



Caracterização morfológica e parâmetros funcionais de membrana cerâmica multitubular

Morphological characterization and functional parameters of multi-channel ceramic membrane

Márcia Zanini ¹

Marlova Pagnoncelli ²

Camila Baldasso ³

Resumo: O desempenho de um processo de microfiltração está diretamente relacionado com a escolha adequada da membrana a ser utilizada. A caracterização da membrana possibilita o conhecimento necessário para sua aplicação a nível industrial. Além disso, prevê a forma de utilização ideal no processo de microfiltração, indica preliminarmente o comportamento da membrana em relação à solução da alimentação possibilitando a interpretação de quais partículas serão retidas e quais serão permeáveis. Neste trabalho foram avaliadas as características de natureza funcional e morfológica de uma membrana cerâmica multicanaís de microfiltração. A membrana, caracterizada por microscopia eletrônica por varredura (MEV), apresentou três estruturas com tamanhos diferentes de partículas. A permeabilidade hidráulica mostrou forte relação com o fluxo de permeado de água destilada em diferentes pressões. Conforme aumenta a pressão, o fluxo de permeado também aumenta, sendo que a representação gráfica mostra uma função linear. No ensaio de retenção percebe-se que quanto maior o tamanho molecular das partículas na solução menor o fluxo, e quanto maior a pressão transmembrana aplicada maior o fluxo.

Palavras-chave: Membrana; cerâmica; caracterização morfológica e funcional.

¹ UCS – Universidade de Caxias do Sul

² UCS – Universidade de Caxias do Sul

³ UCS – Universidade de Caxias do Sul

Abstract: The performance of a microfiltration process is directly related to the proper choice of the membrane to be used. The membrane characterization provides the necessary knowledge to its application at an industrial level. Furthermore, it provides the ideal way to use the membrane in microfiltration process, preliminarily indicates the membrane behavior in relation to the feed solution allowing the interpretation of which particles are retained and which particles are permeable. In this study were evaluated the characteristics of morphological and functional nature of a microfiltration multichannel ceramic membrane. The membrane characterized by scanning electron microscopy (SEM), presented three structures with different particle sizes. The hydraulic permeability showed a strong relation to the permeate flux of distilled water at different pressures. According to the pressure increasing, the permeate flux also increases, which is demonstrated as a linear function. The retention test showed that larger the particle size, lower will be the flux rate, and higher the transmembrane pressure applied, higher the permeate flux.

Keywords: Membrane; ceramic; morphological and functional characterization.

1. Introdução

O processo de filtração é denominado como a separação de um sólido particulado de um fluido, proporcionando que o sólido fique retido em um meio poroso e o fluido passe por esse meio. A membrana é uma barreira seletiva que separa duas fases, restringindo total ou parcialmente a condução de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases. A utilização de membranas como elementos filtrantes possibilitam à diminuição dos custos operacionais, redução no número de etapas do processo, bem como maior qualidade do produto final e diminuição do impacto ambiental, uma vez que este processo não necessita de auxiliares filtrantes como terras diatomáceas e perlitas (Campos *et al.*, 2013; Weschenfelder *et al.*, 2015).

Na década de 1980, as vantagens das membranas cerâmicas com poros quimicamente inertes e estruturas definidas motivaram pesquisadores a estudarem as propriedades e aplicações dessas membranas. Materiais cerâmicos possibilitaram a obtenção de membranas com formatos complexos para promover grandes áreas superficiais, adequando-as em pequenos espaços físicos e aumentando a permeabilidade do sistema, além de apresentarem vantagens como maior vida útil do elemento filtrante, facilidade de limpeza, boa resistência química e mecânica (Emani *et al.*, 2013).

As membranas cerâmicas são cada vez mais utilizadas por serem uma alternativa tecnologicamente promissora em diversas áreas: química, biotecnologia, farmacêutica, alimentícia, médica, bem como em processos tratamento de águas e efluentes industriais.

A caracterização da membrana é importante para prever sua aplicabilidade para o processo de separação a que se destina, visto que pequenas alterações na síntese das mesmas proporcionam variações em sua morfologia alterando sua eficiência, a qual pode ser avaliada pelos fatores de fluxo de permeado e o coeficiente de retenção (Hwang e Huang, 2009).

Na caracterização de membranas porosas é importante a avaliação de dois parâmetros: morfologia e permeabilidade seletiva. A morfologia está relacionada ao tamanho e distribuição dos poros, espessura efetiva da camada seletiva e porosidade superficial; e a permeabilidade seletiva está relacionada à curva de retenção e fluxo permeado (Cuperus e Smolders, 1991).

Existem diferentes métodos para caracterização de membranas tais como: análise morfológica e determinação da camada seletiva, realizada por microscopia, análise de permeabilidade e retenção realizada por medição de fluxos de permeado e análises de alíquotas do permeado e da solução de entrada (Habert *et al.*, 2006).

Diante destes fatos, neste estudo foi relatado a caracterização de uma membrana cerâmica designada para o processo de microfiltração, com determinação das características morfológicas (massa molar de corte, espessura da camada seletiva e estrutura dos multicanaís), e parâmetros funcionais da membrana (fluxo permeado e retenção).

