

UTILIZAÇÃO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NITINOL PARA PROJETOS EM ENGENHARIA BIOMÉDICA – UMA REVISÃO

Fabiano Viana Oliveira da Cunha Médice, CELTA e UFMG, fmedice@hotmail.com

Pedro Henrique Alves Martins, UFMG, pedromartins.eng@hotmail.com

Maria Aparecida Alves Martins, Izabela Hendrix, cidamartinsfisio@hotmail.com

Maria Teresa Paulino Aguiar, UFMG, teresa@ufmg.br

Antônio Eustáquio de Melo Pertence, UFMG, aempertence@gmail.com

Paulo Roberto Cetlin, UFMG, pcetlin@demec.ufmg.br

Resumo. Este estudo visa apresentar uma revisão bibliográfica sobre as aplicações da liga Nitinol voltadas à Bioengenharia. Através de pesquisas em periódicos, 135 artigos e patentes foram revisados e separados em grandes áreas para melhor avaliação das propriedades da liga em suas aplicações. Através de diversos revestimentos, uma maior biocompatibilidade é alcançada, além de facilitar a visão das peças e equipamentos por Ressonância Magnética e Raio X. Sua memória de forma, pseudoelasticidade e alta resistência a esforços de tensão, torção e a fadiga, permitem uma grande gama de aplicações, tais como stents, válvulas cardíacas e próteses ósseas.

Palavras chave: Nitinol, NiTi, Biomateriais, Memória de Forma, Pseudoelasticidade

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais metálicos biocompatíveis teve início em 1904 com a descoberta do aço inoxidável por Leon Guillet. Estes materiais possuíam propriedades adequadas como resistência mecânica e inércia química, sendo que sua aplicação em cirurgias em iniciou-se em 1926. Isto se deve pela a patente criada do aço inoxidável de 18Cr-8Ni contendo 2-4% de molibdênio e com baixo percentual de carbono. Ele possui resistência à corrosão suficiente para implantação no corpo humano. As ligas ferrosas disponíveis até então, além do cobre, zinco e alumínio, não apresentavam estabilidade química adequada, podendo produzir substâncias tóxicas devido sua oxidação seguida de dissolução dos óxidos dos metais em contato com fluidos do corpo humano. Posteriormente, foram desenvolvidas ligas mais resistentes à corrosão, como o aço inox, as ligas à base de níquel e metais como titânio e tântalo ou suas ligas (Mears, 1997).

A busca de materiais metálicos mais apropriados para implantes biocompatíveis deve-se às constantes falhas que os mesmos ainda apresentam, sendo elas ligadas a fisiologia humana (biocompatibilidade), mecânica (resistência) e química (corrosão). Assim, tornou-se necessário estudos por novas ligas metálicas com propriedades satisfatórias para aplicações específicas (Catão, 2010). Nesse contexto, as ligas que possuem o efeito memória de forma (Shape Memory Alloys – SMA) se tornam interessantes, pois são materiais capazes de recuperar seu formato original, quando um estímulo térmico ou mecânico específicos, são realizados (Huang et al, 2010).

Uma das ligas de memória de forma mais estudadas e utilizadas na engenharia são as ligas equiatômicas de NiTi, conhecidas comercialmente como Nitinol. O termo Nitinol é uma derivação de sua composição e do local em que foi descoberto, no quais os materiais são Níquel e Titânio e o local é o Naval Ordnance Laboratory. Foram descobertas por William J. Buehler e colaboradores que estudaram sobre suas propriedades durante pesquisas no Laboratório de Material Bélico Naval dos EUA em 1962 (Buehler, Gilfrich, e Wiley, 1963). Por possuir propriedades mecânicas únicas, tais como efeito memória de forma, pseudoelasticidade e biocompatibilidade, tem apresentado uma ampla gama de aplicação dentro da área de Engenharia Biomédica. O objetivo do presente estudo é apresentar uma revisão bibliográfica sobre as aplicações das Ligas de Memória de Forma de NiTi na Bioengenharia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica descritiva e teve como finalidade reunir e resumir resultados de pesquisas sobre o tema investigado. Foi realizada em 2016, 2017 e 2018, uma busca de artigos e patentes publicados nas diversas bases de dados científicas. Os textos na íntegra foram obtidos por meio eletrônico, através do Portal de Periódicos da CAPES, Google Scholar e PubMed, utilizando a palavra Nitinol como pesquisa. A partir dos resultados, filtros foram utilizados para realizar a separação de áreas por conteúdo.

