

Síntese e Caracterização de Nanopartículas de Prata para Aplicação no Desenvolvimento de Membranas de Poli(L-Ácido Láctico) com Propriedades Antibacterianas

A. L. Nogueira*, G. S. Zanella, S. G. Souza, A. L. Schneider, D. K. Abatti, A. P. T. Pezzin

Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE

Rua Paulo Malschitzki, 10, Zona Industrial Norte, CEP: 89219-710, Joinville – SC, Brasil

*nogueira.a.l@hotmail.com

RESUMO

*No presente trabalho, nanopartículas de prata (NpAg) foram sintetizadas em meio aquoso e transferidas para clorofórmio empregando uma amina graxa como agente de transferência de fases. O clorofórmio, contendo as NPAg, foi utilizado para solubilizar o PLLA. Membranas de PLLA funcionalizadas com diferentes concentrações de NpAg foram obtidas pela técnica de evaporação do solvente (casting). As nanopartículas foram caracterizadas por espectrofotometria de UV-Vis, microscopia eletrônica de transmissão e espectroscopia de absorção atômica. As membranas foram caracterizadas por análise termogravimétrica, calorimetria exploratória diferencial e microscopia eletrônica de varredura com emissão de campo. A atividade antibacteriana das membranas foi avaliada conforme a norma ASTM E-2180, utilizando a bactéria Gram positiva *Staphylococcus aureus*. Os resultados indicaram que o aumento da quantidade de NpAg reduziu a estabilidade térmica e aumentou a cristalinidade do biopolímero. As membranas produzidas apresentaram excelente propriedade antibacteriana a partir da concentração mássica de aproximadamente 120 µg NpAg / g PLLA.*

Palavras-chave: nanopartículas de prata, PLLA, membrana, funcionalização, antibacteriana

INTRODUÇÃO

A Nanotecnologia tem atraído o interesse de pesquisadores devido sua aplicação nos mais variados setores industriais, e a contribuição que seus resultados podem trazer ao desenvolvimento tecnológico e econômico (GONG *et al.*, 2007). A elevada área superficial, a possibilidade de controle da geometria e a distribuição de

tamanhos, a facilidade de preparação, a boa estabilidade e a possibilidade de modificação superficial são exemplos de características específicas que tem viabilizado e estimulado o uso destes materiais em novas aplicações nos campos da farmácia, odontologia, medicina, biologia e ciência dos materiais (MORITZ *et al.*, 2013). Uma aplicação de grande interesse é o uso das nanopartículas no desenvolvimento de superfícies antimicrobianas para impedir o crescimento de micro-organismos. A aderência microbiana às superfícies, seguidas de crescimento celular, resulta na colonização e formação de uma matriz de biofilme capaz de causar doenças infecciosas. As nanopartículas interagem diretamente com as células microbianas, podendo ser utilizadas como agentes antimicrobianos para o combate de processos infecciosos em geral (STEVANOVIC *et al.*, 2014; LIU *et al.*, 2012; ZHENG *et al.*, 2010).

A periodontite, por exemplo, consiste num processo infeccioso caracterizado pela perda de inserção dental induzida por patógenos periodontais presentes no sulco gengival, causando a formação de bolsa periodontal, infiltração de leucócitos e reabsorção óssea (MENDES, 2012). Uma das técnicas utilizadas para o tratamento periodontal é a regeneração tecidual guiada (RTG), que se baseia na utilização de membranas biocompatíveis, implantadas entre a gengiva, a raiz dentária e o osso alveolar. A finalidade destas membranas é impedir a migração imediata do epitélio para a ferida, permitindo que células do ligamento periodontal povoem a região, criando condições para a regeneração do aparato de inserção. Alguns procedimentos comumente usados no tratamento da periodontite envolvem a administração de antibióticos para inibir o processo inflamatório, e a utilização de membranas não reabsorvíveis, o que gera a necessidade de uma segunda intervenção cirúrgica para a remoção das mesmas. Além disso, existe o risco de contaminação por bactérias na porção coronária da membrana que fica exposta à cavidade bucal. Essas desvantagens oferecem riscos para o sucesso do tratamento e ao próprio paciente.