2. Materiais e Métodos

A membrana caracterizada é uma membrana comercial cerâmica multicanal de microfiltração InsideCéram, Modelo Dhalia, possui 39 canais, com diâmetro de 25 mm, comprimento de 210 mm e tamanho de poro de $0,45\mu\text{m}$. A Figura 1 é uma imagem fotográfica da vista superior da membrana. Segundo o fabricante a membrana é constituída de dióxido de titânio (TiO_2) e dióxido de zircônio (ZrO_2).



Figura 1: Vista superior da membrana.

Os experimentos foram realizados em um sistema de microfiltração com fluxo tangencial, conforme representado na Figura 2.

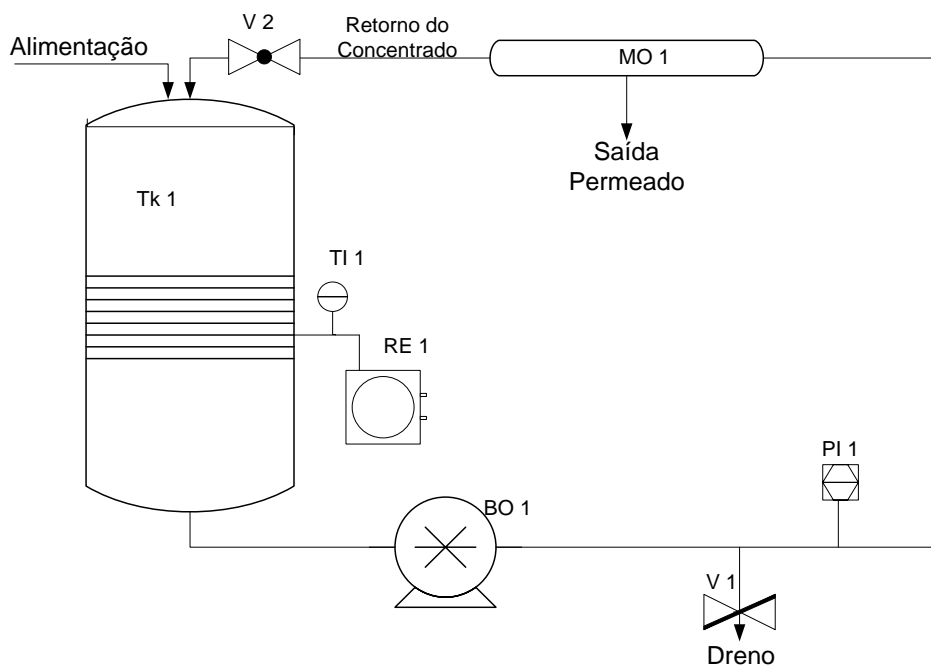


Figura 2: Representação esquemática do sistema de microfiltração

Nota: Tk1) tanque de processo; V1) válvula borboleta; V2) válvula globo; TI1) indicador de temperatura; RE1) sistema de refrigeração da água; PI1) indicador de pressão manométrica; BO1) bomba de deslocamento positivo; MO1) módulo da membrana.

Para a realização dos testes de retenção foram utilizadas soluções de dextrana, com diferentes massas molares, e poli(vinilpirrolidona), de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Massa molar das soluções utilizadas nos ensaios de retenção

Componente	Massa Molar
Dextrana	70 kDa
Dextrana	150 kDa
Dextrana	200 kDa
Dextrana	500 kDa
Poli(vinilpirrolidona)	360 kDa

Para determinar a permeabilidade hidráulica, o sistema foi preenchido com água destilada e variou-se a pressão transmembrana em 0,5; 1; 2 e 3 bar, a temperatura constante de $20^{\circ}\text{C} \pm 1$. Para cada pressão manteve-se o sistema em reciclo total durante 10 minutos, para que o mesmo entrasse em equilíbrio e, em seguida, mediu-se o fluxo de permeado. As coletas dos dados foram realizadas em duplicata.

A permeabilidade hidráulica é determinada a partir das medidas de fluxo permeado obtido em cada pressão transmembrana, calculada conforme Equação 1 (Vinoth Kumar *et al.*, 2015).

$$J = \frac{V}{A\Delta t} \quad (1)$$

sendo: J = fluxo do permeado ($\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$); V = volume de permeado (L); A = área da membrana (m^2); Δt = tempo de permeação (h).

No ensaio de retenção, as soluções de dextranas e poli(vinilpirrolidona) foram circuladas no sistema com variação da pressão transmembrana de 0,5; 1; 2 e 3 bar, a temperatura constante $20^{\circ}\text{C} \pm 1$, para cada pressão foram recolhidas alíquotas de permeado e da alimentação, para cada solução. A retenção observada (R_{obs}) é definida pela relação entre a concentração do componente na entrada do sistema (C_f) e sua concentração no permeado (C_p), sendo obtida pela Equação 2 (Nanda *et al.*, 2011).

$$\%R_{\text{obs}} = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100\% \quad (2)$$

A análise de cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC) foi realizada em um cromatógrafo, da série 200, com interface NCI900. A coluna utilizada foi a PolySep GRC P3000, com dimensões de comprimento de 300 mm e diâmetro de 7,8 mm, para as análises das amostras de permeado e concentrado das soluções de dextranas e poli(vinilpirrolidona) circuladas no sistema de microfiltração.