3. RESULTADOS

No presente estudo foram encontrados 135 artigos que apresentaram publicação na temática Ligas de Memória de Forma, sendo 16 na área de Aplicações Gerais e Características da Liga, 38 na área de Cardiologia, 4 na área de Fisioterapia, 13 na área de Gastroenterologia, 30 na área de Histologia, 20 na área de Odontologia, e 26 na área de Ortopedia. Devido à área de Histologia ter integração com as outras áreas, os estudos de fluidos e tecidos com a liga se

encontram em ambas as divisões. Exemplos destas interações são; na Cardiologia, o estudo voltado à fadiga dos stents cardíacos (Saidane, Polizu e Yahia, 2007); na Odontologia, como a corrosão pela saliva (Wang, 2007), ou na Ortopedia, como a histocompatibilidade da liga com os tecidos (Bernard, 2011 & Wang, 2010). Assim, esses artigos contam em ambas as áreas, então não fechando o número de artigos.

4. DISCUSSÃO

4.1 Aplicações Gerais e Características da Liga

Nos estudos de Aplicações Gerais e Características, são descritas as propriedades da liga e aplicações da mesma na área de engenharia biomédica. Sua pseudoelasticidade permite que ela tenha maior deformação recuperável do que vários outros materiais, se tornando um material superelástico. Isto se deve à mudança da estrutura cristalina de austenita para martensita durante o carregamento (Fig.(1), de A para B), possibilitando que o material se deforme mais. Ao retirar a carga, ela tem sua recuperação elástica (Fig.(1), de B para C) em fase martensítica. E, por estar em temperatura de austenitização (Fig.(1), acima de A_F), ela recupera sua estrutura cristalina original (Fig.(1), de C para D). Isso permite aplicações em vários instrumentos médicos, tais como instrumentos cirúrgicos, como pinças e tesouras para laparoscopia (Machado e Savi, 2003).

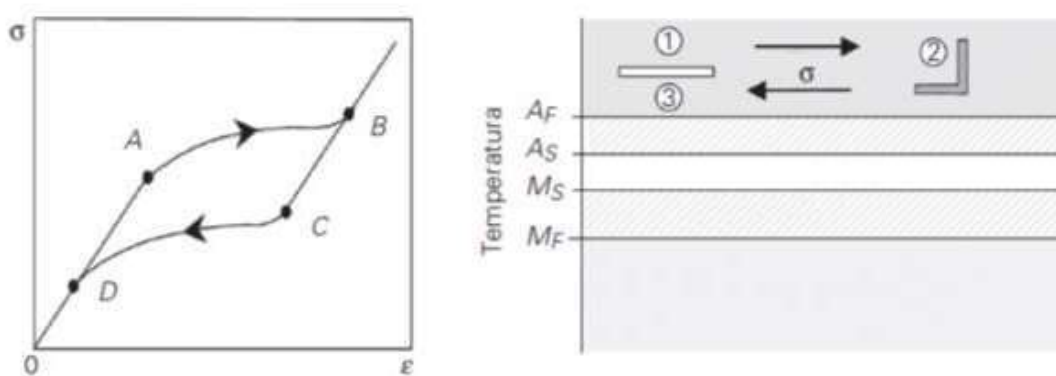


Figura 1. Gráfico de Histerese do Nitinol para Pseudoelasticidade. A_S , A_F , M_S e M_F são as temperaturas de Início (S) e Término (F) da formação Austenita (A) e Martensita (M) respectivamente. σ - ϵ é o gráfico Tensão x Deformação.

