

Estudo Morfológico das Membranas de Carbetto de Silício de Fibra Oca Antes e Após Sinterização a Elevada Temperatura

S. S. L. Oliveira¹, R. S. B. Ferreira¹, B. A. Araújo¹, S. S. L. Oliveira¹, H. L. Lira¹, E. M. Araújo^{1*}

¹ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Campina Grande – PB, CEP 58429-900

(Recebido em 15/05/2017; revisado em 24/05/2017; aceito em 31/05/2017)
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

A utilização de membranas em processos de separação tem sido considerada uma tecnologia emergente e que apresenta inúmeras vantagens, entre elas o processo é realizado de forma contínua, com baixo consumo de energia e pode ser facilmente combinado com outros processos de separação. Este trabalho tem como objetivo obter membranas cerâmicas de carbeto de silício e aplicá-las em processo de filtração de efluente aquoso. As membranas foram produzidas em formatos de fibra oca através da técnica de precipitação por imersão em água destilada. As membranas após serem conformadas permaneceram por 24 horas em água destilada, em seguida foram sinterizadas na temperatura de 1500°C. As membranas foram submetidas a caracterizações de termogravimetria (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), porosidade e medidas de fluxo aquoso. A termogravimetria apresentou uma perda de massa de 12,87% relacionada à decomposição da poliétersulfona e formação da membrana cerâmica. As membranas apresentaram estruturas assimétricas, e porosidade em torno de 38%, após sinterização. O fluxo aquoso estabilizado variou de 186 L/h.m² e 559 L/h.m² em pressões de 0,5 bar e 1,0 bar, respectivamente.

Palavras-chave: Membranas cerâmicas, carbeto de silício, fibra oca.

Abstract:

The use of membranes in separation processes has been considered an emerging technology and has many advantages, among them the process is carried out continuously with low energy consumption and can be easily combined with other separation processes. The aim of this work is to obtain silicon carbide ceramic membranes and to apply them in a process of filtration of aqueous effluent. The membranes were produced in hollow fiber formats by the technique of precipitation by immersion in distilled water. The membranes, after being formed, remained for 24 hours in distilled water, and then sintered at 1500 ° C. The membranes were submitted to characterization of thermogravimetry (TG), scanning electron microscopy (SEM), porosity and aqueous flow measurements. Thermogravimetry showed a mass loss of 12.87% related to polyether sulfone decomposition and formation of the ceramic membrane. The membranes presented asymmetrical structures, and porosity close to 38%, after sintering. The stabilized aqueous flow varied of 186 L/h.m² and 559 L/h.m² at pressures of 0.5 bar and 1.0 bar, respectively.

Keywords: Ceramic membranes, silicon carbide, hollow fiber.

1. Introdução

As membranas são barreiras seletivas, permeáveis ou semipermeáveis, que restringem parcial ou totalmente espécies com tamanho característico, possuindo propriedades físico-químicas direcionadas à retenção de um determinado componente da mistura, como por exemplo, espessura da membrana, tamanho de poro, pressão transmembrana, velocidade de fluxo e agentes químicos associados a fenômenos físico-químicos superficiais [1,2].

A principal característica dos processos de separação por membranas (PSM) está relacionada ao fato de a maioria das separações ocorrerem sem a mudança de fase dos componentes, sendo, assim, energeticamente mais vantajosos quando comparados com os processos térmicos convencionais. Adicionalmente, o fato de ser uma tecnologia

limpa (sem a necessidade de uso de aditivos), com baixo consumo de energia, a simplicidade de operação, a mínima geração de resíduos, a possibilidade de combinação com outros processos, os equipamentos compactos e a facilidade de aumento na escala de produção tornam os PSM mais atrativos do que as técnicas clássicas de separação [3,4].

As membranas naturais são conhecidas desde a antiguidade, porém o desenvolvimento e as principais aplicações de processos de separação com membranas sintéticas, em escala de laboratório, tiveram início em 1920. Foi a partir da década de 30 que alguns PSM passaram a ser conhecidos e utilizados em pequena escala. Estes, entretanto, acabaram não se desenvolvendo, na época, em uma escala industrial devido aos baixos fluxos de permeado obtidos, resultantes da elevada espessura das membranas utilizadas. Então, no final da década de 60, os PSM, tais como

*Email: edcleide.araujo@dema.ufcg.edu.br (E. M. Araújo)

microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), e osmose inversa (OI), consolidaram-se como uma alternativa importante em nível industrial [5].