Atualmente, a principal técnica utilizada para tratamento da periodontite é a regeneração tecidual guiada (RTG) mediante a utilização de membranas reabsorvíveis para permitir a repopulação do defeito periodontal por células desejáveis, resultando no chamado novo aparato de inserção. Nestes casos, pelo fato da membrana ser reabsorvível, não há a necessidade de nova intervenção cirúrgica para remoção da membrana. A possibilidade de controlar a flexibilidade e o

tempo de degradação de membranas para a RTG periodontal é uma das principais vantagens de membranas biopoliméricas, em relação às demais comercialmente utilizadas.

O poli(L-ácido láctico) – PLLA é um biopolímero que, além de ser bioabsorvível, é biocompatível com os tecidos onde são implantados (BORGES, 2008). Este biopolímero ainda é capaz de sofrer degradação abiótica por hidrólise simples das ligações éster, e degradação biótica, onde as enzimas degradam oligômeros residuais até a completa mineralização, sendo o polímero transformado em ácido láctico, substância já presente naturalmente no organismo humano e que é eliminado do corpo por caminhos metabólicos naturais.

A funcionalização de membranas biopoliméricas funcionalizadas com nanopartículas de prata aparece como uma estratégia interessante para o uso em tratamentos como o da periodontite, pois minimiza o risco associado ao crescimento de bactérias resistentes quando o tratamento é realizado a base de antibióticos. Isto ocorre porque o mecanismo de ação bactericida das nanopartículas de prata é diferente do mecanismo dos antibióticos, não permitindo o desenvolvimento de bactérias resistentes (SIMCHI et al., 2011; CHAKRABORTI et al., 2014). Membranas biopoliméricas contendo agentes antimicrobianos nanoparticulados devem ser capazes de inibir a formação de biofilme na região de tratamento, garantindo a eliminação das bactérias e permitindo o crescimento adequado dos tecidos na região sob tratamento. Tendo isso em mente, o presente trabalho buscou desenvolver membranas de PLLA funcionalizadas com diferentes concentrações de nanopartículas de prata, avaliando o efeito da quantidade destas nanoestruturas nas propriedades térmicas e de atividade antibacteriana das membranas contra a bactéria Gram positivas *Staphylococcus aureus*.

MATERIAIS E MÉTODOS

As sínteses foram conduzidas em um reator de vidro boro-silicato de 125 mL, sob agitação magnética de 1000 RPM e temperatura controlada de 20°C por meio de um banho termocriostático. Inicialmente, 90 mL de água deionizada foram adicionados ao reator e, em seguida, foi adicionado o agente estabilizante (citrato de sódio, marca Dinâmica) e o nitrato de prata (AgNO₃, marca Cennabras). A solução do agente redutor (10 mL), o borohidreto de sódio (NaBH₄, marca Cinética), foi

mantida em banho de gelo e alimentada no reator por meio de uma bureta graduada para controle da vazão (aproximadamente 1,0 mL/min). Ao término da adição do agente redutor no reator, o sistema foi mantido em agitação durante 10 minutos para garantir o consumo completo dos reagentes. A concentração de citrato de sódio no reator foi de 15 mmol/L, e as quantidades do sal metálico precursor e do agente redutor foram calculadas na proporção estequiométrica de 1,0:0,5 de forma que o produto final tivesse uma concentração de nanopartículas de prata de aproximadamente 100 ppm.

As nanopartículas de prata foram transferidas para um meio orgânico (clorofórmio, Vetec) mediante a utilização de uma amina graxa como agente de transferência de fases (oleilamina, Sigma- Aldrich). A dispersão aquosa das nanopartículas de prata foi vertida no clorofórmio na proporção 1:1 (v/v), contendo a oleilamina (1,0% em volume), e o sistema foi mantido em agitação (300 RPM) por 30 minutos. Decorrido este tempo, a mistura heterogênea água/óleo foi transferida para um funil de separação, e o clorofórmio contendo as nanopartículas de prata foi separado da fase aquosa. A oleilamina, por conter o grupo funcional amina, tem a capacidade de capturar as nanopartículas de prata da fase aquosa por meio de ligações de coordenação entre a prata metálica e os átomos de nitrogênio do grupo funcional amina (Fratini et al., 2005, Lv et al., 2009, Manivel e Anandan, 2012).

