

## ESTUDO DA TRIBOCORROSÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L

Danillo P. Silva<sup>1</sup>, Ivan N. Bastos<sup>1</sup> e José M. Sánchez-Amaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Nova Friburgo - RJ, 28.625-570, Brasil*

<sup>2</sup>*Universidad de Cádiz, Parque Tecnológico TecnoBahía, El Puerto de Santa María, 11.510, Cádiz, España*

**Palavras-chave:** tribocorrosão, aço inoxidável, técnicas eletroquímicas.

**Resumo.** No presente trabalho, a tribocorrosão do aço inoxidável AISI 304L em meio a 0,9% m/v NaCl foi estudada. Um tribômetro do tipo pino-no-disco foi usado e, como contracorpo, esferas de alumina com 4,0 mm de diâmetro. Todos os experimentos foram realizados com duas cargas: 2,4 e 6,0 N. As técnicas eletroquímicas utilizadas foram potencial de circuito aberto, curvas de polarização e espectroscopia de impedância eletroquímica no potencial de corrosão. Além disso, antes e depois dos ensaios de potencial de circuito aberto, foram analisados os perfis de rugosidade. Micrografias das amostras também foram tiradas para mostrar as trilhas do desgaste. Nas curvas de polarização, foi possível observar que ambas as cargas aplicadas não alteram significativamente o potencial e a corrente de corrosão. A espectroscopia de impedância eletroquímica indicou uma redução do módulo maior para a carga de 6,0 N, mas a recuperação foi similar para ambas as cargas. Pelos resultados experimentais obtidos, há indicações que o mecanismo de desgaste foi principalmente de natureza abrasiva.

---

Endereços eletrônicos: [danillopedrosilva@yahoo.com.br](mailto:danillopedrosilva@yahoo.com.br), [inbastos@iprj.uerj.br](mailto:inbastos@iprj.uerj.br),  
[josemaria.sanchez@uca.es](mailto:josemaria.sanchez@uca.es)

## 1 INTRODUÇÃO

O fenômeno de tribocorrosão ocorre em diversos campos da engenharia, resultando na redução do tempo de vida esperado para o material e na piora do desempenho em equipamentos. Geralmente, a utilização de materiais sujeitos ao desgaste em ambientes corrosivos é acelerado por causa da sinergia entre os fenômenos de desgaste e de corrosão. Tais processos tribocorrosivos podem ser separados em duas categorias principais: atrito entre sólidos, e impacto de partículas e fluidos. O estudo do presente trabalho se concentra na tribocorrosão de dois sólidos ainda que submetidos a um eletrólito líquido.

O processo de tribocorrosão, na qual a superfície é rotacionada em contato com o contracorpo, é conhecido como *fretting* [5]. O tipo de desgaste nesse tipo de ensaio é relacionado com diversas variáveis, desde o preparo da amostra até a solução utilizada. Como o ensaio tribológico investiga propriedades superficiais, o preparo da superfície do material é de extrema importância e resulta em propriedades diferentes, desde a presença de um simples grau de polimento [1, 6] até tratamentos térmicos superficiais [12, 7].

O material utilizado no estudo desse fenômeno foi o aço inoxidável austenítico AISI 304L. Esse material possui boas propriedades anticorrosivas em grande parte das aplicações. Entretanto, esse material sofre por corrosão localizada quando há fenômenos de aeração diferencial. Algumas modelagens de tribocorrosão para aços inoxidáveis já foram feitas [11]. O presente trabalho visa investigar as propriedades eletroquímicas desse material, bem como sua superfície após o desgaste.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material estudado no presente trabalho foi o aço inoxidável AISI 304L. As amostras foram fornecidas pela empresa Titania, Ensayos y Proyectos Industriales, S.L. na forma de discos com diâmetros de 24 mm.

Além disso, como contracorpo do tribômetro, foram utilizadas esferas de aluminas de 4,0 mm de diâmetro. Após cada ensaio, uma nova esfera ou região da esfera não danificada foi utilizada. Tais esferas foram compradas da empresa Só Esferas e produzidas seguindo a norma internacional [3].