Adaptado de (Machado e Savi, 2003)

Devido à presença de duas fases metaestáveis, sendo uma a baixa temperatura denominada martensita e outra a alta temperatura austenita, o Nitinol possui o efeito de Memória de Forma, o qual é ativado variando a temperatura do material. Isto se deve à memória de forma introduzida ao material em temperatura de austenitização (Fig.(2), Número 1) e a utilização da liga em fase martensítica (Fig.(2), do Número 2 a 3). Quando o mesmo é reaquecido (Fig.(2), do Número 3 para o 4), a forma da memória é retornada. Esse efeito permite que o Nitinol assuma diferentes formatos, que pode ser alterado após ser introduzido no paciente. Os instrumentos que utilizam muito este efeito da Memória de Forma são os stents auto expansíveis, instrumentos para Cirurgias Endoscópicas e Placas Cirúrgicas de Imobilização (Duerig, Pelton e Stöckel, 1999 & Machado e Savi, 2003 & Tarniță, 2009).

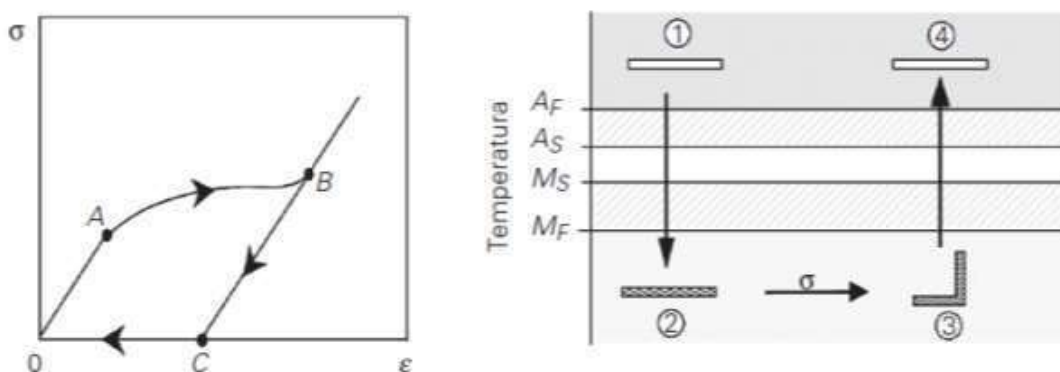


Figura 2. Gráfico de Histerese do Nitinol para Memória de Forma. A_S , A_F , M_S e M_F são as temperaturas de Início (S) e Término (F) da formação Austenita (A) e Martensita (M) respectivamente. σ - ϵ é o gráfico Tensão x Deformação.

Adaptado de (Machado e Savi, 2003)

Pelo fato das ligas de NiTi serem muito resistentes a esforços de tensão, torção e a fadiga, o Nitinol possui as propriedades necessárias para as aplicações citadas anteriormente e para outros instrumentos cirúrgicos, tal como ferramentas para correção óssea (Sachdeva, Miyazaki e Dughais, 2016). Esse material possui uma boa biocompatibilidade, evitando assim rejeição das peças; e compatibilidade biomecânica, sendo recomendado na utilização em implantes e pinos cirúrgicos (Duerig, Pelton e Stöckel, 1999 & Machado e Savi, 2003 & Tarniță, 2009 & Sachdeva, Miyazaki e Dughais, 2016). E, por não conter ferro e sim titânio em sua composição, ele é menos suscetível a campos magnéticos que o Aço Inox, produzindo imagens mais nítidas em ressonâncias magnéticas (Duerig, Pelton e Stöckel, 1999).