As membranas de PLLA (Natural Works®, $M_w = 105.300 \text{ g.mol}^{-1}$) foram produzidas dissolvendo-se 30 g de PLLA, na forma de *pellets*, em 970 mL de clorofórmio mediante agitação magnética de 300 RPM durante 24 horas. Posteriormente 50 g desta solução polimérica foram pesadas em um béquer para, posteriormente, acrescentar quantidades específicas do clorofórmio contendo as nanopartículas de prata (0,2 mL, 1,8 mL, 3,5 mL e 5,0 mL). Após a adição destas quantidades de clorofórmio contendo nanopartículas de prata no PLLA solubilizado, o sistema foi mantido sob agitação magnética de 500 RPM por 15 minutos para propiciar a homogeneização da prata coloidal no sistema. As soluções compostas por solvente, polímero e nanopartículas de prata, foram vertidas em placas de Petri e mantidas em capela de exaustão de gases, a temperatura ambiente durante aproximadamente 120 horas para secagem lenta do solvente e formação dos filmes de PLLA (processo *casting*). Ao término da evaporação do solvente, os filmes foram mantidos por 24 horas em uma estufa a vácuo a 50°C para garantir a completa evaporação do solvente. Após as 24 horas, os filmes foram armazenados em um

dessecador. Ao final do processo, filmes de PLLA funcionalizados com nanopartículas de prata foram produzidos.

As nanopartículas de prata sintetizadas em meio aquoso e transferidas para o clorofórmio foram caracterizadas por espectrofotometria de UV-Vis (Shimadzu, UV-1601PC) e microscopia eletrônica de transmissão – MET (Jeol, JEM-2100). As análises de UV-Vis foram conduzidas para se obter informações sobre as propriedades ópticas das nanopartículas, que dependem do seu tamanho e forma geométrica. As análises de MET foram realizadas para se avaliar o tamanho médio, bem como a distribuição de tamanhos e a forma geométrica das nanopartículas sintetizadas. Os resultados obtidos foram correlacionados com aqueles obtidos por UV-Vis. A concentração de nanopartículas de prata no clorofórmio foi determinada por espectroscopia de absorção atômica – AAS (Perkin Elmer, PinAAcle 900 T). A partir desta análise, foi possível estimar a concentração de prata contida em cada uma das membranas produzidas. Para as análises de UV-Vis, 0,5 mL das amostras foram diluídas em 3,5 de diluente. O diluente utilizado para as nanopartículas de prata em meio aquoso foi água deionizada, e para as nanopartículas em fase orgânica, o diluente foi o clorofórmio. As diluições foram vertidas em uma cubeta de vidro para que fosse realizada a leitura. As análises foram realizadas utilizando-se uma cubeta de vidro de abertura quadrada e caminho óptico de 10 mm. Para a realização das análises de MET, 10 gotas das dispersões de nanopartículas de prata em fase aquosa e orgânica foram pingadas em *grids* de cobre com malha de 300 mesh, recobertos por *formvar*. Após secagem em temperatura ambiente, os *grids* foram inseridos no microscópio e as imagens foram capturadas utilizando-se uma voltagem de 200 kV. As análises de AAS foram realizadas pela técnica da chama com as condições recomendadas pelo fabricante.

