

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE ÁGUA EM MEMBRANAS CERÂMICAS USADAS NA MICROFILTRAÇÃO

Hariel Udi Santana Mendes ^[1]; Acto de Lima Cunha ^[2]; João Paulo Lobo dos Santos ^[3]; Severino Rodrigues de Farias Neto ^[4]; Iliana de Oliveira Guimarães ^[5].

^[1] Núcleo de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe; harieludi@hotmail.com

^[2] Núcleo de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe; actolimacunha@yahoo.com.br

^[3] Núcleo de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de Sergipe; jplobo2011@gmail.com

^[4] Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande; fariasn@deq.ufcg.edu.br

^[5] Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande; ilianaguimaraes@hotmail.com

Resumo

No presente trabalho foi realizado um estudo experimental e numérico do processo de permeação por membranas cerâmicas. Adotou-se, um sistema em que apenas a água escoava através da membrana visando obter um modelo matemático capaz de prever o comportamento da permeação da água na membrana observado experimentalmente. Os experimentos foram realizados empregando duas membranas cerâmicas de microfiltração e, com base nos resultados experimentais, foi possível propor um modelo matemático inicial que permitiu avaliar a operação de sistemas de microfiltração. Na avaliação numérica foi considerado constante o valor da porosidade da membrana cerâmica e a permeabilidade como uma função da resistência do meio poroso ao escoamento. O estudo numérico considerando um domínio computacional tridimensional foi realizado com auxílio do pacote comercial ANSYS CFX 12 utilizando as equações completas do momento linear e a equação da continuidade. Foi adotado o modelo de turbulência RNG k- ϵ . Foram avaliados os resultados dos campos de pressão e velocidade. Foi igualmente realizada uma comparação dos dados numéricos do fluxo transmembrana com os dados experimentais. Os resultados numéricos mostraram que o modelo matemático utilizado pode se ajustar aos dados experimentais; o aumento da resistência do meio poroso devido à compactação mostrou-se superior a 1000%; os perfis de pressão e velocidade são apresentados e analisados.

Palavras-chave: Filtração; membrana cerâmica; simulação numérica.

1. INTRODUÇÃO

As membranas cerâmicas são largamente utilizadas em métodos de tratamento de água produzida (separação água-óleo) e efluentes na indústria do petróleo [1,2,3]. Vários estudos têm corroborado que o uso de membranas cerâmicas proporcionam vantagens quando comparado às poliméricas, sobretudo no que se refere à estabilidade biológica, inércia química, e resistência a

elevadas pressões e temperaturas. Outro fator relevante é o benefício que as membranas cerâmicas apresentam em comparação com processos tradicionais de separação (destilação, utilização de hidrociclones e centrifugação), como reduzido gasto de energia, maior vida útil, necessita de pouco espaço físico e possui maior simplicidade de limpeza [4]. O tratamento de efluentes via membrana cerâmica é uma técnica no qual a

membrana atua como uma barreira que realiza uma seleção entre duas fases durante a filtração [5]. O crescente aumento da poluição das águas é uma preocupação mundial, visto que esta é um recurso cada vez mais escasso e indispensável.

Assim, novas tecnologias vêm surgindo visando o tratamento de resíduos para que possam ser descartados ou serem reaproveitados. Uma tecnologia muito comum envolvendo membranas é a microfiltração (MF), é o processo que se parece com a filtração convencional. Emprega membranas porosas com tamanho de poros compreendidos entre 0,1 e 10 μm , sendo, portanto, indicada para a retenção de materiais em suspensão e emulsões. A microfiltração é um processo cuja força motriz é um gradiente de pressão, e o fluxo permeado é diretamente proporcional ao próprio gradiente de pressão [6]. Quando um solvente puro é circulado pela membrana, sem interação com o material da membrana, o fluxo permeado, para uma pressão de operação conhecida, não deve variar com o tempo, uma vez que, o fluxo permeado torna-se independente do tempo sendo um indicativo da estabilidade física da membrana, da pureza do solvente e de sua reduzida interação com o material da membrana. Quando ocorre uma queda do fluxo de solvente com o tempo, provavelmente é devido a um adensamento da microestrutura da membrana, fato conhecido como compactação, que depende do valor da

pressão aplicada durante a filtração e das características estruturais da membrana porosa.