### 2.2 Preparo das Amostras

Antes dos ensaios, todas as amostras foram polidas com lixas d'água até a granulometria de #600, lavadas com água destilada, limpas com álcool etílico de pureza analítica e secadas com fluxo de ar quente.

### 2.3 Solução

Foi utilizada uma solução de 0,9% m/m NaCl que visa simular fluidos fisiológicos [2]. Para produzir tal solução, pesou-se 9,00 g de NaCl e misturou-se com água deionizada até completar 1,00 L de solução. Esta solução simula de forma simplificada o soro fisiológico em condição isotônica.

### 2.4 Equipamentos

O tribômetro utilizado é do tipo pino-no-disco, no qual é possível controlar a rotação e o posicionamento da região a ser atritada. Dados técnicos adicionais do tribômetro podem ser

obtidos em [9, 10]. A velocidade angular utilizada nos ensaios foi de 75 rpm e o raio de contato entre o contracorpo em relação ao centro da amostra foi de 8,0 mm, gerando velocidade escalar de 62,8 mm/s na trilha de desgaste. As cargas escolhidas para realizar os ensaios foram de 2,4 e 6,0 N. Além disso, um eletrodo de calomelano saturado foi utilizado como eletrodo de referência e um fio de platina como contraeletrodo. O potenciostato utilizado para realizar todas as medições foi o Princeton Applied Research VersaSTAT 3. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente devido à dificuldade de utilizar um banho termostaticado. Os perfis de rugosidade foram obtidos com um rugosímetro Mitutoyo SJ-210. As micrografias foram obtidas com um microscópio óptico Olympus CX-31.

## 2.5 Ensaios Realizados

Foram realizados diversos ensaios de caracterização para as amostras nas soluções escolhidas. Todos os ensaios de tribocorrosão foram realizados com rotação de 75 rpm (1,25 Hz) e à temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C. A seguir, são apresentados detalhes dos ensaios e os parâmetros utilizados.

**Potencial de Circuito Aberto.** Nesse ensaio, o potencial de circuito aberto foi medido com a amostra em rotação ininterruptamente por 2,0 h, sendo medido por 1,0 h sem carga, 0,5 h com a carga escolhida e mais 0,5 h sem carga, respectivamente. Os ensaios foram realizados sem carga e para as duas cargas escolhidas de 2,4 e 6,0 N. O perfil de rugosidade da amostra antes e depois de cada ensaio foi analisado utilizando uma taxa de varredura de 0,50 mm/s. Os valores utilizados nos filtros espaciais de perfil  $\lambda_c$  e  $\lambda_s$  foram, respectivamente, 0,8 mm e 2,5  $\mu\text{m}$  [4].

**Espectroscopia de Impedância Eletroquímica.** Curvas de impedância eletroquímica antes, durante e depois do desgaste foram levantadas no potencial de corrosão com a amostra em rotação aplicando cargas de 2,4 e 6,0 N. Inicialmente, o potencial de circuito aberto foi monitorado por 1,0 h e, em seguida, a impedância eletroquímica foi medida desde a frequência de 10 mHz até à frequência de 10 kHz com amplitude de 8 mV (rms). Após a medição da impedância sem carga, foi aplicada a carga escolhida e o potencial de circuito aberto foi monitorado por 0,5 h antes da medição da impedância durante o desgaste. Ao finalizar a medição da impedância durante o desgaste, a carga foi retirada e uma nova medida de impedância foi realizada.

**Polarização Catódica e Anódica.** Curvas de polarização com taxa de varredura de 0,50 mV/s foram levantadas com a amostra em rotação para ensaios sem e com aplicação de carga. Após o monitoramento do potencial de circuito aberto por 1,0 h, a varredura foi realizada. A varredura utilizada foi desde um potencial catódico de -200 mV vs. ECS até um potencial anódico de 1,4 V vs. ECS (considerando potenciais em relação ao eletrodo de referência). Este ensaio foi realizado para as duas cargas escolhidas (2,4 e 6,0 N), sendo a carga aplicada nos últimos 600 s da medição do potencial de circuito aberto.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Potencial de Circuito Aberto