As membranas de PLLA foram caracterizadas por análise termogravimétrica – TGA (Texas Instruments, TGA-Q50), calorimetria diferencial exploratória – DSC (Texas Instruments, DSC-Q20), microscopia eletrônica de varredura com efeito de campo – MEV-FEG (Jeol, JSM 6701). Para as análises de TGA, as amostras foram aquecidas até 500°C a uma taxa de aquecimento de 10°C/min sob atmosfera inerte de N₂ (60 mL/min). A partir desta análise, obteve-se informações sobre a influência da concentração de nanopartículas de prata na estabilidade térmica das membranas de PLLA, especificamente suas temperaturas de degradação. Nas análises de DSC, as amostras foram aquecidas até 200°C, mantidas por 2,0 minutos nesta

temperatura, resfriadas até -50°C (*jumping*) e novamente aquecidas até 200°C . Com base nas curvas do primeiro aquecimento, avaliou-se a influência da concentração das nanopartículas de prata na temperatura de fusão e no grau de cristalinidade do PLLA. A partir das curvas do segundo aquecimento, obteve-se informações sobre o efeito da quantidade das nanopartículas no grau de cristalinidade das membranas. Para realização das análises de MEV-FEG, as amostras das membranas foram fraturadas após resfriamento em N_2 , e imagens das fraturas foram obtidas com o microscópio operando com 5 e 10 kV. A partir das imagens de MEV-FEG foi possível avaliar qualitativamente o comportamento do material quando fraturado, e estes resultados foram correlacionados ao grau de cristalinidade das membranas.

Por fim, ensaios microbiológicos das membranas foram conduzidos conforme a norma ASTM E2180 – Determinação de Atividade Antimicrobiana de Agentes Antimicrobianos Incorporados em Materiais Poliméricos ou Hidrofóbicos, utilizando a bactéria Gram positiva *Staphylococcus aureus* (ATCC Nº 6538). Para a determinação da atividade antibacteriana, as análises foram realizadas com as membranas funcionalizadas preparadas com diferentes volumes da solução de nanopartículas de prata em meio orgânico (0,0, 0,2, 1,8, 3,5 e 5,0 mL).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As sínteses das nanopartículas de prata foram realizadas em triplicata, assim como as transferências de fase para se avaliar a reprodutibilidade das etapas do processo. Portanto, os resultados apresentados nas Figuras 1 e 2 representam a média das triplicatas. De acordo com os resultados apresentados na Figura 1, percebe-se que a absorvância máxima ($\lambda_{\text{máx}}$) das nanopartículas de prata na fase aquosa aumenta ao longo dos dias após a síntese, tendendo a estabilizar em torno do décimo dia (dia 10) após a síntese. Apesar disso, a transferência de fases foi realizada no quarto dia (dia 04) após as sínteses, pois o aumento da máxima absorvância após este período não foi tão significativo quanto nos primeiros dias após a síntese. O aumento da absorvância máxima ao longo do tempo está relacionado à ação redutora do citrato de sódio, utilizado na síntese como agente estabilizante. Neste caso, os íons de prata não reduzidos pelo NaBH_4 foram sendo lentamente reduzidos pelo citrato de sódio, muito utilizado como um agente redutor fraco nas sínteses de nanopartículas de prata. Por esta razão, a concentração de

nanopartículas de prata aumentou gradativamente ao longo dos 10 primeiros dias após a síntese.

Os resultados apresentados na Figura 2 correspondem aos espectros das nanopartículas de prata dispersas na fase aquosa e na fase orgânica, medidos no dia da realização da transferência de fases (dia 04). Como pode ser observado, houve um aumento da absorbância em função da transferência das nanopartículas da água para o clorofórmio. Como no quarto dia após a síntese ainda havia íons de prata não reduzidos, como sugerem os resultados apresentados na Figura 1, acredita-se o aumento da absorbância após a transferência de fases esteja relacionado à ação redutora do grupo funcional amina presente no aminosilano, conforme sugerido por Fratini *et al.* (2005).