Com os dados de R_{obs} e J das soluções em diferentes pressões, pode-se plotar gráficos lineares. Pela regressão linear e aplicação do modelo de filme, conforme a Equação 3, obtém-se o valor do coeficiente de transferência de massa (k). A retenção intrínseca (R) para as soluções de dextrana e poli(vinilpirrolidona) foram calculados a partir do coeficiente linear das retas (Baldasso *et al.* 2011; Zeidler *et al.* 2014).

$$y = ax + b \quad (3)$$

$$\text{sendo: } y = \ln \frac{1-R_{\text{obs}}}{R_{\text{obs}}}; x = J; a = \frac{1}{k}; b = \ln \frac{1-R}{R}.$$

A curva de retenção de uma membrana é obtida pelas medidas de retenção intrínseca dos solutos de diferentes massas molares, sendo a massa molar de corte (MMC) determinada quando a retenção é de 90%.

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) da superfície e da secção transversal da membrana foram realizadas utilizando microscópio eletrônico de varredura, modelo SSX-550 acoplado a um detector de EDS. Foi realizado uma fina camada de revestimento em ouro nas amostras das membranas antes da sua caracterização.

3. Resultados e Discussão

3.1. Permeabilidade hidráulica

A permeabilidade hidráulica é um parâmetro muito importante para caracterização da membrana é referência para análise do seu comportamento em processos de separação com utilização de outras soluções (Sahnoun e Baklouti, 2013). Relacionada com o fluxo do permeado de água destilada em diferentes pressões, a Figura 3 mostra os resultados obtidos e sua representação gráfica.

O fluxo de permeado expressa a vazão de permeado por unidade de área de permeação da membrana. Em membranas porosas a força motriz é a pressão transmembrana, e o fluxo é determinado pela pressão transmembrana e pela resistência da mesma, as quais estão diretamente relacionadas. Durante o processo de microfiltração, a concentração de soluto na superfície da membrana é superior à concentração na entrada da solução, em virtude do aumento gradual do soluto rejeitado na sua superfície (Hilal *et al.*, 2008).

Na Figura 3 observa-se que o fluxo de água aumenta linearmente em relação a pressão aplicada (Fakhfakh *et al.*, 2010), podendo ser representada por uma função linear (Lee *et al.*, 2015). O aumento da pressão transmembrana proporciona aumento no fluxo de permeado devido a força motriz (Hwang e Sz, 2011; Bhattacharya *et al.*, 2013). A permeabilidade hidráulica pode ser calculada pelo coeficiente angular da curva entre o fluxo permeado em função da pressão transmembrana, e para este caso o valor é $4.736,9 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$.

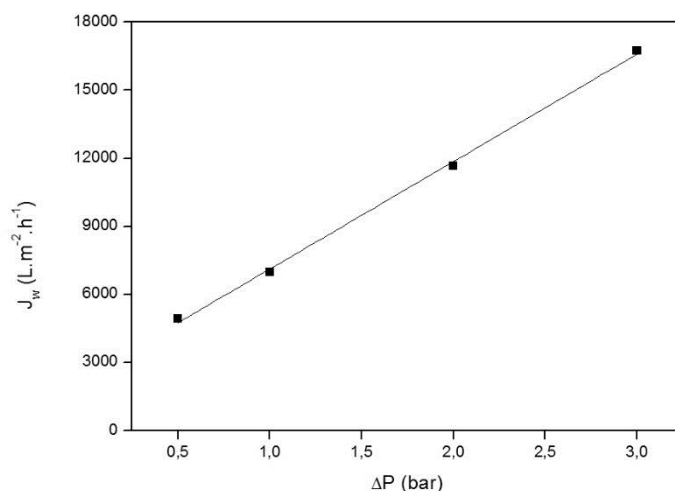


Figura 3: Fluxo do permeado de água destilada em função da pressão transmembrana.

3.2. Ensaios de retenção

A retenção baseia-se na exclusão de tamanho de partícula, sendo relacionada com parâmetros funcionais que consistem na medição da retenção da membrana para vários solutos com diferentes massas molares. As soluções de dextransas são muito utilizadas para determinar índices de retenção e distribuição do tamanho de poros, pois não interagem com a maioria das membranas, possuem pesos moleculares conhecidos e são de baixo custo (Bakhshayeshi *et al.*, 2011). Foram medidos os fluxos em diferentes pressões para cada solução de dextrana e poli(vinilpirrolidona), a Figura 4 ilustra os valores obtidos e sua representação gráfica.

