas as constantes utilizadas, foram então relacionadas as variáveis que influenciam durante a execução dos experimentos que determinam a relação entre os ensaios de predição do tempo de filtração num filtro prensa, tendo como base os ensaios

preliminares, realizados em escala de bancada, num aparato de filtração à vácuo. Dessa forma, utilizando as Equações 1 e 2, de acordo com as constantes elencadas na Tabela 1, obtiveram-se os valores de $\alpha = 1,19 \times 10^{11} \frac{m}{kg}$ e $R_m = 3,11 \times 10^{10} m^{-1}$.

Conforme ilustra a Tabela 2, as variáveis analisadas foram: quantidade de placas a serem utilizadas nos experimentos comprobatórios acerca do tempo de filtração, e área de filtração. Vale ressaltar que a predição do tempo necessário para que ocorresse a filtração num filtro prensa, foi determinado de acordo com a equação 7.

Tabela 2 – Variáveis do processo

Área de filtração		Tempo de filtração		
Placas		Predição	Tempo real	
(unidades)	(m ²)		Filtro prensa	Filtro a vácuo
1	0,04	123min e 79 seg	47min e 77 seg	126min e 77 seg
2	0,08	32min e 29seg	29min e 13seg	33min e 97seg
3	0,12	15min e 12seg	7 min e 25seg	16min e 11seg
4	0,16	8min e 47seg	6 min e 23seg	9min e 63seg

Fonte: Autores.

Na Figura 1 é apresentada a relação de $\left(\frac{t}{V}\right)$ em função de V , a partir da qual, seguindo o ajuste linear a estes dado, obtém-se os coeficientes linear $\left(\frac{1}{q_0}\right)$ e angular (K_c) da reta dada pela Equação 4.

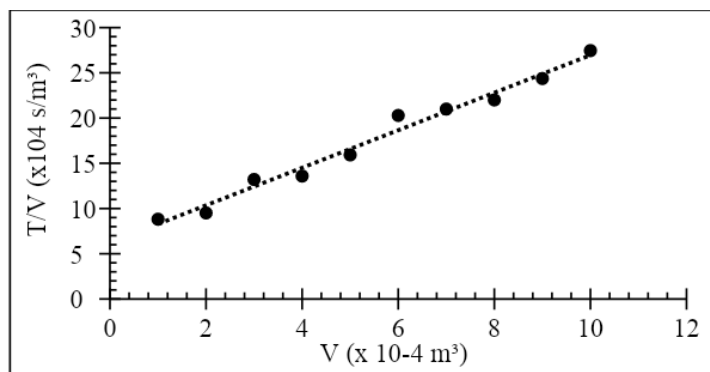


Figura 1—Relação de $\frac{t}{V}$ em função de V

Fonte: Autores.

Por fim, a partir dos parâmetros calculados, utilizou-se a Equação 5 para o cálculo da previsão do tempo de filtração no filtro prensa, mantendo os valores de α e R_m constantes na operação pelo filtro prensa, bem como a concentração da suspensão e a viscosidade do filtrado. O volume, a queda de pressão e a área, são parâmetros que se diferem do método a vácuo. O valor de Δp utilizado para os cálculos foi equivalente ao valor obtido pela operação a vácuo; sabe-se, porém, que se trata de uma estimativa, uma vez que a bomba utilizada no módulo filtro prensa trabalha com maiores pressões, portanto o tempo prático de filtração é menor do que o teórico.

Para determinar a melhor área de meio filtrante, foi feita uma análise de como se comporta o tempo de filtração com o aumento da área, que pode ser operado a partir do aumento do número de placas no módulo. Cada placa possui uma área equivalente a 0,04m², desta forma, o cálculo do tempo foi feito utilizando com base na Equação 5, usando um volume de 20L, sendo obtida o tempo de filtração em função da área (Figura 2).

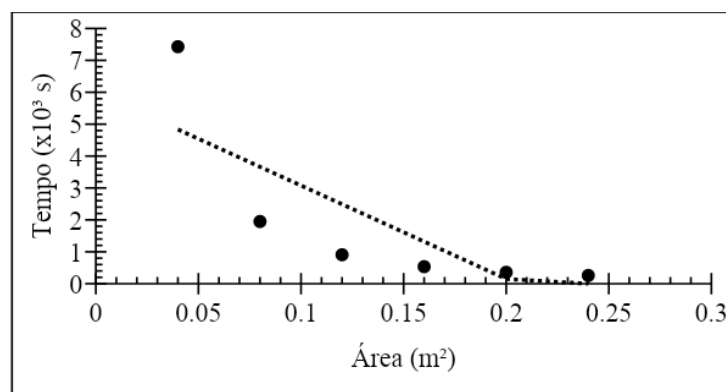


Figura 2 - Tempo versus Área

Fonte: Autores.