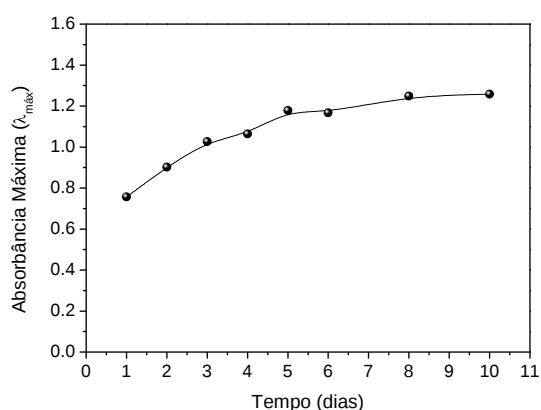


Figura 1 – Variação da absorbância máxima das nanopartículas de prata em fase aquosa ao longo do tempo.

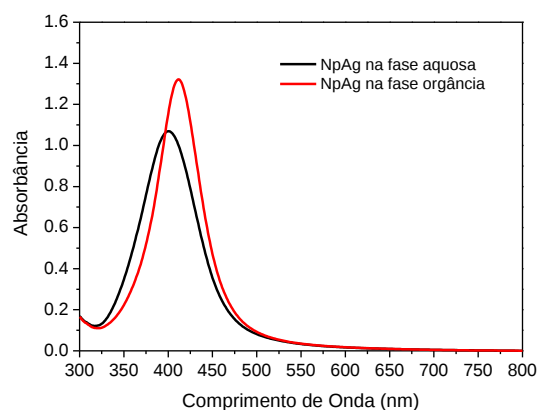


Figura 2 – Espectros de absorbância das nanopartículas dispersas na fase aquosa e na fase orgânica.

Na Figura 3 são apresentadas as imagens obtidas das nanopartículas de prata no dia da transferência de fases (dia 04 após a síntese). Como é possível observar, as nanopartículas sofreram um aumento de tamanho e uma modificação em sua geometria. Percebe-se que na fase aquosa, apesar de haver alguns aglomerados disformes, a maioria das nanopartículas formadas apresentou um formato tendendo ao esférico. Após a transferência de fases, a geometria das nanopartículas se mostra mais regular e com formas geométricas mais bem definidas. Estes resultados representam mais um indício de que o grupo funcional amina pode realmente ter reduzido os íons de prata remanescentes da síntese, e estes novos átomos de prata metálica formados devem ter se incorporado nas nanopartículas já existentes. O aumento de tamanho e a alteração na geometria das nanopartículas justificam o

deslocamento do espectro de absorbância das nanopartículas de prata em clorofórmio no sentido dos maiores comprimento de onda.

As análises de espectroscopia de absorção atômica foram realizadas em quadruplicata, sendo cada uma das amostras obtidas de sínteses e transferências distintas realizadas todas nas mesmas condições. Os resultados desta análise revelou que a quantidade média de nanopartículas presentes no clorofórmio foi de $95,1 \pm 11,69$ ppm (mg.L^{-1}). Com base nestas informações, foi possível estimar a concentração média de nanopartículas presentes em cada uma das membranas funcionalizadas produzidas. Cinco membranas de PLLA foram produzidas conforme o procedimento descrito na seção anterior (Materiais e Métodos), sendo uma isenta de nanopartículas de prata, e as outras contendo aproximadamente 13, 119, 230 e 328 ppm ($[\text{mg de NpAg}].[\text{kg PLLA}]^{-1}$).

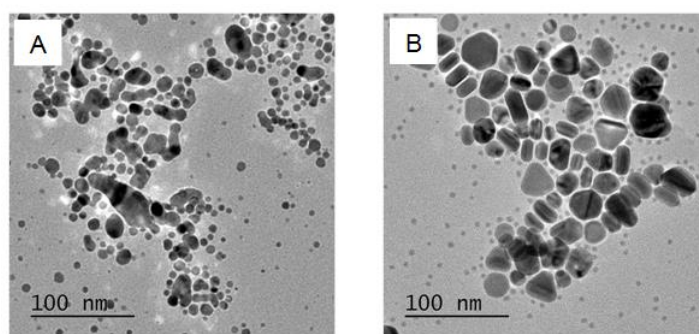


Figura 3 – Imagens de MET das nanopartículas de prata: A) em fase aquosa, após a síntese; B) em clorofórmio, após a transferência de fases.