O ensaio de potencial de circuito aberto para as cargas utilizadas pode ser visto na Figura 1, sendo observado o efeito da carga no potencial de circuito aberto, bem como a recuperação do potencial devido à formação da camada passiva. Na Figura 2 são apresentadas as trilhas desgastadas nos ensaios, e na Figura 3, os perfis das alturas das trilhas após o desgaste tribocorrosivo. É possível observar que a diferença da queda de potencial para as duas cargas

é pouco significativa para o aço AISI 304L. Pelo perfil de rugosidade, o desgaste é predominantemente produzido por deformação plástica [8]. Pretende-se futuramente investigar os aspectos do desgaste na escala nanométrica empregando a técnica de microscopia de força atômica.

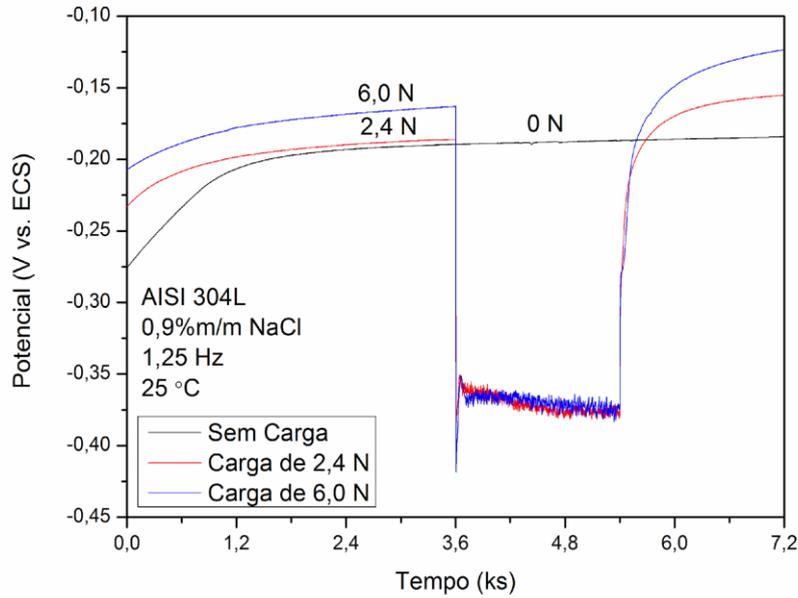


Figura 1: Efeito da carga no potencial de circuito aberto para o aço AISI 304L em meio a 0,9% m/m NaCl