Mais recentemente a sua utilização aconteceu na indústria química, na década de 1970, aliada a outros tipos de processos clássicos de separação como a filtração, absorção, troca iônica e dentre outros processos [5]. Pesquisadores Schneider e Tsutuya [6] afirmam ainda que, inicialmente, o tratamento de membranas tinha por finalidade a dessalinização de água do mar, utilizando-se o sistema com membranas de osmose inversa. Somente a partir dos anos 90 a tecnologia passou a ser utilizada para o tratamento de água e esgoto.

Existem duas classes de membranas, as quais estão separadas de acordo com o tipo de material utilizado na fabricação: as orgânicas e as inorgânicas. As membranas orgânicas são preparadas a partir de materiais poliméricos, tais como a poliamida, polietersulfona, polietileno, polissulfona, celulose e PVDF, enquanto as membranas inorgânicas são preparadas com materiais cerâmicos, vítreos ou metálicos. A escolha do material deve ser em função do tipo de membrana e das características do produto a ser filtrado; por exemplo, potencial hidrogeniônico (pH), tamanho de partículas, produto que se quer obter, custo para produção, eficiência, durabilidade da membrana, facilidade de limpeza da membrana, entre outros [7].

Diante das limitações das membranas poliméricas surgem como alternativa as membranas cerâmicas, despertando o interesse de diversos setores da indústria, já que proporcionam alternativas mais econômicas e com maior controle para o desenvolvimento da tecnologia de separação. Algumas das principais vantagens que as tornam mais competitivas quando comparadas às poliméricas são: alta resistência química frente a ambientes agressivos (ácidos e/ou básicos), resistência a elevadas temperaturas, suportam elevadas pressões, permitem filtração com alta velocidade tangencial (regime de escoamento turbulento), maior vida útil e facilidade de limpeza (podem ser limpas com vapor e esterilizadas), além de possuírem alta hidrofobicidade [8, 9,10].

A técnica de inversão de fase é a mais utilizada para produção de membranas microporosas. Esta técnica caracteriza-se pela desestabilização de uma solução polimérica obtida através da indução do estado de supersaturação na mesma, promovida por alterações, em sua natureza química, composição, temperatura ou pressão. Desta forma, a solução torna-se intrinsecamente instável ou metaestável e tende a se separar em pelo menos duas fases líquidas de composições distintas, uma rica e outra pobre em polímero. No processo de formação de membranas, a fase rica formará a estrutura, enquanto a fase pobre dará origem aos poros [3,11,12].

A inversão de fase pode ser obtida de várias maneiras: precipitação térmica, precipitação por evaporação de solvente, precipitação na presença de vapores ou através de precipitação por imersão, em água ou solvente [11,13].

A solução utilizada pode constituir-se de polímero e solvente ou de polímero, solvente e aditivo, ou ainda polímero, cerâmica e solvente. O filme polimérico pode ser

exposto ao ar ambiente por um determinado período de tempo. Embora tal exposição seja dispensável, dependendo da volatilidade do solvente empregado, esta etapa preliminar pode ser considerada como fator decisivo para obtenção da camada seletiva [11].

O carbeto de silício (SiC) se destaca entre as cerâmicas, ele é considerado o mais importante entre os carbetos. Este material possui um alto potencial como cerâmica avançada devido a sua estrutura química (Figura 1) [14].

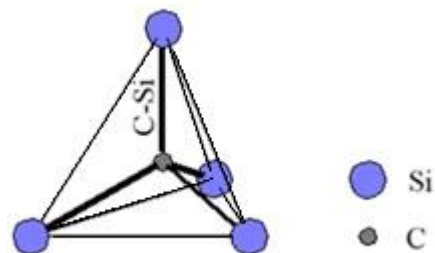


Figura 1. Estrutura química do carbeto de silício [15].