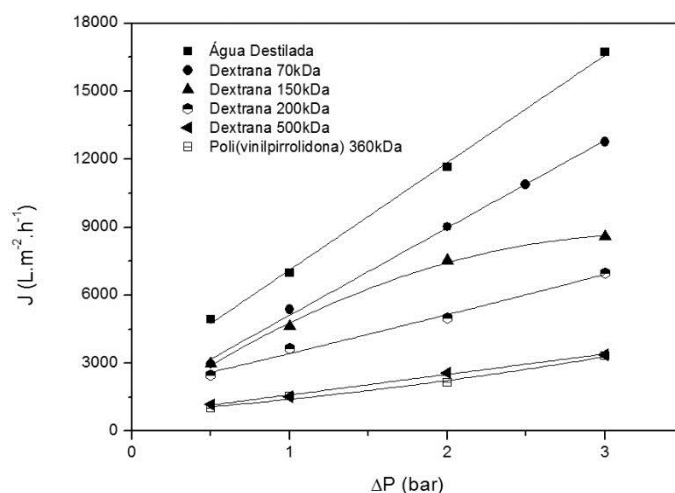


Figura 4: Fluxo do permeado em função da pressão transmembrana, das soluções de dextrana e poli(vinilpirrolidona) e água destilada.

Na Figura 4 foi observado que para todas as soluções quanto maior a pressão transmembrana maior o fluxo do permeado. Uma molécula é rejeitada cada vez menos pela membrana, à medida que a pressão aumenta, devido à deformação da macromolécula provocada pela tensão de cisalhamento (El Rayess *et al.*, 2012; Bhattacharya *et al.*, 2013). As dextranas são moléculas deformáveis e o fluxo do permeado, responsável pela tensão de cisalhamento, aumenta com a pressão de operação. O aumento linear de permeabilidade com a pressão conduz a uma melhor capacidade de separação (Silva *et al.*, 2012). Em relação às soluções com dextrana, nota-se também que quanto maior o tamanho da partícula, menor o fluxo de permeado, ou seja, maior a retenção.

Os fluxos de permeado das soluções de dextrana 70kDa, 200kDa, 500kDa e a solução poli(vinilpirrolidona) 360kDa são semelhantes com o fluxo de água, aumentando linearmente com o aumento da pressão. No entanto, os fluxos foram significativamente menores que o fluxo de água, indicando que pode ter ocorrido polarização por concentração, compressão da camada depositada sobre a superfície ou incrustações, proporcionando a queda do fluxo de permeado em relação ao valor obtido com água destilada (Aimar e Bacchin, 2010; El Rayess *et al.*, 2012; Fujioka e Nghiem *et al.*, 2015).

A polarização por concentração ocorre em virtude da seletividade da membrana, ou seja, permite a passagem de alguns solutos, ocorrendo o acúmulo dos solutos rejeitados na superfície da mesma, formando uma camada superficial que proporcionará resistência significativa ao processo de separação (Dizge *et al.*, 2011; El Rayess *et al.*, 2012).

A solução de dextrana 150 kDa apresentou o fluxo de permeado menor que o fluxo hidráulico, e as curvas de fluxo em função da pressão transmembrana não são lineares. No intervalo da pressão transmembrana entre 2 e 3 bar, ocorreu uma diferença menor no fluxo do permeado tendenciado a um valor de fluxo constante, conforme observado na Figura 4. Os fenômenos de polarização por concentração e incrustação ocorrem gradativamente durante o processo de microfiltração impactando na vazão do fluxo permeado, favorecendo o estado estacionário (fluxo constante), conhecido como *fouling* (Machado *et al.*, 2012).

As soluções de dextrana 500 kDa e a poli(vinilpirrolidona) 360 kDa apresentaram valores próximos de fluxo de permeado mesmo possuindo tamanhos de partículas diferentes. Esse acontecimento pode ser explicado pelo fato de serem soluções diferentes e apresentarem partículas com diferentes geometrias quando comparadas entre si, o que pode alterar sua retenção.

A análise de HPLC foi realizada com as alíquotas coletadas durante os experimentos de retenção, possibilitando o cálculo da retenção observada, com utilização da Equação 2. A Figura 5 ilustra graficamente os resultados de retenção em relação à variação da pressão.

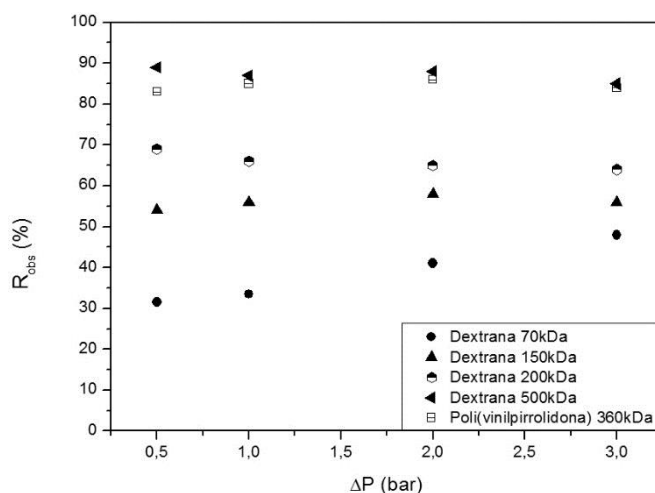


Figura 5: Retenção em relação à variação da pressão transmembrana.