A avaliação das características de compactação das membranas é de fundamental importância, a fim de evitar erros de interpretação nos resultados dos experimentos, pois a compactação da membrana pode ser confundida com outros fenômenos responsáveis pela diminuição do fluxo permeado, tais como a polarização por concentração e/ou a incrustações [7].

Segundo Persson *et al.* [8] o fenômeno de compactação de membranas porosas com auxílio da lei de Darcy adaptada para membranas (modelo das resistências), e mostraram que o fluxo de permeado, J , pode ser definido por:

$$J = \frac{A \cdot \Delta p}{\mu \cdot Rm} \quad (1)$$

onde J é fluxo permeado, A é a área de permeação, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, Rm é a resistência da membrana e Δp é queda de pressão transmembrana.

Aplicando a teoria de filtração [9], a pressão constante, pode-se mostrar que a resistência da membrana pode ser calculada por:

$$J = \frac{V - V_s}{t - t_s} = \frac{A \cdot \Delta p}{\mu \cdot Rm} \quad (2)$$

$$\frac{t - t_s}{V - V_s} = \frac{\mu \cdot Rm}{A \cdot \Delta p} \quad (3)$$

onde t é o tempo inicial, t_s é o tempo final, V_s é o volume de permeado no tempo inicial e V é o volume de permeado no tempo final.

E a permeabilidade do leito poroso, k , é dada por:

$$k = \frac{E}{Rm} \quad (4)$$

onde E é a espessura do leito poroso.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar numericamente o comportamento do fluxo de permeado (água) em função da variação da resistência e da permeabilidade da membrana, provocada pela compactação do meio poroso, e analisar os perfis de pressão e velocidade do processo.

2. METODOLOGIA

2.1 Experimento

Na Figura 1 está representado o esquema do aparato experimental de fluxo tangencial utilizado e que corresponde ao mesmo sistema utilizado por Guimarães et. al. [10] para medir a permeação da água destilada através da membrana cerâmica. Este sistema consiste de um reservatório de alimentação, uma bomba para circular o líquido e que exerce uma pressão de trabalho de 1 kgf/cm^2 e o reator onde foi inserida a membrana cerâmica tubular, que previamente foi impermeabilizada nas suas extremidades.

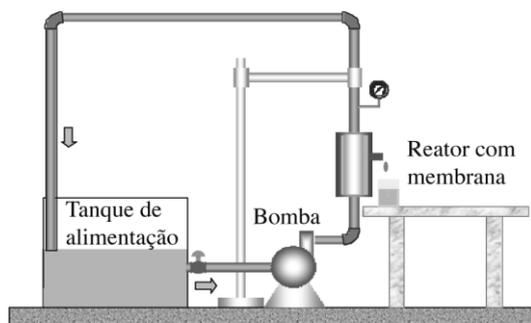


Figura 1: Ilustração do sistema utilizado para medir o fluxo tangencial na membrana tubular [10].

As membranas cerâmicas utilizadas são constituídas de um resíduo de alumina (70% em massa) e argila bentonítica (30% em massa). A porosidade (33,96%), a permeabilidade ($2,41 \text{ mDarcy}$) e o tamanho de poros ($0,92 \mu\text{m}$) das membranas foram obtidos pela porosimetria de mercúrio. Foram submetidas ao teste de fluxo duas amostras de membrana cerâmica, chamadas de M1 e M2, cujas dimensões encontram-se na Tabela 1. As membranas foram desenvolvidas no Laboratório de Reciclagem da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) por [11].

Tabela 1: Dimensões das membranas cerâmicas utilizadas (mm)

	M1	M2
Comprimento, L	56,15	59,83
Diâmetro Externo, D_e	10,48	10,47
Diâmetro Interno, D_i	7,21	7,19

O desenvolvimento dos experimentos foi realizado por [11] de modo que fossem avaliados os dados obtidos nos experimentos de ambas as membranas em relação à produção de permeado. Esses dados experimentais foram utilizados para calcular o comportamento da resistência do meio poroso

e da permeabilidade com o tempo de permeação a partir das Equações (3) e (4).

2.2 Geometria e Malha

O domínio do estudo numérico é constituído de uma membrana cerâmica

tubular; que foram geradas de acordo com as dimensões das membranas utilizadas no experimento (Tabela 1), as fronteiras da membrana foram nomeadas como mostrado na Figura 2.