Na Figura 4 são apresentadas as imagens das fraturas das membranas de PLLA contendo distintas concentrações de NpAg. Como pode ser observado, nota-se uma tendência das fraturas das membranas se aproximarem de um material frágil com o aumento da concentração das nanopartículas de prata. Na amostra sem nanopartículas e aquelas com menores concentrações apresentam um comportamento de fratura com escoamento de material. Já nas amostras com maiores quantidades de nanopartículas, este comportamento tende a desaparecer, revelando um rompimento mais característico de materiais frágeis.

As membranas de PLLA contendo distintas concentrações de nanopartículas de prata foram caracterizadas por análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria diferencial exploratória (DSC). Na Tabela 1 são apresentados os resultados de TGA, e na Tabela 2 os resultados de DSC. De acordo com os resultados de TGA,

obtiveram-se dois eventos de perda de massa, sendo o primeiro em aproximadamente 100°C ($T_{\text{onset-1}}$), relacionado à perda de água da amostra, e o outro em aproximadamente 340°C ($T_{\text{onset-2}}$), relacionado à degradação térmica do PLLA. De acordo com os resultados, nota-se que o aumento das nanopartículas de prata diminuiu a estabilidade térmica das membranas de PLLA, tendo a temperatura de degradação ($T_{\text{onset-2}}$) diminuída desde 342,9°C na amostra isenta de nanopartículas de prata para 338,4°C na amostra com a maior concentração destas nanoestruturas (~ 328 ppm).

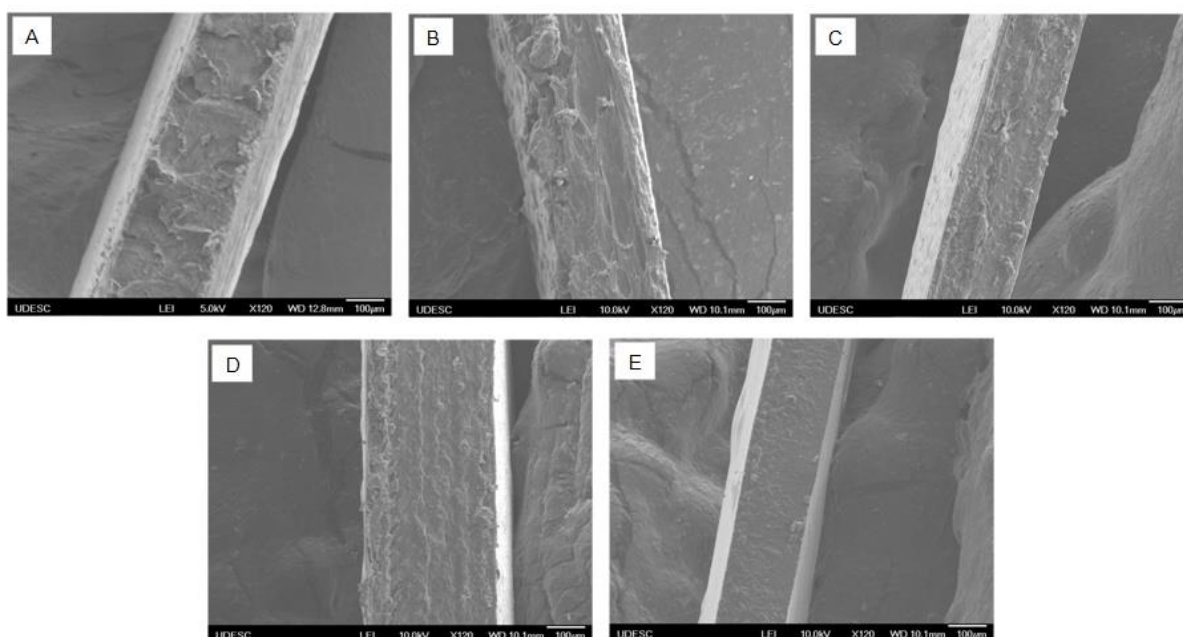


Figura 4 – Imagens de MEV-FEG das fraturas das membranas de PLLA contendo distintas quantidades de nanopartículas de prata: A) controle – 0 ppm; B) 13 ppm; C) 118 ppm; D) 230 ppm; E) 328 ppm.