4.2 Cardiologia

Na Cardiologia, há diversos estudos de stents e melhoria dos mesmos, além de cabos guia para as cirurgias pouco invasivas (cateterismo cardíaco) para instalação de balão ou stents. Devido a propriedades da liga como a superelasticidade, alta resistência e excelente biocompatibilidade, essa liga pode substituir os stents de aço inox (O'Brien e Carroll, 2009 & Shayan e Chun, 2015). Focando na área de biopróteses, há um estudo sobre uma válvula cardíaca estudada in vitro à qual mostra que é possível criá-las a partir do Nitinol, porém há parâmetros a serem estudados para o correto comportamento mecânico (Loger et al, 2014). A Figura (3) ilustra a uso do Nitinol em válvulas cardíacas.



Figura 3. Modelo de válvula cardíaca de aço inoxidável com cobertura de uma fina camada de NiTi.
Adaptado de (Loger et al, 2014)

4.3 Fisioterapia

Na área de Próteses, há a utilização da liga para biomimetizar o funcionamento de um músculo. Devido a todas as propriedades citadas e a alta resistência à fadiga, a liga pode simular um músculo com o controle da corrente, a qual produz calor para ativar a memória de forma (Rediniotis e Lagoudas, 2001 & Şafak e Adams, 2002). Na área de Reabilitação, há mecanismos que auxiliam no trabalho onde as propriedades dos atuadores são modificadas sem alterar a estrutura. Isto se deve à pseudoelasticidade do Nitinol e a possibilidade de retomar a forma original após uma deformação plástica (Sabater-Navarro et al, 2015). A Figura (4) mostra a uso de molas de Nitinol em sistema de reabilitação das mãos.

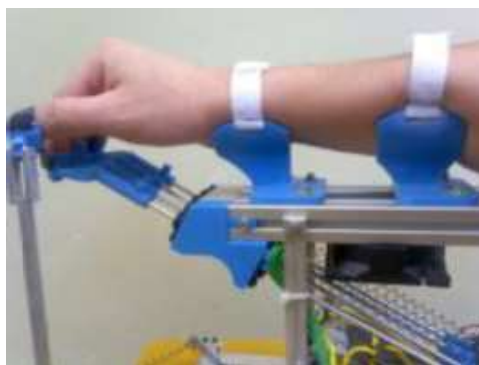


Figura 4. Uso de molas de NiTi em sistema de reabilitação das mãos.
Adaptado de (Sabater-Navarro et al, 2015)

4.4 Gastroenterologia

Na Gastroenterologia, há estudos focando desde a traquéia (Vearick, 2007) até colorretal (Domingo, 2005), mostrando a adaptação dos stents. Há também estudos de próteses, tais com a de esôfago (Liang, 2009 & Verschuur, 2006). Igualmente os stents endovasculares, os stents gastroenterológicos possuem acabamento mais liso que os de aço inox. Por serem mais flexíveis e macios, eles reduzem a chance de trauma à parede do intestino e emaranhamento do stent com o cabo guia, além de manterem a forma, devido ao efeito de memória de forma (Laasch, Martin e Maetani, 2005). A Figura (5) indica tipos de stents gastroenterológicos de Nitinol.



Figura 5. Tipos de stents gastroenterológicos de NiTi.
Adaptado de (Laasch, Martin e Maetani, 2005)

4.5 Histologia

Focando em como preparar as ligas e quais as reações dela com o corpo, há artigos que estudam a biocompatibilidade pela Imuno-histoquímica (Berger-Gorbet et al, 1996) e Hemocompatibilidade (Kealey, 2010 & Zhao, 2011), além das mudanças das propriedades devido à corrosão. Apesar de possuir boa biocompatibilidade, as mudanças das propriedades, que ocorrem devido à corrosão, dependem de como a superfície da liga foi tratada (Es-Souni, Es-Souni e Fischer-Brandies, 2005). Para auxiliar em detecção de cabos guia ou pequenos stents, Cheng (2006) propôs um novo revestimento de tântalo, que além de auxiliar na hemocompatibilidade, aumenta a radio opacidade da liga de Nitinol.