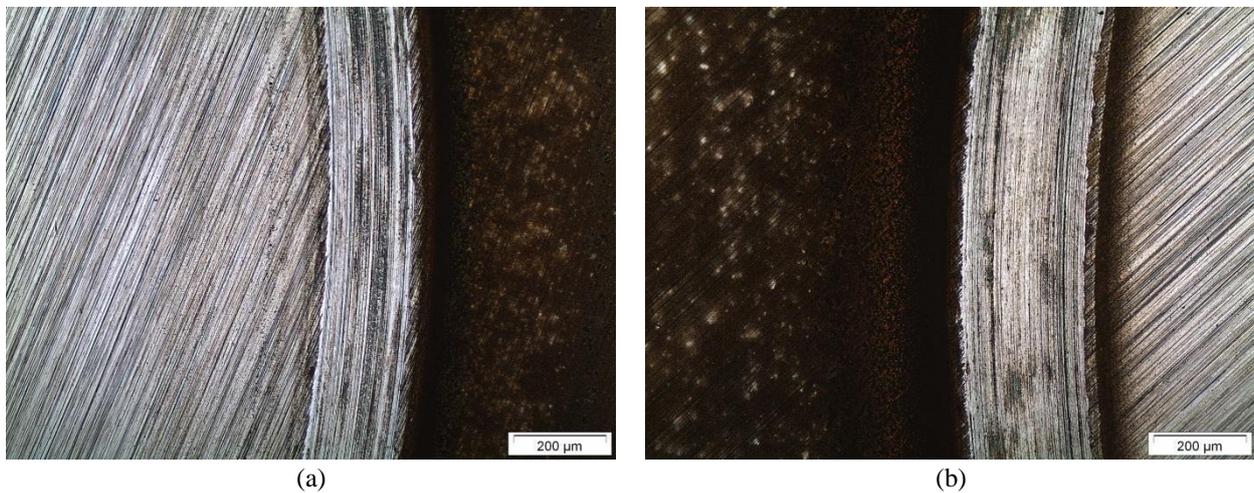


Figura 2: Micrografias ópticas das trilhas de desgaste dos ensaios de potencial de circuito aberto em meio a 0,9% m/m NaCl para o aço AISI 304L com: (a) carga de 2,4 N e (b) carga de 6,0 N

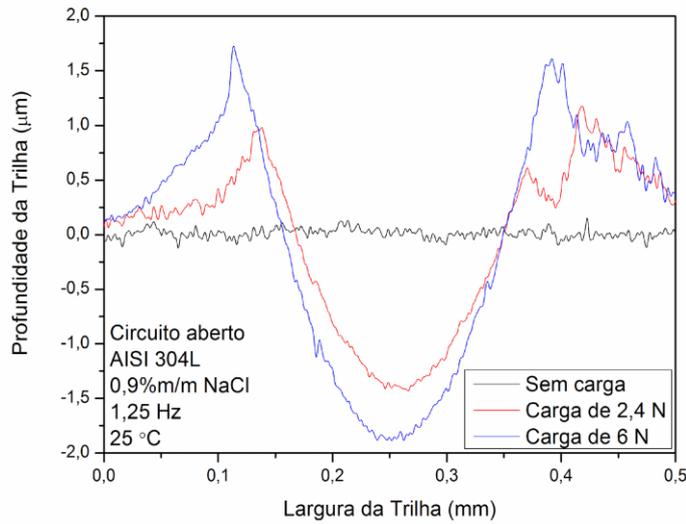


Figura 3: Perfil de rugosidade do ensaio de potencial de circuito aberto para o aço AISI 304L em meio a 0,9% m/m NaCl

### 3.2 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Os diagramas de espectroscopia de impedância eletroquímica realizadas antes, durante e depois do desgaste para as cargas de 2,4 e 6,0 N podem ser observados nas Figuras 4 e 5. O módulo da impedância antes e depois do desgaste tem praticamente o mesmo valor para as duas cargas. Entretanto, é possível observar no diagrama de Nyquist que a impedância durante o desgaste com a carga de 2,4 N é maior comparada à carga de 6,0 N, evidenciando que a impedância do sistema modifica-se em função da carga aplicada.

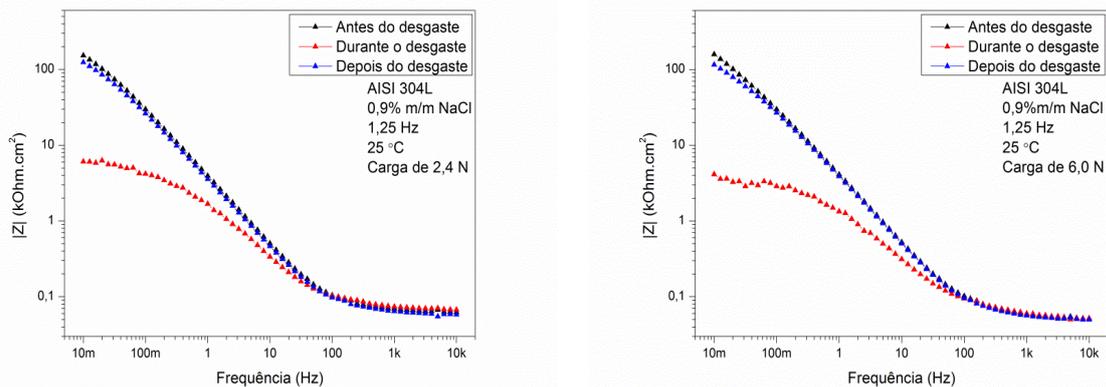


Figura 4: Efeito das cargas no módulo da impedância eletroquímica para o aço AISI 304L em meio a 0,9% m/m NaCl