Dessa forma, verifica-se a relação exponencial entre a queda do tempo e o aumento da área, constatando-se que não é necessário utilizar mais de quatro unidades de área ($4 \times 0,04m^2$), uma vez que não há queda expressiva no tempo de filtração. Logo, a área foi definida por $0,16m^2$, com tempo teórico de 8min e 47s. Ao fim do experimento com o filtro prensa, obteve-se o tempo de total de 6min e 23s, devido à maior potência da bomba hidráulica, pois a queda de pressão registrada, de $5,88 \times 10^4 \frac{N}{m^2}$, foi superior à do ensaio com a bomba a vácuo. Assim, o tempo de filtração se encontra dentro do padrão esperado pelo experimento.

Por fim, a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitou expor e comprovar a presença da torta de $CaCO_3$ formada na filtração a vácuo em amplitudes e vistas distintas (Figura 3), e ainda, a superfície do meio filtrante (Figura 4) a qual demonstra a baixa porosidade do mesmo.

O tempo esperado para filtração da suspensão foi de 8min e 47s utilizando uma área de filtração equivalente a $0,16 m^2$, tendo sido, por fim, obtido o tempo total de filtração de 6 min e 23s.

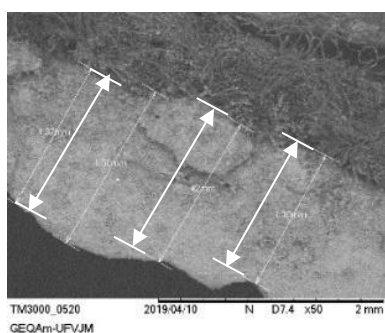


Fig. 3a - 50X

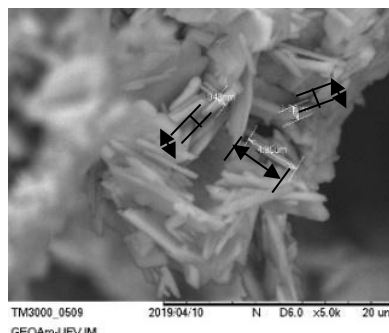


Fig. 3b - 5000X

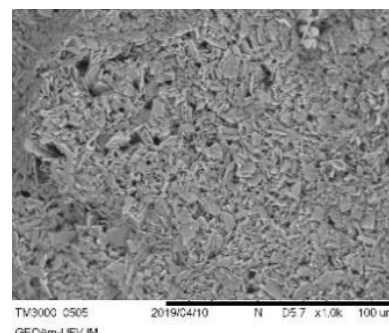


Fig. 3c - 1000X

Figura 3 - Micrografias MEV das tortas de $CaCO_3$ (Vista lateral)

Fonte: Autores.

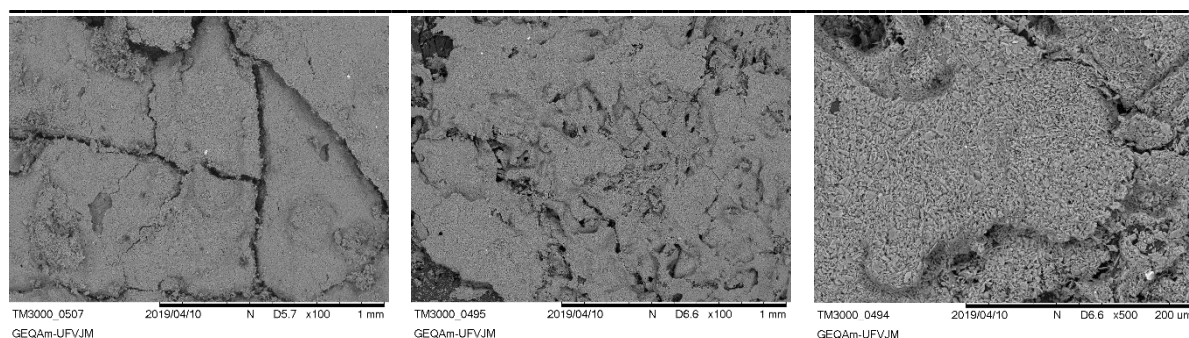


Fig. 4a - 100X

Fig. 4b- 100X

Fig 4c-500X

Figura 4 - Micrografias MEV das tortas de $CaCO_3$ (Vista plana)

Fonte: Autores.