Analisando a Figura 5 é possível observar que quanto maior o tamanho da partícula na solução, maior o valor da retenção observada. A eficiência da retenção no processo de microfiltração depende do tamanho das partículas da solução a serem filtradas e a distribuição do tamanho dos poros da membrana utilizada, quanto maior a retenção maior a eficiência do processo (Hwang e Huang, 2009; Gutierrez-Rivera *et al.*, 2010). Nos processos de ultrafiltração, a retenção diminui com o aumento da pressão, o qual é um indicativo da formação de filme polarizado por concentração (Garcia-Molina *et al.*, 2006). A membrana utilizada neste trabalho possui um tamanho de poro maior quando comparado ao processo de ultrafiltração, por isso as amostras apresentaram comportamento diferenciado.

A maioria das membranas são descritas pela sua massa MMC, determinada a partir da permeação de soluções diluídas que contenham partículas de massa molar conhecidas (Causserand *et al.*, 2010). A MMC para a membrana deste estudo é acima de 500 kDa, como pode ser visto na Figura 6.

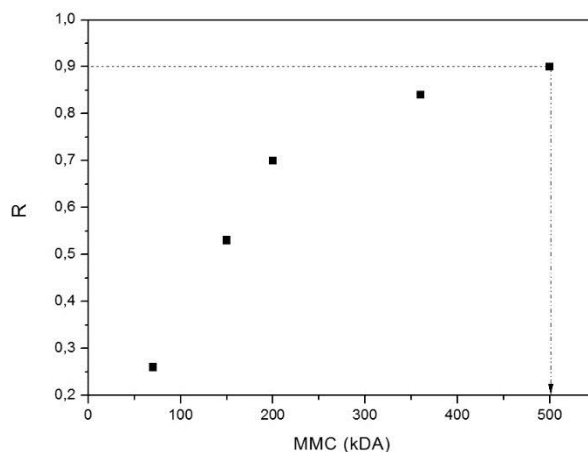


Figura 6: Retenção intrínseca versus a massa molar das soluções.

Pode-se estabelecer uma curva com os valores de R em função da massa molar das soluções, na qual a MMC da membrana é a massa molar para qual a membrana apresenta uma retenção de 90% das moléculas da solução (Baldasso *et al.*, 2011). O resultado medido é geralmente representado por uma curva relacionando percentual de rejeição versus massa molar das soluções.

3.3. Morfologia e composição da membrana

A Figura 7 ilustra as micrografias da vista superior e do corte transversal da membrana. A análise de microscopia possibilita obter informações da morfologia da superfície da membrana e de suas seções transversais, bem como indicações da rugosidade superficial, tamanho e forma de grão na superfície, estrutura das camadas e espessura das seções transversais (Suwal *et al.*, 2015).

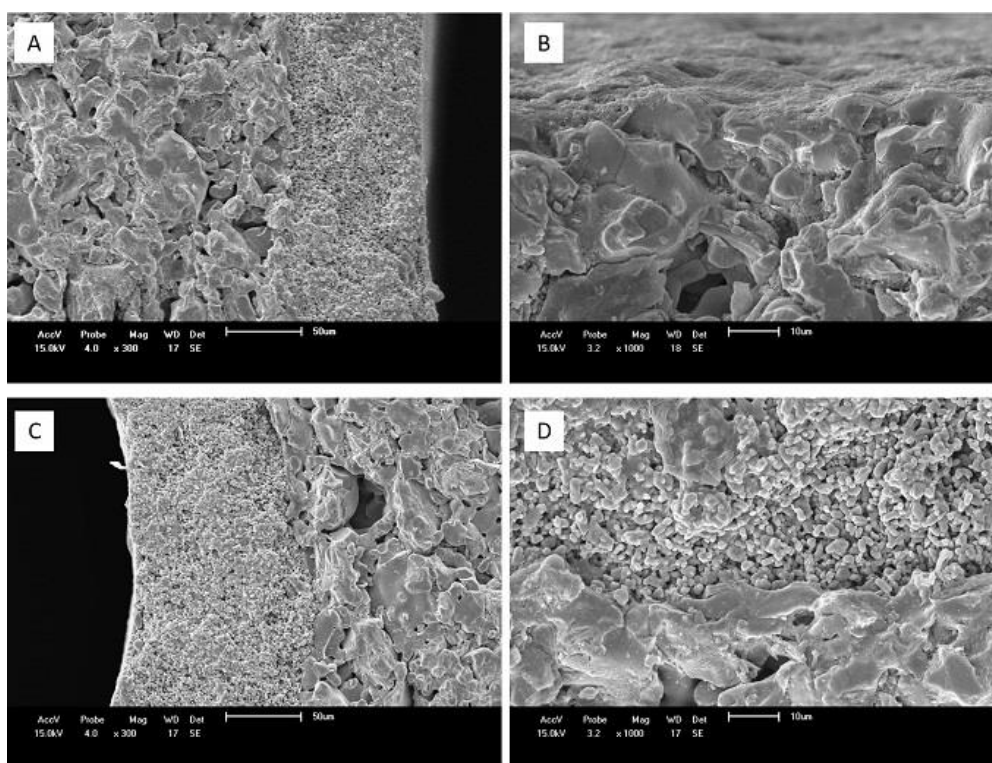


Figura 7: Microscopias da vista superior e vista do corte transversal: vista superior da membrana com ampliação de 300 vezes (A) e 1000 vezes (B); vista do corte transversal com ampliação de 300 vezes (C) e 1000 vezes (D).