As membranas de carbeto de silício foram limitadas a geometrias plana [16], tubular [17] e multicanal. Estas têm uma proporção relativamente baixa de superfície para volume comparado com as de fibras ocas. Uma relação elevada entre a área de permeação (área superficial da membrana) e o volume do módulo, representa uma melhor utilização do espaço e uma redução no custo do equipamento [5].

Devido à cobrança pelo uso consciente da água aliada à necessidade de preservação do meio ambiente, este presente trabalho tem como objetivo avaliar morfológicamente as membranas cerâmicas de carbeto de silício e aplicá-las em processo de filtração de efluente aquoso.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Carbeto de silício (SiC) fornecido pela Treibacher Schleifmitte com tamanho médio de partícula entre 0,4-0,6 μm e 96,0 % de pureza; Alumina calcinada (Al_2O_3) fornecida pela Treibacher Schleifmittel Brasil; 1-Metil-2-Pirrolidona (NMP) Sigma Aldrich 99,92%; Polietersulfona (PES) adquirida pela Solvay; e o polivinilpirrolidona (PVP) fornecido pela Neon Comercial.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparação das membranas

Para a obtenção das membranas foi preparado uma dispersão contendo a PES (10%) e o solvente NMP (36%), que foram agitados em agitador mecânico por 1 hora com velocidade de 1000 rpm, em seguida, foi adicionado o SiC (47%), a Al_2O_3 (5%) e o PVP (2%), e após a adição a solução permaneceu por mais 30 minutos a 1000 rpm. Após 24 horas, a solução foi colocada no sistema de preparação de fibra oca (Figura 2) e por meio da técnica de precipitação por imersão

em água destilada em uma extrusora foram formadas as membranas com as seguintes condições de processamento (Tabela 1).

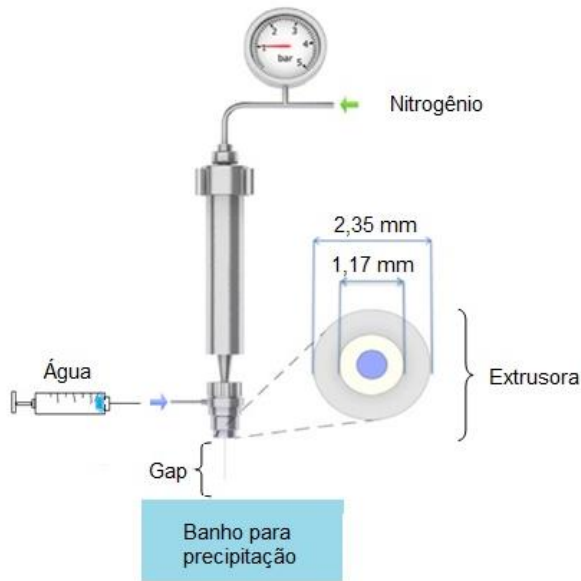


Figura 2 - Representação esquemática do sistema *dry-wet spinning* [18].

A Figura 2 ilustra a representação esquemática do sistema (*dry-wet spinning*) que foi utilizado para a produção das membranas.

Tabela 1. Condições de processamento para a preparação das membranas.

Condição	Valor
Líquido interno	H ₂ O
Banho para precipitação	H ₂ O
Viscosidade da solução	4010 mPa.s
Air gap (distância da extrusora ao banho)	5 cm
Vazão da solução	300 mL/h
Vazão do líquido interno	150 mL/h
Diâmetro externo	2,35 mm
Diâmetro interno	1,17 mm

2.2.2 Sinterização das membranas

As membranas foram sinterizadas em forno elétrico com temperatura máxima de queima de 1500 °C. A Tabela 2 mostra as faixas de temperaturas que foram utilizadas no forno convencional.

Tabela 2. Os parâmetros: temperatura e tempo utilizados para a sinterização das membranas cerâmicas.

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
0-500	250
500	60
500-1500	200
1500	120

2.2.3 Caracterizações

2.2.3.1 Termogravimetria (TG)

A membrana antes de ser submetida à sinterização (fibra oca) foi analisada em um analisador térmico, modelo RB – 3000 – 20, com taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de nitrogênio, usando um cadinho de alumina e faixa de temperatura 0°C até a temperatura máxima de 1000°C, e 5 mg de cada amostra. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande (LCM/UAEMA/UFCG).