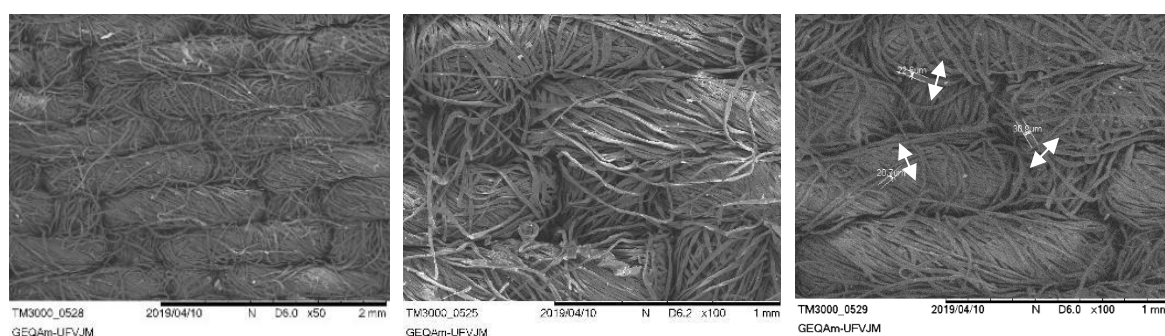


Fig. 5a –50X

Fig. 5b –100X

Fig. 5c–100X

Figura 5 - Micrografias MEV do meio filtrante (Vista plana)

Fonte: Autores.

A relação entre a baixa porosidade e a presença efetiva da torta é, de certa forma, intuitiva. Um meio filtrante composto por fibras bem estruturadas possui um baixo fator de porosidade, e como consequência, espera-se que retenha um maior número de partículas sólidas diante de um processo de filtração.

3 Conclusões

Foi possível verificar a eficácia da utilização da filtração à vácuo para determinação dos parâmetros a serem reproduzidos em módulo filtro prensa, uma vez que não se faz necessária a utilização de 20 L de solução para a determinação dos parâmetros K_c e $\frac{1}{q_0}$, parâmetros necessários pra se conhecer a resistividade da torta e a resistência do meio filtrante. Esses parâmetros foram calculados e foi possível ajustar o tempo de filtração de acordo com a área estipulada (quantidade de placas).

Com isso, constatou-se que a área do meio filtrante se comporta de maneira exponencial em relação ao tempo, visto que, à medida que se adicionam mais placas ao filtro prensa, o tempo de filtração será menor, mas tendendo a um valor constante estável.

O experimento no filtro prensa apresentou tempo de filtração como esperado, com uma diferença pequena entre o tempo teórico e o tempo experimental. Dessa forma, considerou-se efetiva a utilização do pré-dimensionamento dos experimentos em escala menor.

4 Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio do LMMA patrocinado pela FAPEMIG (CEX-112-10), SECTES/MG e RQ-MG (FAPEMIG: CEX-RED-00010-14), à PROAE/UFVJM pelo apoio ao projeto número 2018.d.2.20.0240, ao GEPAEQ-Grupo de Estudos e Pesquisas Aplicadas à Engenharia Química.

5 Referências

BASTOS, A. R.; AFONSO, J. C. Separação sólido-líquido: centrífugas e papéis de filtro. **Química Nova**, v. 38, n. 5, p. 749–756, 2015.

GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. **Processos e operações unitárias da indústria Química**. Ciência Moderna Ltda, Rio de Janeiro, 2011.

JOSÉ, E.; LOPES, D. S.; MACHADO, R. P.; GONZALES, F.; MUNDIM, L.; RODRIGUES, A. Padronização do corante natural extraído à partir do urucum (*Bixa orellana*) e sua aplicação na histologia. **Collection Health**, v. 11, n. 4, p. 1–12, 2019.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations Of Chemical Engineering**. 5. Ed, p. 1-1154, 1993.

OTENIO, M. H.; PANCHONI, L. C.; CORREIA, G.; RAVANHANI, C. Avaliação em escala laboratorial da utilização do processo eletrolítico no tratamento de águas. **Química Nova**, v. 31, n. 3, p. 508–513, 2008.

SILVA, M. R.; FREITAS, R. F.; SILVEIRA, R. B.; **Filtração**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul ed. Bento Gonçalves, SC. 2012. 29 p.

SILVA, G. D. de F.; DUARTE, L. P. **Técnicas Básicas de Laboratório de Química II**. Universidade Federação de Minas Gerais ed., Belo Horizonte, MG. 2009. 96 p.

SOUSA, V. M.; COSTA, L.; FOGAÇA, S. Perfil Físico-Químico de Cervejas Artesanais e Industriais e Adequação dos Rótulos Quanto à sua Graduação Alcoólica. **Multidisciplinar e de Psicologia**, v. 13, p. 440–447, 2019.

UENOJO, M.; PASTORE, G. M. Pectinases: Aplicações industriais e perspectivas. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 388–394, 2007.