A Figura 8 mostra as micrografias das camadas de membrana com diferentes tamanhos de partículas, observa-se que a membrana possui três estruturas com tamanhos diferentes de partículas. A membrana cerâmica geralmente é constituída por uma estrutura macroporosa com

sucessivas camadas finas depositadas sobre ela, formada por camadas múltiplas, que compreende a camada de suporte, camada intermediária e a camada seletiva (Sila *et al.*, 2012).

A camada intermediária preenche as lacunas entre os grandes poros do suporte e os pequenos poros da camada superior, sendo que a camada superior é responsável pela seletividade e a estrutura de suporte proporciona resistência mecânica da membrana (Ramakrishnan *et al.*, 2015). Pela Figura 8 foi estimado a espessura da camada seletiva de aproximadamente 2 μm , em relação ao tamanho das partículas que formam as três camadas, a membrana é formada por tamanhos diferentes para cada estrutura, sendo: inferior a 0,61 μm (camada seletiva), inferior a 3,5 μm (a estrutura intermediária) e inferior a 30 μm (estrutura de suporte).

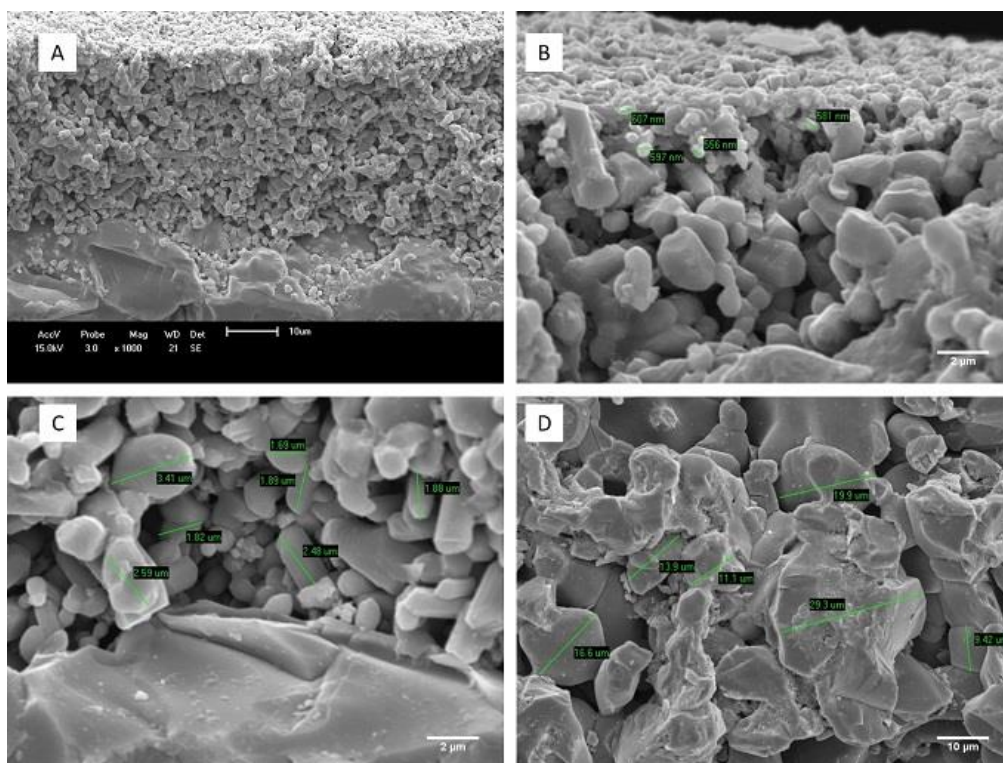


Figura 8: Micrografias das camadas de membrana com diferentes tamanhos de partículas: a) camadas de membrana; B) estrutura da camada seletiva; B) estrutura de camada intermediária; C) estrutura de camada de suporte.

Pela análise do EDS foi possível, obter um espectro relacionando a energia dos fótons (keV) e com o número de fótons recebidos, conforme ilustra a Figura 9. A maioria das membranas comerciais são produzidas por alumina, sílica, zircônio, titânio ou uma combinação destes óxidos (Lorente-Ayza *et al.*, 2015). Os materiais TiO_2 e ZrO_2 conferem a membrana características hidrofílica, proporcionando redução na formação de incrustações, resistência química em soluções ácidas e básicas (Zhang *et al.*, 2013; Vinoth Kumar *et al.*, 2015). No espectro obtido percebe-se que a membrana possui principalmente em sua estrutura TiO_2 , não

foi possível identificar ZrO_2 . A presença de ouro é devido ao revestimento realizado nas amostras para realização da análise.