2.2.3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As membranas cerâmicas (antes e após sinterização) foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando equipamento VEGA3 Tescan, tensão de 20 kV, instalado no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (DEM/UFCG). Com esta técnica, foi avaliada a seção transversal das membranas obtidas, foram realizadas fotomicrografias da seção transversal (ST), o detalhe da seção transversal próximo à superfície externa (STE) e interna (STI).

2.2.3.3 Porosidade

O teste de porosidade da membrana antes e após a queima foi realizado no laboratório de Desenvolvimento de Membranas da Universidade Federal de Campina Grande e a porosidade obtida pela Equação 1 [19]:

$$P(\%) = \frac{W_w - W_d}{\rho \times A \times L} \times 100 \quad (1)$$

Onde: W_w é a massa da membrana molhada e W_d a massa da membrana seca, em g; a densidade do líquido utilizado, a área e a espessura da amostra são dadas por ρ , A e L , respectivamente.

2.2.3.4 Fluxo aquoso

A análise de fluxo permeado foi realizada com água destilada a 25°C, em um sistema de laboratório de fluxo com escoamento tangencial (Figura 3), utilizando pressões de 0,5 e 1,0 bar com intervalo de coleta do fluxo a cada 3 minutos,

totalizando 48 minutos de ensaio. O ensaio foi realizado na mesma membrana, após a estabilização da primeira pressão. No sistema para coletar o fluxo permeado foi utilizado um reservatório para a água, uma bomba centrífuga e um manômetro, para medir a pressão do fluxo de água no sistema. Já a corrente de alimentação com concentração do soluto C_F é alimentada em escoamento tangencial ao longo da membrana e divide-se em duas correntes, o concentrado ou retido C_R e o permeado C_P .

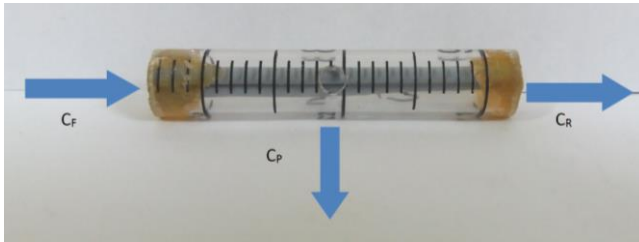


Figura 3. Módulo da membrana com a corrente de alimentação em escoamento tangencial.

O cálculo para determinação do fluxo permeado em função do tempo foi feito utilizando-se a Equação 2:

$$J = \frac{V_{\text{água}}}{t_c \times A} \quad (2)$$

Onde J é o fluxo permeado ($L \cdot h/m^2$), $V_{\text{água}}$ o volume de água (L) permeada durante o intervalo de tempo t_c (h) da coleta de água permeada pela membrana de área A (m^2).

3. Resultados e Discussão

3.1 Termogravimetria (TG)

A Figura 4 apresenta a curva de análise termogravimétrica para a membrana de fibra oca antes da queima e indica a ocorrência de cinco etapas de decomposição: uma referente à perda de água livre entre 23 °C e 102 °C e outra entre 80 °C a 167 °C, correspondente à perda da água adsorvida. A terceira etapa de perda ocorre entre 306 e 440 °C, podendo ser atribuída à decomposição de compostos orgânicos presentes na solução. Na faixa de 450 °C a 630 °C observa-se a maior perda de massa, cerca de 12,87%, que está relacionada a decomposição da polietersulfona. Com base nos resultados obtidos é possível confirmar a saída do polímero nesta faixa de temperatura.

A última etapa é registrada na faixa de temperaturas de 630 °C a 720 °C, onde SO_2 , CO e CO_2 e água são os principais gases emitidos, seguido por uma menor perda de massa com liberação de metano, CO e CO_2 a 760 °C.

Segundo estudo realizado por Lecouvet [20], o PES puro decompõe-se, com a formação de um ombro relativamente pequeno observado no intervalo de temperatura de 400-500°C e antes da fase principal de decomposição que pode ser atribuído à desidroxilação da extremidade da cadeia. Sua

degradação térmica está bem reportada e esta etapa de decomposição, a partir de 500°C, pode ser atribuída a várias reações de degradação envolvendo a exclusão do dióxido de enxofre, a abstração de hidrogênio, a desidratação e as reações de reticulação entre carbonos aromáticos residuais.