4.6 Odontologia

Na Odontologia, há estudos sobre fios para aparelhos dentários e suas melhorias no tratamento da correção da arcada dentária. Em aparelhos de correção da arcada dentária, a superelasticidade auxilia na rápida movimentação dos dentes sem que haja desconforto para o paciente, não obstruindo vasos sanguíneos e facilitando a formação de novos tecidos ósseos (Chen, Zhi e Arvystas, 1992). Na Endodontologia, a superelasticidade auxilia na construção das raízes curvas dos canais, auxiliando na preparação do canal radicular e nos implantes dentários (Thompson, 2000 & Yoo e Cho, 2012). A Figura (6) ilustra o uso de molas de Nitinol no tratamento da correção da arcada dentária.



Figura 6. Uso de molas de NiTi no tratamento da correção da arcada dentária.
Adaptado de (<http://drortho.com.br/aparelho-forsus-um-substituto-para-o-propulsor-de-herbst/>).

4.7 Ortopedia

Na área de Ortopedia, há estudos sobre implantes e a adaptação óssea, estudando a formação de estrutura óssea nos poros da prótese (Berger-Gorbet et al, 1996 & Bernard, 2011) e os tratamentos devidos (Filip, 2001). A liga de Nitinol, vem sendo utilizada na confecção de grampos ortopédicos em virtude de suas notáveis propriedades de memória de

forma, superelasticidade, e resistência à fadiga e à torção (Bahadora et al, 2017 & Silva, 2017). O NiTi tem excelente resistência à corrosão e a superfície óssea, quando esta é adequadamente tratada. Além disso, NiTi não libera íons níquel para o organismo (Villarinho et al, 2010).

Na recuperação de implantes ortopédicos, a liga auxilia devido à possibilidade de alterar a rigidez do implante sem uma segunda cirurgia. Isto diminui o tempo de recuperação do paciente e é devido ao efeito de memória de forma e de superelasticidade (Bansiddhi et al, 2008 & Pfeifer et al, 2013). A Figura (7) ilustra a utilização de um parafuso de Nitinol em um coelho e a biocompatibilidade do parafuso com o paciente, através da formação óssea ao redor do mesmo.

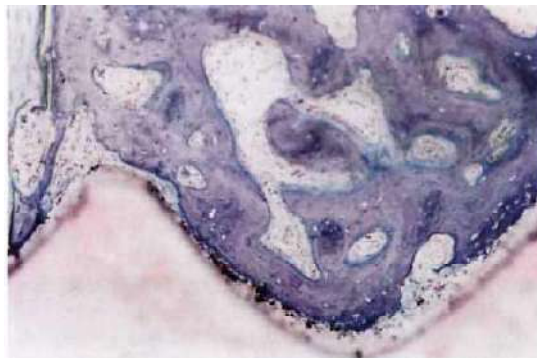


Figura 7. Microscopia de um parafuso de Nitinol implantado na metáfise tibial de um coelho por 3 semanas. Adaptado de (Berger-Gorbet et al, 1996).

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, aplicações da liga Nitinol foram revisadas por áreas de atuação. Apesar de trabalhar com tecido vivo, a liga Nitinol apresenta diversas características que a permite se adaptar ao meio em que está inserida. Seus diversos revestimentos permitem que sua biocompatibilidade seja a mais adequada à aquele meio, além de proporcionar melhor compatibilidade biomecânica e melhor visão, tanto por Ressonância Magnética, como por Raio X, de peças e equipamentos. Sua memória de forma, pseudoelasticidade e alta resistência a esforços de tensão, torção e a fadiga, permitem maior gama de aplicações, proporcionando aplicações em pequena escala, como stents e válvulas cardíacas; e em grande escala, como próteses ósseas e biomimetização de músculos.