Os resultados da temperatura de fusão (T_M) e grau de cristalinidade (X_c) foram obtidos a partir da curva do fluxo de calor em função da temperatura referente ao primeiro aquecimento da amostra. Já os resultados referentes à temperatura de transição vítrea (T_G) apresentados na Tabela 2 foram obtidos a partir da curva do fluxo de calor em função da temperatura para segundo aquecimento da amostra. A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, percebe-se que a temperatura de transição vítrea diminui com o aumento da concentração de nanopartículas de prata nas membranas de PLLA, enquanto que a cristalinidade do biopolímero tende a aumentar com o aumento da concentração de nanopartículas. A redução da estabilidade térmica ($T_{\text{ONSET-2}}$) e da temperatura de transição vítrea (T_G) devem estar relacionadas a um aumento da condutividade térmica das membranas de PLLA em

virtude da presença da prata metálica na forma nanoestruturada nesta matriz biopolimérica. Já a tendência de aumento da cristalinidade é resultado da ação nucleante das nanoestruturas, que contribuem para o surgimento dos esferulitos e, conseqüentemente, dos domínios cristalinos na matriz de PLLA.

Por fim, as análises microbiológicas das membranas de PLLA funcionalizadas com as nanopartículas de prata mostram que o uso de concentrações acima de aproximadamente 120 ppm são suficientes para inibir por completo o crescimento de bactérias na superfície das membranas biopoliméricas.

Tabela 1 – Resultados de TGA para as membranas de PLLA com distintas concentrações de nanopartículas de prata.

AMOSTRAS	T _{onset 1} (°C)	T _{máx 1} (°C)	Massa 1 (%)	T _{onset 2} (°C)	T _{máx2} (°C)	Massa 2 (%)	Resíduo (%)
PLLA 0 ppm	102,5	138,2	5,4	342,9	365,2	90,0	4,6
PLLA 13 ppm	103,6	138,7	5,5	342,8	364,4	87,7	6,8
PLLA 118 ppm	105,5	136,0	6,6	340,8	363,7	89,7	3,7
PLLA 230 ppm	103,9	135,0	6,3	339,5	364,8	91,7	2,0
PLLA 328 ppm	101,6	134,2	5,5	338,4	364,2	92,4	2,1

Tabela 2 – Resultados de DSC para as membranas de PLLA com distintas concentrações de nanopartículas de prata.

AMOSTRAS	T _m (°C)	ΔH _m (°C)	X _c (%)	T _g (°C)
PLLA 0 ppm	145,2	29,59	31,61	48,24
PLLA 13 ppm	145,7	26,67	28,49	47,89
PLLA 118 ppm	143,9	32,21	34,29	43,70
PLLA 230 ppm	145,0	37,49	40,05	40,60
PLLA 328 ppm	144,5	35,80	38,24	36,31

CONCLUSÕES

No presente trabalho, nanopartículas de prata foram sintetizadas em fase aquosa, e transferidas para um solvente orgânico mediante o uso de uma amina graxa. O clorofórmio contendo as nanopartículas de prata foi utilizado para solubilizar o PLLA e produzir membranas deste biopolímero por *casting* funcionalizadas com distintas concentrações de nanopartículas de prata.

Os resultados mostraram que quanto maior a quantidade de nanopartículas de prata, menor tende a ser a estabilidade térmica do polímero bem como a temperatura de transição vítrea. Por outro lado, o aumento da concentração de nanopartículas de prata nas membranas de PLLA tornou o biopolímero mais cristalino e mais frágil. As análises microbiológicas revelaram que membranas contendo ao menos aproximadamente 120 ppm de nanopartículas de prata inibiram por completo o crescimento de bactérias em sua superfície. Desta forma, pode-se concluir que a estratégia apresentada neste estudo para produzir membranas de PLLA com propriedades antibacterianas foi eficiente, permitindo que este biopolímero funcionalizado possa ser usado em diversas aplicações na área odontológica, como por exemplo, no tratamento de periodontite por regeneração tecidual guiada.