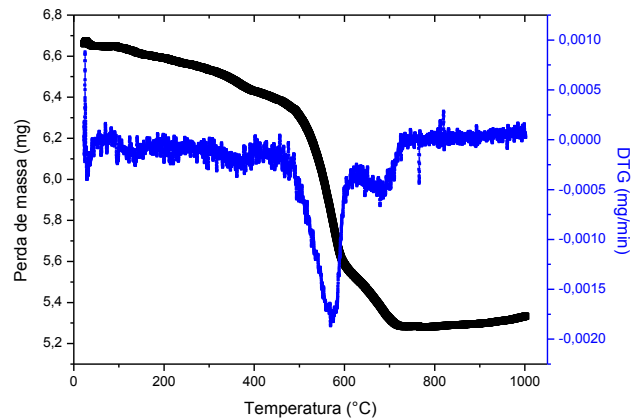


Figura 4. Curva de análise termogravimétrica da fibra oca de PES+carbetto de silício antes da queima.

3.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de MEV foram obtidas para avaliar a microestrutura das membranas cerâmicas antes e após sinterização. Na Figura 5 (a) o aumento de 50 vezes da seção transversal da membrana antes da sinterização, indica que estas são porosas assimétricas com uma camada seletiva na parte interna com macroporos no formato de “fingers” na parte externa Figura 5 (b) e na parte interna Figura 5 (c), esta morfologia também foi observada por outros pesquisadores [21]. Após a queima, Figura 6 (a), é possível observar pouca variação na morfologia das membranas, verificou-se um aumento no tamanho dos poros, devido à queima da matéria orgânica. Para todas as regiões da seção transversal os poros permaneceram internamente interconectados, podendo ser atribuídos à saída do polímero após a queima [22]. Tal morfologia é típica para fibras inorgânicas [23]. Por sua vez as membranas porosas anisotrópicas apresentam um gradiente de porosidade ao longo de sua espessura e combinam a alta seletividade com elevada permeação de uma membrana muito fina. Devido à alta porosidade observada, esta membrana permite fluxos elevados [24].

As imagens de MEV possibilitam classificar as membranas quanto ao tamanho dos diâmetros dos poros para processos de microfiltração, entretanto, não permitem estimar com precisão o tamanho dos mesmos. Nota-se mediante as imagens, que foi possível observar a diferença na morfologia das membranas antes e após a queima, com uma maior porosidade depois de sinterizadas, podendo apresentar maior fluxo permeado.

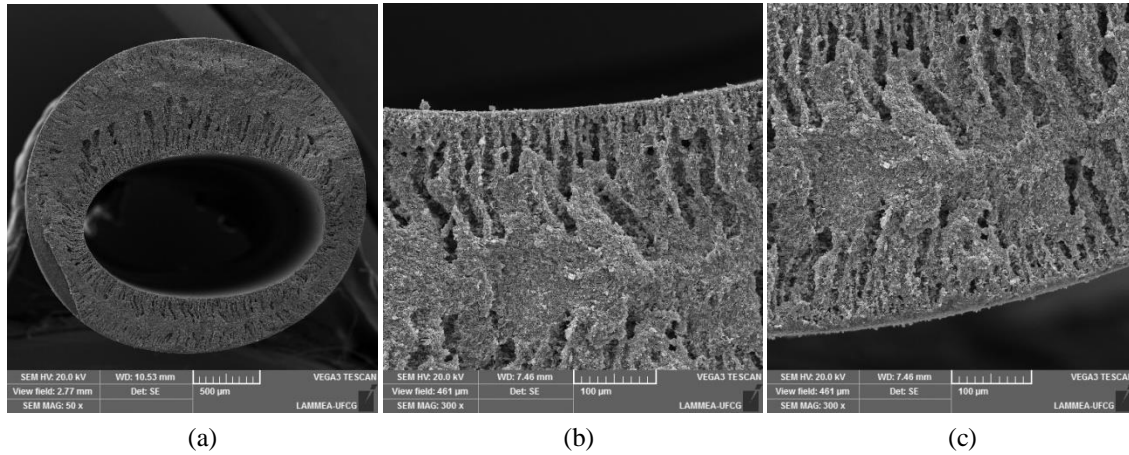


Figura 5. Micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura da fibra oca antes da queima obtidos em diferentes aumentos para a seção transversal (a = 50X), parte externa da seção transversal (b = 300X) e parte interna da seção transversal (c = 300X).