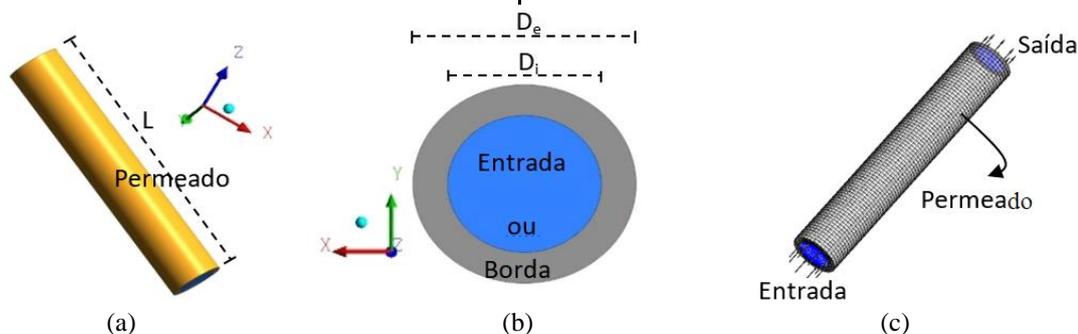


Figura 2 - Representação do domínio de estudo: a) membrana cerâmica, b) detalhe da seção de entrada ou saída da membrana tubular e c) malha numérica.

Diferentes malhas representativas do domínio de estudo (Figura 3) foram confeccionadas com o auxílio do ICFM-CFD 12.0, que após diferentes refinamentos resultaram em duas malhas estruturadas, M1 e M2, com 208.000 e 201.229 elementos hexaédricos, respectivamente. As simulações foram desenvolvidas em um computador Quad Core 2,66 GHz, 8 Gb de memória RAM e 1 Tb de memória física (HD), admitiu-se um critério de convergência residual (RMS) inferior a 10^{-6} e um passo de tempo de 0,1s. As simulações foram realizadas com a membrana na posição vertical, mesmo posicionamento usado durante os experimentos.

2.3 Modelagem matemática

As simulações foram realizadas levando em consideração que: o escoamento era isotérmico (298 K); o efeito da gravidade na

direção z. Para o regime de escoamento turbulento no interior do tubo da membrana, utilizou-se o modelo de turbulência RNG $\kappa - \varepsilon$.

Assim, o modelo matemático usado para descrever o escoamento no interior da região tubular da membrana corresponde às equações de conservação da massa e quantidade de movimento de Navier-Stokes, Equações (5) e (6), respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{U})^T) + S_M \quad (6)$$

O modelo matemático usado para descrever o escoamento no meio poroso corresponde a uma generalização das equações de conservação da massa e de momento (Equações 7 e 8).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{K} \cdot \vec{U}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi\vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho\phi(\mathbf{K}\vec{U}) \otimes \vec{U}] = -\nabla \cdot [\mu_e \mathbf{K}(\nabla\vec{U} + \nabla\vec{U}^T)] + S_i^M \quad (8)$$

onde \mathbf{K} é o tensor porosidade de área, \vec{U} é o vetor velocidade, ρ é a massa específica do fluido e ϕ é a porosidade.

A fonte de quantidade de movimento linear é representada pela Equação (9):

$$\vec{S}_i^M = -C^{R1}\vec{U}_i - C^{R2}|\vec{U}|\vec{U}_i + S_i^{spec} \quad (9)$$

onde C^{R1} coeficiente linear de resistência e C^{R2} coeficiente de resistência quadrático, \vec{U}_i é o vetor velocidade superficial, S_i^M é fonte de quantidade de movimento linear e S_i^{spec} representa outras fontes de quantidade de movimento e μ_e é a viscosidade efetiva.

Quando a resistência do meio poroso ao fluxo é elevada, a Equação (8) pode ser reduzida a lei de Darcy, e passa a ser generalizada pela Equação (10):

$$-\frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\mu}{k}\vec{U}_i + K_{loss}\frac{\rho}{2}|\vec{U}|\vec{U}_i \quad (10)$$

onde K_{loss} é o coeficiente empírico de perda, k é a permeabilidade absoluta do meio poroso e p é a pressão.