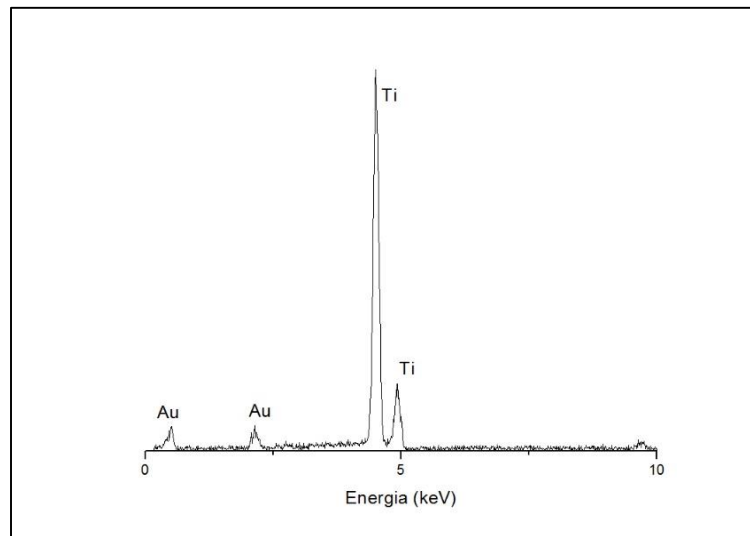


Figura 9: Espectro EDS.

4. Conclusão

Este trabalho apresenta a caracterização de uma membrana cerâmica multicanal em função das propriedades funcionais e morfológica. Em relação às características morfológicas da membrana, a massa molar de corte obtida foi acima de 500 kDa. A membrana apresentou três estruturas com diferentes tamanhos de partículas, sendo uma estrutura responsável pela filtração e as outras duas estruturas responsáveis pelo suporte da membrana, e a espessura da camada seletiva é aproximadamente de 2 μm . O material predominante em sua estrutura é o dióxido de titânio, evidenciado na análise de EDS.

Em relação às características funcionais da membrana, o fluxo de permeado e a permeabilidade hidráulica apresentaram comportamentos lineares e proporcionais ao aumento da pressão. Nos testes de retenção quanto maior o tamanho da molécula na solução, maior o percentual retido. A caracterização da membrana é importante para a eficiência e dimensionamento adequado do processo de microfiltração, possibilitando a estimativa do comportamento das soluções a serem utilizadas, ou seja, identificação dos solutos cujos tamanhos são maiores que o tamanho do poro da membrana serão retidos.

5. Referências

AIMAR, P. & BACCHIN, P. 2010. Slow colloidal aggregation and membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, 360, 70–76.