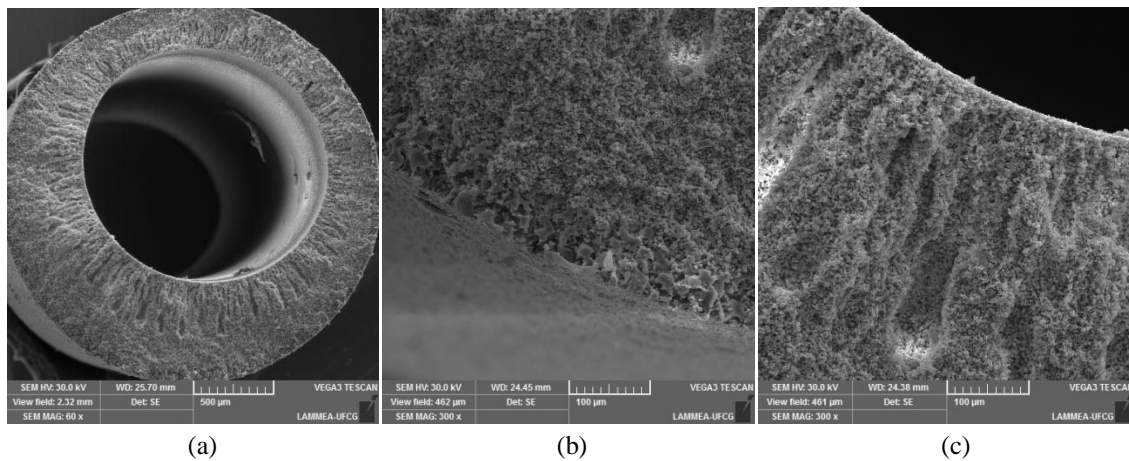


Figura 6. Micrografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura da membrana cerâmica após a queima obtidos em diferentes aumentos para a seção transversal (a = 50X), parte externa da seção transversal (b = 300X) e parte interna da seção transversal (c = 300X).

3.3 Porosidade

A porosidade das membranas de carbetto de silício (Figura 7) aumentou de 17,12% para 38,51% após a sinterização, evidenciando a saída da matéria orgânica para a formação de novos poros. Portanto, tratando da porosidade, quanto mais porosa a membrana, menor será a resistência ao fluxo que passa através da membrana. Uma maior porosidade superficial pode estar relacionada com um maior número de poros ou com um aumento em seus diâmetros médios. Dentre algumas avaliações no que diz respeito a poro e porosidade de membranas, Nandi [25] pesquisou o uso de compósitos cerâmicos para aplicações de membranas para microfiltração. Os autores observaram que o tamanho médio dos poros da membrana aumentou quando a temperatura de sinterização foi elevada de 850 para 1500°C.

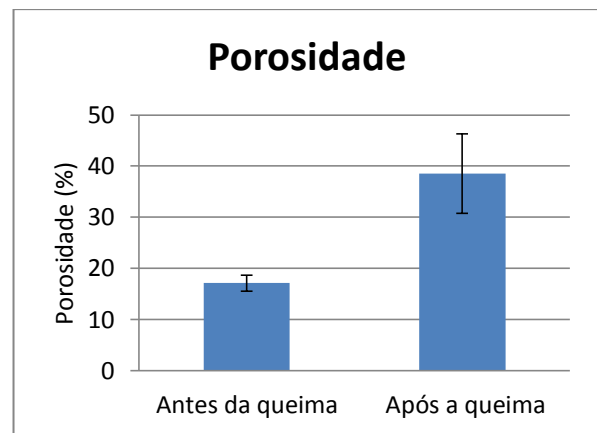


Figura 7. Porosidade das membranas antes da queima (fibra oca) e após a queima a temperatura de 1500°C.