Para o coeficiente empírico de perda K_{loss} , representa a resistência da membrana no modelo matemático, foi definida uma equação empírica empregando a teoria da filtração [9], considerando a pressão constante e apenas água escoava no meio poroso, dada por:

$$K_{loss} = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}}e^{-2\frac{(t-t_c)^2}{w^2}} \quad (11)$$

Os valores de y_0 , A , w e t_c foram obtidos no ajuste e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros obtidos no ajuste dos dados experimentais.

Membrana	y_0 (m ⁻¹)	A (m ⁻¹ s)	w (s)	t_c (s)
M1	-3,909 e ¹⁰	7,383 e ¹⁴	7526,233	4325,00
M2	-2,021 e ¹⁰	3,588 e ¹⁴	5898,055	3730,74

O comportamento da permeabilidade do meio poroso devido à variação da resistência da membrana é dado por:

$$k = \frac{E}{K_{loss}} \quad (12)$$

As Equações (11) e (12) foram implementadas no simulador com o intuito de prever o fluxo de permeado, assim como observado nos experimentos realizados por [11].

2.4 Condições iniciais e de contorno

As Equações (7) e (8) que descrevem o fenômeno estudado necessitam de condições de contorno sobre as fronteiras (Figura 2) do domínio de estudo, a fim de complementar o modelo matemático, as quais foram definidas a partir do experimento realizado e estão listadas na Tabela 3.

Tabela 3: Condições de contorno.

Fronteiras	Pressão (kPa)	\vec{U} (m/s)
Entrada	202,650	-
Saída	101,325	-
Permeado	101,325	-
Bordas	-	0

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 estão os comportamentos da resistência do meio poroso obtido

experimentalmente e analiticamente. A Figura 3.a mostra o aumento da resistência do meio poroso devido ao processo de compactação provocado pela pressão aplicada ao sistema. Nota-se que para a Membrana M1, a variação da resistência em função do tempo, uma vez considerando-se um tempo de operação de 65 minutos, foi de cerca de $2,455 \times 10^9$ (m^{-1}) no primeiro minuto de permeação para $2,82 \times 10^{10}$ (m^{-1}) após 65 minutos, e para a membrana M2 uma variação de $2,48 \times 10^9$ (m^{-1}) para

$3,768 \times 10^{10}$ (m^{-1}), ou seja, um aumento superior a 1000% em relação ao seu valor inicial, para ambos os casos. O processo operou com uma pressão transmembrânica (TMP) próxima a 0,73 bar, valor compatível com o esperado para sistemas de MF. O aumento das resistências da membrana devido à compactação do meio poroso ocasiona à queda da permeabilidade a água com o tempo, esse comportamento pode ser observado na Figura 3.b.

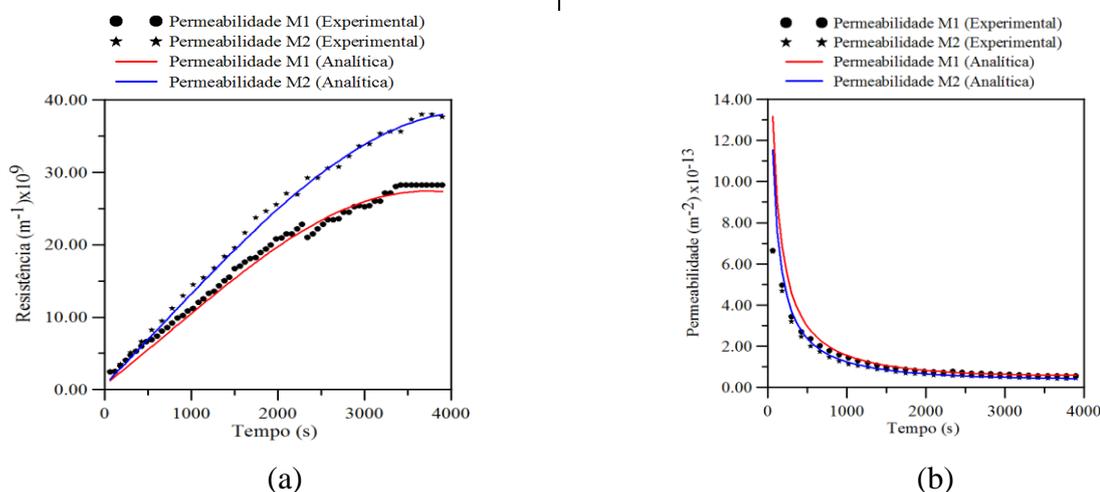


Figura 3: Evolução da resistência a) e Permeabilidade b) do meio poroso para o período de 65 minutos, experimental e analítica.