Como novas oportunidades de trabalhos, os autores recomendam um melhor entendimento das propriedades termomecânicas e termoelétricas. Isto se deve a possibilidade da utilização da liga Nitinol como principais atuadores em mecanismos voltados à interação com tecido vivo e a próteses e órteses.

6. REFERÊNCIAS

- BANSIDDHI A. et al. Porous NiTi for bone implants: a review. **Acta biomaterialia**. 2008; Vol. 4, n. 4, p. 773-782.
- BAHADORA A. et al. Mechanical and Superelastic Properties of Laser welded Ti-Ni Shape-Memory Alloys Produced by Powder Metallurgy. **Journal Materials Processing Technology**. v. 248, p. 198-206, 2017
- BERGER-GORBET, M. et al. Biocompatibility testing of NiTi screws using immunohistochemistry on sections containing metallic implants. **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, v. 32, n. 2, p. 243-248, 1996.
- BERNARD, S. A. et al. Bone cell-materials interactions and Ni ion release of anodized equiatomic NiTi alloy. **Acta biomaterialia**, v. 7, n. 4, p. 1902-1912, 2011.
- BUEHLER, W. J.; GILFRICH, J. V.; WILEY, R. C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. **Journal of applied physics**, v. 34, n. 5, p. 1475-1477, 1963.
- CATÃO, C. D. S. **Avaliação de Ligas de Nitinol Nacionais: Perspectiva para Aplicação em Implantes Dentários**. 2010. 42p. Qualificação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- CHEN R, ZHI YF, ARVYSTAS MG. Advanced Chinese NiTi alloy wire and clinical observations. **The Angle orthodontist**. 1992; Vol. 62, n. 1, p. 59-66.
- CHENG, Y. et al. Surface modification of NiTi alloy with tantalum to improve its biocompatibility and radiopacity. **Journal of materials science**, v. 41, n. 15, p. 4961, 2006.
- TARNIȚĂ, D. et al. Properties and medical applications of shape memory alloys. **Rom J Morphol Embryol**, v. 50, n. 1, p. 15-21, 2009.
- DOMINGO, S. et al. Design, manufacture and evaluation of a NiTi stent for colon obstruction. **Bio-medical materials and engineering**, v. 15, n. 5, p. 357-365, 2005.
- DUERIG, T. W.; PELTON, A.; STÖCKEL, D. An overview of nitinol medical applications. **Materials Science and Engineering: A**, v. 273, p. 149-160, 1999.