3.4 Fluxo aquoso

Para as membranas em estudo o fluxo de permeado de água dessalinizada tornou-se constante a partir dos 23 e 27 minutos, respectivamente para as pressões de 0,5 e 1,0 bar. O comportamento do fluxo de permeado no início do ensaio apresentou-se elevado, decrescendo ao longo do período de ensaio. Esta diminuição pode ser atribuída, segundo Silva [26], a hidratação das membranas com a água utilizada no ensaio.

De maneira geral, a permeabilidade hidráulica está associada à característica intrínseca das membranas [27], decorrente da técnica utilizada na preparação das mesmas (inversão de fases) e da sua composição.

Após a estabilização do fluxo, neste ponto diz-se que o sistema atingiu o "estado estável", onde o fluxo de água dessalinizada é tomado como referência para membrana. Comparando as curvas da Figura 8, percebe-se que o maior fluxo foi alcançado quando a membrana foi submetida à pressão de 1,0 bar com o valor de 559 L/h.m².

Esses resultados mostram a eficiência da membrana anisotrópica produzida na presente pesquisa onde sua função entre outras é de aumentar o fluxo permeado devido à morfologia obtida na produção da mesma, em relação a outros tipos de membranas cerâmicas encontradas na literatura [7,21].

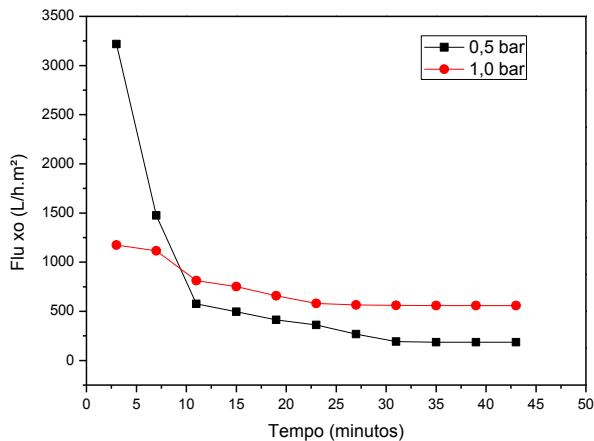


Figura 8. Fluxo permeado com água destilada pela membrana de carbetto de silício nas pressões de 0,5 e 1,0 bar.

Conclusões

A membrana de carbetto de silício foi reproduzida com êxito nas condições avaliadas quando confeccionada na geometria de fibra oca. Com base na análise termogravimétrica verificou-se a saída do polímero para a formação da membrana cerâmica porosa, contribuindo para o aumento da porosidade desta. Para todas as regiões da seção transversal da membrana os poros permaneceram internamente interconectados, e com formatos irregulares. O aumento da pressão de 0,5 para 1,0 bar influenciou significativamente no valor de fluxo aquoso, que variou de 186 L/h.m² e 559 L/h.m², respectivamente.

Agradecimentos

À CAPES pelo suporte financeiro, ao CNPQ, a UFCCG, ao Laboratório de Desenvolvimento de Membranas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCCG), pelo uso de suas instalações e apoio à pesquisa.

Referências

- [1] Basile, B., Cassano, A., Rastogi, N. K. *Advances in Membrane Technologies for Water Treatment: Materials, Process and Applications*. Elsevier Science Publishers: 2015.
- [2] Trevisoli, A. M. S. *Estudo experimental da microfiltração tangencial com membrana cerâmica aplicada na clarificação da vinhaça* [Tese de doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2010.
- [3] Carvalho, R. B., Borges, C. P., Nóbrega, R. *Formação de membranas planas celulósicas por Espalhamento Duplo para os Processos de Nanofiltração e Osmose Inversa*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 11, 65-75, 2001.
- [4] Dahm, K., Hanus, D., Semmens, M. *Membrane technology: an innovative alternative in wastewater treatment*. Minnesota: Water Environment Research Foundation: 2000.
- [5] Habert, A. C., Borges, C. P., Nóbrega, R. *Processo de Separação com Membranas*. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda: 2006.
- [6] Schneider, R. P., Tsutiya, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso*. São Paulo: Associação Brasileira De Engenharia Sanitária: 2001.
- [7] Silva, M. C., Freitas, N. L., Lira, H. L. *Confeção de membranas cerâmicas assimétricas em diferentes geometrias: avaliação da morfologia*. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 10 (2), 95-101, 2015.
- [8] Rautenbach, R., Albrecht, R. *Membrane Processes*. New York: John Wiley & Sons: 1989.
- [9] Scott, K. *Handbook of Industrial Membranes*. Oxford: Elsevier Science Publishers: 1995.
- [10] Cheryan, M. *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook*. Pennsylvania: Technomic Publishing Company: 1998.
- [11] Pucca, P. T. P. *Produção e caracterização de membranas de microfiltração e ultrafiltração pelo método de inversão de fases, utilizando polisulfona como matéria-prima* (Dissertação de Mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo; 2010.
- [12] Mulder, M. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd ed. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 1991.
- [13] Andrade, L. H., Mendes, F. D. S., Espíndola, J. C., Herculano, M. A., Amaral, M. C. S., Lange, L. C.,