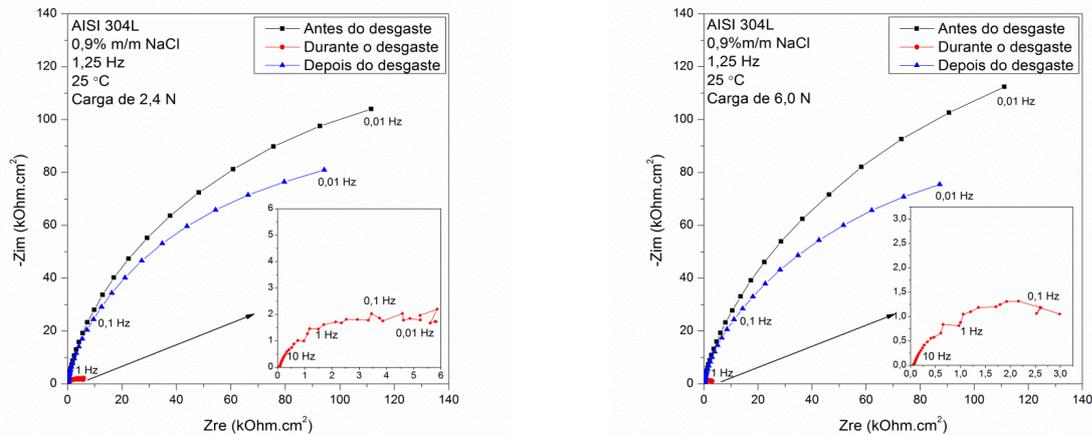


Figura 5: Efeito das cargas no diagrama de Nyquist da impedância eletroquímica para o aço AISI 304L em meio a 0,9% m/m NaCl

### 3.3 Polarização Catódica e Anódica

O ensaio de polarização do aço inoxidável pode ser observado na Figura 6. Nas curvas de polarização é possível observar uma dependência da densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) e do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) de acordo com a carga aplicada no aço AISI 304L. Enquanto a curva sem carga apresenta  $i_{corr}$  e  $E_{corr}$  em torno de  $370 \text{ nA.cm}^{-2}$  e  $190 \text{ mV vs ECS}$ , as curvas com desgaste exibem resultados bem diferentes. Uma análise da dispersão do potencial e da corrente indica um efeito menor para a maior carga. Esse fato pode indicar uma mudança no mecanismo de desgaste. Entretanto, a morfologia de desgaste nas amostras e nos contra-corpos de alumina indicam que o processo de abrasão é importante. Assim, com o aumento da carga ele se reflete num aumento da corrente de dissolução. Além disso, é possível realizar também uma correlação do coeficiente de atrito com a curva de polarização, comparando os efeitos do potencial no coeficiente de atrito de cada amostra [8]. A análise do corpo de prova e também do contra-corpo de alumina sugerem que a forma predominante de desgaste tribocorrosivo é por abrasão [5, 9], porém nota-se ainda pequenas regiões com desprendimento localizado de partículas.

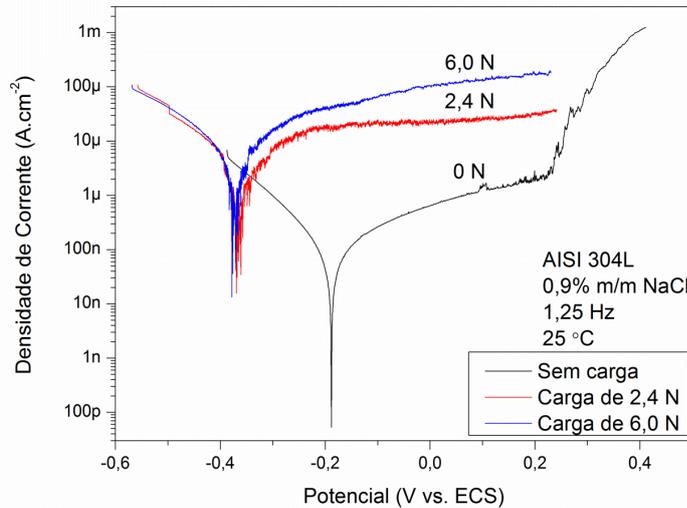


Figura 6: Efeito da carga nas curvas de polarização catódica e anódica para o aço AISI 304L em meio a 0,9% m/m NaCl