As curvas representadas na Figura 4 representam o comportamento do fluxo permeado com o tempo para todos os casos estudados. A redução do fluxo de permeado com o tempo pode estar associada à compactação da membrana, provocando uma maior resistência ao fluxo de massa. Pode-se observar que os resultados para as membranas M1 e M2, no início do experimento, apresentam um fluxo permeado em torno de 776 ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) e $727,6$ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$),

respectivamente. Quando as membranas estão compactadas percebe-se que o fluxo de permeado de água atinge um valor constante para as duas membranas M1 e M2. Todavia, observou-se uma discrepância nos valores experimentais e numéricos, este fato pode ser atribuído ao modelo empírico que está sendo utilizado, que, mesmo tendo um bom ajuste, como ilustrado na Figura 3.a, possui erros de aproximação. O controle do passe de tempo e número de elementos da malha são outros

fatores que levam a perda de informações e a propagação de erros. Estes fatores sugerem a busca de outra correlação mais precisa e um estudo mais criterioso do ajuste numérico.

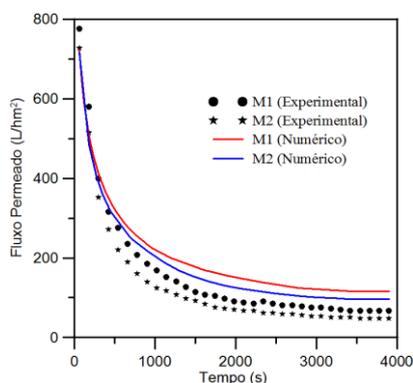


Figura 4: Fluxo de permeado em função do tempo de operação da unidade de microfiltração, experimental e numérico.

Nas Figuras (5) e (6) estão representados os campos de pressão e de velocidade sobre os planos XZ e YZ, respectivamente, para as membranas M1 e M2. De uma maneira geral, estas figuras mostram um comportamento similar nos dois planos analisados, o que permite constatar uma tendência de simetria do escoamento em relação à componente tangencial, semelhante ao observado em tubos. Aparentemente, o fluxo de fluido através da membrana não chega a interferir de forma significativa no escoamento ao longo do tubo.

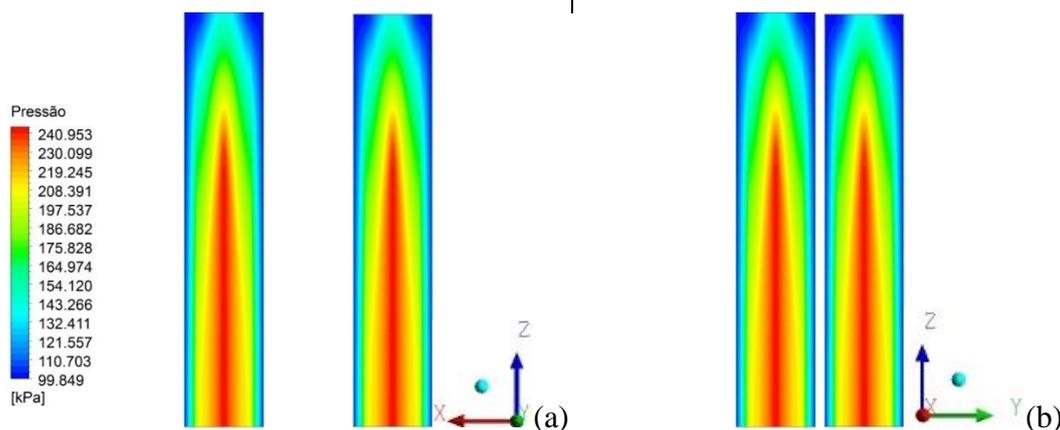


Figura 5: Campo de pressão (Pa) sobre os planos XZ e YZ, para as membranas: (a) M1 e (b) M2