- Machado, M. Nanofiltration as a post-treatment to membrane bioreactor effluent for dairy wastewater reuse. *Procedia Engineering*, 44, 1956-1960, 2012.
- [14] Hozer, L., Lee, J. R., Chiang, Y. M. Reaction-infiltrated net shape SiC composites. *Materials Science Engineering*, 195, 131-143, 1995.
- [15] SBQ. Sociedade Brasileira de Química. 2016. Disponível em: < <http://www.s bq.org.br> >.
- [16] Lin, P., Tsai, D. Preparation and analysis of a silicon carbide composite membrane. *Journal of the American Ceramic Society*, 72, 365-372, 1997.
- [17] Facciotti, M., Boffa, V., Magnacca, G., Jorgensen, L. B., Kristensen, P. K., Farsi, A., König, K., Christensen, M. L., Yue, Y. Deposition of thin ultra filtration membranes on commercial SiC microfiltration tubes. *Ceramics International*, 40, 3277-3285, 2014.
- [18] Luiten, M. W. J., Raaijmakers, M. J. T., Winnubst, L., Bor, T. C., Wessling, M., Nijmeijer, A., Benes, N. E. Porous stainless steel hollow fiber membranes via dry-wet spinning. *Journal of Membrane Science*, 370, 124-130, 2011.
- [19] Yuxin, M., Fengmei, S., Jun, M., Miaonan, W., Jun, Z., Congjie, G. Effect of PEG additive on the morphology and performance of polysulfone ultrafiltration membranes. *Desalination*, 272, 51-58, 2011.
- [20] Lecouvet, B., Horion, J., D'Haese, C., Bailly, C., Nysten, B., Elastic modulus of halloysite nanotubes, *Nanotechnolog*, 24, 1-8, 2013.
- [21] De Wit, P., Kappert, E. J., Lohaus, T., Wessling, M., Nijmeijer, A., Benes, N. E. Highly permeable and mechanically robust silicon carbide hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 475, 480-487, 2015.
- [22] Leite, A. M. D., Maia, L. F., Paz, R. A., Araújo, E. M., Lira, H. L. Thermal properties from membrane of polyamide 6/montmorillonite clay nanocomposites obtained by immersion precipitation method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 97 (2), 577-580, 2009.
- [23] Kingsbury, B., Li, K. A morphological study of ceramic hollow fiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 328, 134-140, 2009.
- [24] Parkhuthik, V. P., Shershulsky, V. I. J. Theoretical modelling of porous oxide growth on aluminum. *Journal of physics D: Applied Physics*, v. 25, n. 1, p. 1258-1263, 1992.
- [25] Nandi, B. K., Uppaluri, R., Purkait, M. K. Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for microfiltration applications. *Applied Clay Science*, 42, 102-110, 2008.
- [26] Silva, M. C., Lira, D. S., Freitas, N. L., Lira, H. L. Membranas cerâmicas assimétricas tubulares: influência do tempo de deposição da camada filtrante na morfologia das membranas. *Revista Matéria*, 20 (2), 335-343, 2015.
- [27] Mulder, M. H. V. Chapter 2 Polarization phenomena and membrane fouling. In: Noble, R. D., Stern, S. A. *Membrane Science and Technology*. Elsevier Science; 1995. p. 45-84.