- BAKSHAYESHI, M., KANANI, D. M., MEHTA, A., REIS, R. V., KURIYEL, R., JACKSON, N. & ZYDNEY, A. L. 2011. Dextran sieving test for characterization of virus filtration membranes. *Journal of Membrane Science*, 379, 239–248.
- BALDASSO, C., BARROS, T.C. & TESSARO, I.C. 2011. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. *Desalination*, 278, 381–386.
- BHATTACHARYA, P., ROY, A., SARKAR, S., GHOSH, S., MAJUMDAR, S., CHAKRABORTY, S., MANDAL, S., MUKHOPADHYAY, A. & BANDYOPADHYAY, S. 2013. Combination technology of ceramic microfiltration and reverse osmosis for tannery wastewater recovery. *Water Resources and Industry*, 3, 48–62.
- CAMPOS, P. R. F., MÓDENES, A. N., ESPINOZA-QUÍÑONES F. R., TRIGUEROS, D. E. G., BARROS, S. T. D. & PERREIRA N. C. 2013. Tratamento enzimático da polpa de uva no processo de produção de suco de uva. *Engvista*, 15, 51–60.
- CAUSSERAND, C., PIERRE, G., RAPENNE, S., SCHROTTER, J.C., SAUVADE, P. & LORAIN, O. 2010. Characterization of ultrafiltration membranes by tracer's retention: Comparison of methods sensitivity and reproducibility. *Desalination*, 250, 767–772.
- CUPERUS, F. P. & SMOLDERS, C. A. Characterization of UF membranes. 1991. *Advances in Colloid and Interface Science*, 34, 135–173.
- DIZGE, N., SOYDEMIR, G., KARAGUNDUZ, A. & KESKINLER, B. 2011. Influence of type and pore size of membranes on cross flow microfiltration of biological suspension. *Journal of Membrane Science*, 366, 278–285.
- EL RAYESS, Y., ALBASI, C., BACCHIN, P., TAILLANDIER, P., MIETTON-PEUCHOT, M. & DEVATINE, A. 2012. Analysis of membrane fouling during cross-flow microfiltration of wine. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 398–408.
- EMANI, S., UPPALURI, R. & PURKAIT, M. K. 2013. Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for micro-filtration applications. *Applied Clay Science*, 317, 32–40.
- FAKHFAKH, S., BAKLOUTI, S., BAKLOUTI, S. & BOUAZIZ, J. 2010. Preparation, characterization and application in BSA solution of silica ceramic membranes. *Desalination*, 262, 188–195.
- FUJIOKA, T. & NGHIEM, L.D. 2015. Fouling control of a ceramic microfiltration membrane for direct sewer mining by backwashing with ozonated water. *Separation and Purification Technology*, 142, 268–273.
- GARCIA-MOLINA, V., ESPLUGAS, S., WINTGENS, T. & MELIN, T. 2006. Ultrafiltration of aqueous solutions containing dextran. *Desalination*, 188, 217–227.
- GUTIERREZ-RIVERA, L. E., KATEKAWA, M. E., SILVA, M. A. & CESCATO, L. 2010. Characterization of the selectivity of microsieves using a cross-flow microfiltration system. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 27, 677–685.
- HABERT, A. C., BORGES, C.P. & NOBREGA, R. 2006. *Processos de Separação por Membranas*, E-Papers Serviços Editoriais, Rio de Janeiro, p. 49.
- HILAL, N., AL-ABRI, M.; AL-HINAI, H. & ABU-ARABI, M. 2008. Characterization and retention of NF membranes using PEG, HS and polyelectrolytes. *Desalination*, 221, 284–293.
- HWANG, K.-J. & HUANG, P.-S. 2009. Cross-flow microfiltration of dilute macromolecular suspension. *Separation and Purification Technology*, 68, 328–334.
- HWANG, K.-J. & SZ, P.-Y. 2011. Effect of membrane pore size on the performance of cross-flow microfiltration of BSA/dextran mixtures. *Journal of Membrane Science*, 378, 272–279.
- LEE, M., WU, Z., WANG, B. & LI, K. 2015. Micro-structured alumina multi-channel capillary tubes and monoliths. *Journal of Membrane Science*, 489, 64–72.
- LORENTE-AYZA, M.-M., MESTRE, S., MENÉNDEZ, M. & SÁNCHEZ, E. 2015. Comparison of extruded and pressed low cost ceramic supports for microfiltration membranes. *Journal of the European Ceramic Society*, 35, 3681–3691.
- MACHADO, R. M. D., HANEDA, R. N., TREVISAN, B. P. & FONTES, S. R. 2012. Effect of enzymatic treatment on the cross-flow microfiltration of açai pulp: Analysis of the fouling and recovery of phytochemicals. *Journal of Food Engineering*, 113, 442–452.
- NANDA, D., TUNG, K.L., HUNG, W.S., LO, C.H., JEAN, Y.C., LEE, K.R., HU, C.C. & LAI, J.Y. 2011. Characterization of fouled nanofiltration membranes using positron annihilation spectroscopy. *Journal of Membrane Science*, 382, 124–134.

- RAMAKRISHNAN, G. DWIVEDI, G. SAMPATH, S. & ORLOV. A. 2015. Development and optimization of thermal sprayed ceramic microfiltration membranes. *Journal of Membrane Science*, 489, 106–111.
- SAHNOUN, R.D & BAKLOUTI, S. 2013. Characterization of flat ceramic membrane supports prepared with kaolin-phosphoric acid-starch. *Applied Clay Science*, 83-84, 399–404.
- SILVA, L., VASCONCELOS, D. C. L., NUNES, E. H. M., CALDEIRA, L., COSTA, V. C., MUSSE, A. P., HATIMONDI, S. A., NASCIMENTO, J. F., GRAVA, W & VASCONCELOS, W. L. 2012. Processing, structural characterization and performance of alumina supports used in ceramic membranes. *Ceramics International*, 38, 1943–1949.
- SUWAL, S., DOYEN, A. & BAZINET, L. 2015. Characterization of protein, peptide and amino acid fouling on ion-exchange and filtration membranes: Review of current and recently developed methods. *Journal of Membrane Science*, 496, 267–283.
- VINOTH KUMAR, R., KUMAR GHOSHAL, A. & PUGAZHENTHI, G. 2015. Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 490, 92–102.
- WESCHENFELDER, S.E., MELLO, A. C. C., BORGES, C. P. & CAMPOS. J. C. 2015. Oilfield produced water treatment by ceramic membranes: Preliminary process cost estimation. *Desalination*, 360, 81–86.
- ZEIDLER, S., PUHLFÜRß, P., KÄTZEL, U. & VOIGT. I. 2014. Preparation and characterization of new low MWCO ceramic nanofiltration membranes for organic solvents. *Journal of Membrane Science*, v. 470, p. 421–430.
- ZHANG, X., FAN, L. & RODDICK, F. A. 2013. Influence of the characteristics of soluble algal organic matter released from *Microcystisaeruginosa* on the fouling of a ceramic microfiltration membrane. *Journal of Membrane Science*, 425–426, 23–29.