- ES-SOUNI, M.; ES-SOUNI, M.; FISCHER-BRANDIES, H.. Assessing the biocompatibility of NiTi shape memory alloys used for medical applications. **Analytical and bioanalytical chemistry**, v. 381, n. 3, p. 557-567, 2005.
- FILIP, P. et al. Structure and surface of TiNi human implants. **Biomaterials**, v. 22, n. 15, p. 2131-2138, 2001.
- GOOGLE SCHOLAR. Disponível em: <scholar.google.com.br>. Acesso em: 06 nov. 2016.
- HUANG, W. M. et al. Shape memory materials. *Materials today*, v. 13, n. 7, p. 54-61, 2010.
- KEALEY, C. P. et al. In vitro hemocompatibility of thin film nitinol in stenotic flow conditions. **Biomaterials**, v. 31, n. 34, p. 8864-8871, 2010.
- LAASCH HU, MARTIN DF, MAETANI I. Enteral stents in the gastric outlet and duodenum. **Endoscopy**. 2005; Vol. 37, n. 01, p. 74-81.
- LIANG, J. et al. Polyester connecting ring improves outcome in nitinol composite artificial esophagus. **ASAIO Journal**, v. 55, n. 5, p. 514-518, 2009.
- LOGER K et al. Fabrication and evaluation of nitinol thin film heart valves. **Cardiovascular Engineering and Technology**. 2014; Vol. 5, n. 4, p. 308-316.
- MACHADO, L. G.; SAVI, M. A. Medical applications of shape memory alloys. **Brazilian journal of medical and biological research**, v. 36, n. 6, p. 683-691, 2003.
- MEARS, D. C. Metals in medicine and surgery. **International Metals Reviews**, v. 22, n. 1, p. 119-155, 1977.
- O'BRIEN B, CARROLL W. The evolution of cardiovascular stent materials and surfaces in response to clinical drivers: a review. **Acta biomaterialia**. 2009; Vol. 5, n. 4, p. 945-958.
- PERIÓDICOS DA CAPES. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 06 nov 2016.
- PFEIFER R et al. Adaptable orthopedic shape memory implants. **Procedia CIRP**. 2013; Vol. 5, p.253-258.
- PUBMED. Disponível em: < www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed >. Acesso em: 06 nov 2016.
- REDINIOTIS OK, LAGOUDAS DC. Shape memory alloy actuators as locomotor muscles. **Progress in Astronautics and Aeronautics**. 2001; Vol. 195, p. 483-500.
- SABATER-NAVARRO, J. M. et al. Hand neuro-rehabilitation system using Nitinol spring actuators. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 63, p. 50-56, 2015.
- SAFAK KK, ADAMS GG. Modeling and simulation of an artificial muscle and its application to biomimetic robot posture control. **Robotics and Autonomous Systems**. 2002; Vol. 41, n. 4, p. 225-243.
- SAIDANE, K.; POLIZU, S.; YAHIA, L. Accelerated fatigue behavior and mechano-physical characterizations of in vitro physiological simulation of nitinol stents. **Journal of applied biomaterials & biomechanics: JABB**, v. 5, n. 2, p. 117-124, 2007.
- SACHDEVA, R. C. L.; MIYAZAKI, S.; DUGHAIISH, Z. H. Nitinol as a biomedical material. **Reference Module in Materials Science and Materials Engineering**. Oxford: Elsevier, 2016.
- SHAYAN M; CHUN Y. An overview of thin film nitinol endovascular devices. **Acta biomaterialia**. 2015; Vol. 21, p. 20-34.
- SILVA, V., V. Biomaterial Applications as Orthopedic Devices and Bone Tissue Engineering. **Revista Saúde e Meio Ambiente – RESMA**, v. 5, n.2, p. 14-27, agosto/dezembro, 2017
- THOMPSON SA. An overview of nickel–titanium alloys used in dentistry. **International endodontic journal**. 2000; Vol. 33, n. 4, p. 297-310.
- VEARICK, S. B. et al. Development and in vivo testing of a Nitinol tracheal stent. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, v. 83, n. 1, p. 216-221, 2007.
- VERSCHUUR, E. ML et al. A new esophageal stent design (Niti-S stent) for the prevention of migration: a prospective study in 42 patients. **Gastrointestinal endoscopy**, v. 63, n. 1, p. 134-140, 2006.
- VILLARINHO, D. et al. Shape Memory Alloy: A Preliminary Study of Nitinol Judet Staples for Future Application in Flail Chest. **Revista Hospital de Clinicas de Porto Alegre HCPA**, 30, 2010.
- YOO YS, CHO YB. A comparison of the shaping ability of reciprocating NiTi instruments in simulated curved canals. **Restorative dentistry & endodontics**. 2012; Vol. 37, n. 4, p. 220-227.
- WANG, A. et al. Bone histocompatibility of surface modified nitinol memory alloy by coating titanium-niobium alloy. **Chinese journal of reparative and reconstructive surgery**, v. 24, n. 7, p. 797-800, 2010.
- WANG, J. et al. Stress corrosion cracking of NiTi in artificial saliva. **Dental materials**, v. 23, n. 2, p. 133-137, 2007.
- ZHAO, T. et al. Hemocompatibility investigation of the NiTi alloy implanted with tantalum. **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, v. 22, n. 10, p. 2311, 2011.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CAPES por nos permitir acesso a todos os artigos necessários para a realização deste artigo.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.