#### 4 CONCLUSÃO

O aço inoxidável AISI 304L foi ensaiado em solução salina de 0,9% m/m NaCl. Foram testadas as condições sem e com carga mecânica aplicada. As cargas foram de 2,4 e 6,0 N e o contracorpo utilizado foi uma esfera de alumina de 4,0 mm de diâmetro. Foi possível observar que as cargas aplicadas não alteraram de modo significativo o potencial. Entretanto, pelas micrografias ópticas e pelo perfil de rugosidade é possível observar um desgaste maior para a carga de 6,0 N, porém não sendo proporcional à carga aplicada. Já o diagrama de impedância obtido no potencial de corrosão mostrou uma redução do módulo com a aplicação da carga. A impedância após o ensaio se recuperou de forma similar para ambas as cargas. Nas curvas de polarização, observa-se uma corrente de repassivação mais elevada para a maior carga aplicada. Além disso, a dispersão dos valores de corrente e potencial durante o desgaste é menor para a maior carga aplicada. Especula-se que essa dispersão possa ter sido causada pela alteração da intensidade de diferentes mecanismos tribológicos para as duas cargas, tendo a predominância do desgaste por abrasão para as condições estudadas.

#### *Agradecimentos*

À FAPERJ, à CAPES e ao CNPq, pelo apoio financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. ABALLE, M. BETHENCOURT, F. J. BOTANA, M. MARCOS e J. M. SÁNCHEZAMAYA. Influence of the degree of polishing of alloy AA 5083 on its behaviour against localised alkaline corrosion. *Corrosion Science*, 46:1909-1920, 2004.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM F1875-98: Practice for fretting corrosion testing of modular implant interfaces: Hip femoral head-bore and cone taper interface. West Conshohocken. 2009. 6 p.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO 3290-2:2008: Rolling bearings – Balls – Part 2: Ceramic balls. Rio de Janeiro. 2008. 12 p.

- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT ISO 4287:2002: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro. 2002. 18 p.
- [5] D. LANDOLT. *Corrosion and surface chemistry of metals*. First ed. Lausanne: EPFL Press, 2007. 622 p.
- [6] I. MILOŠEV e B. KAPUN. The corrosion resistance of Nitinol alloy in simulated physiological solutions: Part 1: The effect of surface preparation. *Materials Science and Engineering C*, 32:1087-1096, 2012.
- [7] I. MILOŠEV e B. KAPUN. The corrosion resistance of Nitinol alloy in simulated physiological solutions: Part 2: The effect of surface treatment. *Materials Science and Engineering C*, 32:1068-1077, 2012.
- [8] D. P. SILVA. *Comportamento tribocorrosivo do aço inoxidável e de ligas de titânio em meio salino*. 166 p. Dissertação, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [9] R. C. C. SILVA. *Tribocorrosão do aço UNS S32750 em meio cloretado: instrumentação e resultados experimentais*. 138 p. Dissertação, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.
- [10] R. C. C. SILVA, R. P. NOGUEIRA e I. N. BASTOS. Tribocorrosion of UNS S32750 in chloride medium: Effect of the load level. *Electrochimica Acta*, 56:8839-8845, 2011.
- [11] A. STACHOWIAK e W. ZWIERZYCKI. Tribocorrosion modeling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type. *Tribology International*, 44:1216-1224, 2011.
- [12] H. D. VORA, R. S. RAJAMURE, S. N. DAHOTRE, Y. H. HO, R. BANERJEE e N. B. DAHOTRE. Integrated experimental and theoretical approach for corrosion and wear evaluation of laser surface nitrided, Ti–6Al–4V biomaterial in physiological solution. *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 37:153-164, 2014.