REFERÊNCIAS

- BORGES, D.C., *Análise microbiológica in vitro da dispersão de doxiciclina impregnada em membranas absorvíveis utilizadas nos procedimentos regenerativos periodontais e implantares*, Dissertação de Mestrado (Odontologia) – UFU, Uberlândia (2008);
- CHAKRABORTI, S., MANDAL, A.K., SARWAR, S., SINGH, P., CHAKRABORTY, R., CHAKRABARTI, P., *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (2014);
- FRATTINI, A., PELLEGRINI, N., NICASTRO, D., SANCTIS, O. *Mater. Chem. Phys.*, 94, p. 148 (2005);
- Gong, P.; Li, H.; Ele, X.; Wang, K.; Hu, J.; Tan, W.; Zhang, S.; Yang, X. *Nanotechnology*, 18, n.28, p. 604 (2007);
- Liu, Y., Zheng, Z., Zara, J. N., Hsu, C., Soofar, D. E., Lee, K. S., Siu, R. K., Miller, L. S., Zhang, X., Carpenter, D., Wang, C., Ting, K., Soo, C., *Biomaterials*, 33, p. 8745 (2012);
- lv, Y., Liu, H., Wang, Z., Liu, S., Hao, L., Sang, Y., Liu, D., Wang, J., Boughton, R. I. . *J. Membrane Sci.*, 331, p. 50 (2009);
- Manivel, A., Anandan, S., *Colloids and Surface A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 395, p. 38 (2012).
- Mendes, R.T., *Efeitos cardiovasculares da inibição da ciclooxigenase-2 em um modelo experimental de periodontite induzida por ligadura*. Dissertação de mestrado (Odontologia) – UEPG, Ponta Grossa (2012);
- Moritz, M., Geske-Moritz, M., *Chemical Engineering Journal*, 228, p. 596 (2013);
- SIMCHI, A., TAMJID, E., PISHBIN, F., BOCCACCINI, A. R., *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 7, p. 22 (2011);
- Stevanovic, M., Bracko, I., Milenkovic, M., Filipovic, N., Nunic, J., Filipic, M., Uskokovic, D. P., *Acta Biomaterialia*, 10, p. 151 (2014);
- Zheng, Z., Yin, W., Zara, J. N., Li, W., Kwak, J., Mamidi, R., Lee, M., Siu, R. K., Ngo, R., Wang, J., Carpenter, D., Zhang, X., Wu, B., Ting, K., Soo, C., *Biomaterials*, 31, p. 9293 (2010);

Synthesis and Characterization of Silver Nanoparticles for Application in the Development of Poly(L-lactic acid) Membranes with Antibacterial Properties

ABSTRACT

In the present study, silver nanoparticles (AgNp) were synthesized in aqueous media and transferred to chloroform by using a fatty amine as a phase transfer agent. The chloroform, containing the silver nanoparticles, was used to solubilize the PLLA. Membranes of this biopolymer functionalized with different concentration of silver nanoparticles were produced by the casting process. The nanoparticles were characterized by UV-Vis spectrophotometry, transmission electron microscopy (TEM) and atomic absorption spectrometry (AAS). The PLLA membranes were characterized by thermogravimetric analysis (TGA), differential scanning calorimetry (DSC) and field emission scanning electron microscopy (FEG-SEM). The antibacterial activity was evaluated according to the standard method ASTM E-2180, by using the Gram positive bacteria *Staphylococcus aureus*. The findings indicated that the thermal stability of the functionalized membranes reduced and the crystallinity raised by increasing the concentration of silver nanoparticles. In addition, the functionalized membranes produced with more the 120 $\mu\text{g AgNp} / \text{g PLLA}$ of silver nanoparticles showed outstanding antibacterial activity.

Keywords: silver nanoparticles, PLLA, membranes, functionalization, antibacterial