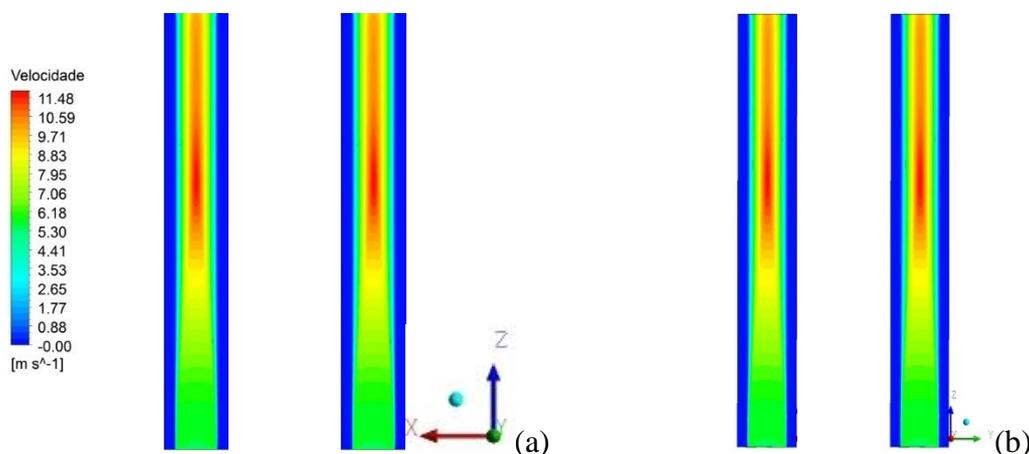


Figura 6: Campo de velocidade da água (m/s) sobre os planos XZ e YZ, para as membranas: (a) M1 e (b) M2

4. CONCLUSÕES

O aumento da resistência do meio poroso mostrou-se superior a 1000%, mostrando a importância de se levar consideração o efeito da compactação do material cerâmico. Os resultados numéricos obtidos com as membranas cerâmicas, M1 e M2, mostraram que o modelo matemático utilizado pode se ajustar aos dados experimentais com a incorporação das resistências responsáveis pela redução do fluxo permeado durante o processo de separação com membranas. Os perfis de pressão e velocidade, tanto para membrana M1 quanto para membrana M2, ilustram uma tendência de simetria do escoamento em relação à componente tangencial, semelhante ao observado em tubos.

5. REFERÊNCIAS

- [1] CUNHA, A. de L. **Tratamento de efluentes da indústria de petróleo via membranas cerâmicas - modelagem e simulação**. 2014. 201f. (Tese de Doutorado em Engenharia de Processos), Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2014.
- [2] MOTTA, A.R.P. *et al.* **Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: Revisão**. Eng Sanit Ambient, v. 18 n.1. Jan/Mar 2013. p. 15-26.
- [3] WESCHENFELDER, S.E.; BORGES, C.P.; CAMPOS, J.C. **Avaliação de membranas para o tratamento de água proveniente do processo de extração de petróleo**. Rev. Ambient. Água, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 376-385, June 2015.
- [4] Boddeker, K.W. **Commentary: Tracing membrane science**, J. Membrane Sci. 1995 Mar; 100(1): 65-68.
- [5] Mulder, M. **Basic principles of membrane technology**, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1996, 564 p.
- [6] Habert A.C.; Borges C.P.; Nobrega, R. **Processos de Separação por Membranas**. Rio de Janeiro: Ed.E-papers; 2006, 181 p.
- [7] Ripperger, S.; Almann, J. **Crossflow microfiltration: state of the art**. Separation Purification Technology. 2002 Jan; 26: 19-31.
- [8] Persson, K.M.; Gekas, V.; Tragardh, G. **Study of membrane compaction and its influence on ultrafiltration water permeability**. J. of Membr. Sci. 1995 Apr; 100(2): 155-162.
- [9] Svarovsky, L. **Solid-Liquid Separation**, 4th edition, Butterworth-Heinemann; 2000, 568 p.
- [10] Silva, F.A.; Lira, H.L. **Preparação e caracterização de membranas cerâmicas de cordierita**. Cerâmica. 2006 Oct; 52(324):276-282.
- [11] Guimarães, I.O. *et al.* **Development and Characterization of Tubular Ceramic Membranes Produced From an Alumina Residue**, 9th International Alumina Quality Workshop, Perth, Australia; 2012, p. 282-286.