

**EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE NITI EM
ENDODONTIA: REVISÃO DE LITERATURA**

*EVOLUTION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NITI ALLOY IN ENDODONTIC:
LITERATURE REVIEW*

Recebido em: 09/02/2023

Aceito em: 04/09/2023

DOI: 10.47296/salusvita.v42i01.420

RAIMUNDO SALES DE OLIVEIRA NETO¹

MURILO PRIORI ALCALDE²

RODRIGO RICCI VIVAN³

THAIS DE MORAES SOUZA⁴

MARCO ANTONIO HÚNGARO DUARTE⁵

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Odontológicas Aplicadas com ênfase em Endodontia - Faculdade de Odontologia de Bauru – Universidade de São Paulo – 17012-901. (<https://orcid.org/0000-0002-4726-8106>), raimundoneto@usp.br

² Professor do departamento de Dentística, Endodontia e Materiais Odontológicos da Faculdade de Odontologia de Bauru – Universidade de São Paulo – 17012-901. (<https://orcid.org/0000-0001-8735-065X>), malcalde@fob.usp.br

³ Professor do departamento de Dentística, Endodontia e Materiais Odontológicos da Faculdade de Odontologia de Bauru – Universidade de São Paulo – 17012-901. (<https://orcid.org/0000-0002-0419-5699>), rodrigo.vivan@fob.usp.br

⁴ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciências Odontológicas Aplicadas com ênfase em Saúde Coletiva - Faculdade de Odontologia de Bauru – Universidade de São Paulo – 17012-901. (<https://orcid.org/0000-0003-2030-1903>), msouzathais@usp.br

⁵ Professor Titular e Chefe do departamento de Dentística, Endodontia e Materiais Odontológicos da Faculdade de Odontologia de Bauru – Universidade de São Paulo – 17012-901. (<https://orcid.org/0000-0003-3051-737X>), mhungaro@fob.usp.br

Autor correspondente:

RAIMUNDO SALES DE OLIVEIRA NETO

E-mail: raimundoneto@usp.br

Estudo de Revisão

EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE NITI EM ENDODONTIA: REVISÃO DE LITERATURA

EVOLUTION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF NITI ALLOY IN ENDODONTIC: A LITERATURE REVIEW

RESUMO

A liga de Níquel-Titânio (NiTi) foi desenvolvida pelo metalurgista William Buehler e, desde então, tem sido introduzida em diversas áreas de conhecimento, devido às suas propriedades de super elasticidade e efeito de memória de forma. A introdução do NiTi revolucionou a endodontia, visto que aumentou a segurança no preparo biomecânico de canais radiculares com curvatura, mesmo em diâmetros maiores. Sua utilização apresentou vantagens em relação às limas de aço inoxidável. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão de literatura sobre as evoluções nas propriedades mecânicas da liga de NiTi utilizada na fabricação de instrumentos endodônticos. A pesquisa bibliográfica foi realizada através da busca eletrônica de artigos indexados em língua inglesa em bases de dados eletrônicas (PubMed, Scopus e Web of Science), sem restrição de tempo. Os artigos foram selecionados com base no cruzamento dos seguintes descritores: NiTi, Nitinol, Endodontics. Os primeiros instrumentos endodônticos fabricados em NiTi eram predominantemente austenísticos e, por isso, eram menos flexíveis. A incorporação de novos métodos de fabricação, como o eletropolimento e os tratamentos térmicos, permitiu a confecção de instrumentos com maiores quantidades de fase martensita e, conseqüentemente, mais flexíveis, o que proporciona maior segurança no tratamento de canais com curvatura e com maior resistência à fratura. A introdução do NiTi na fabricação dos instrumentos endodônticos está relacionada a uma maior segurança e eficiência no preparo biomecânico, quando comparado à instrumentação com limas de aço inoxidável. Os tratamentos térmicos permitiram a produção de instrumentos mais flexíveis e resistentes à fratura no preparo de canais curvos.

Palavras-chave: Endodontia; Instrumentos odontológicos; Avaliação das propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The Nickel-Titanium (NiTi) alloy was developed by the metallurgist William Buehler, and it has since been introduced into various fields of knowledge due to its properties of super elasticity and shape memory effect. The introduction of NiTi revolutionized endodontics as it enhanced safety in the biomechanical preparation of curved root canals, even in larger diameters. Its utilization offered advantages over stainless steel files. This study aimed to conduct a literature review of the advancements in the mechanical properties of the NiTi alloy used in the manufacturing of endodontic instruments. The bibliographical research was conducted from the electronic search of articles indexed in English in electronic databases (PubMed, Scopus, and Web of Science) without time restrictions. Articles were identified by crossing the following descriptors: NiTi, Nitinol, and Endodontics. The initial endodontic instruments made of NiTi were austenitic, and, therefore, less flexible. The incorporation of new manufacturing methods, such as electropolishing and heat treatments allowed the creation of instruments with higher amounts of martensitic phase, resulting in greater flexibility and enhanced fracture resistance and ensuring safety in treating curved canals. The introduction of NiTi in the manufacturing of endodontic instruments is associated with an improved safety and efficiency in biomechanical preparation compared to stainless steel files. Heat treatments enabled the production of more flexible and fracture-resistant instruments for curved canal preparation.

Keywords: Endodontics; Dental instruments; Mechanical tests.

INTRODUÇÃO

Inúmeros aparatos foram incorporados no tratamento endodôntico, como, por exemplo, os localizadores apicais, os sensores radiográficos, o microscópio operatório e os motores endodônticos. No entanto, a introdução da liga de Níquel-Titânio (NiTi) revolucionou a endodontia (GAVINI; SANTOS; CALDEIRA; MACHADO *et al.*, 2018). O desenvolvimento desse material na fabricação das limas possibilitou o preparo biomecânico dos canais radiculares com o emprego de instrumentação mecanizada de forma segura, permitindo o preparo do terço apical com diâmetros de maior calibre, mesmo em curvaturas acentuadas (ARIAS; PETERS, 2022; CELIK; TASDEMIR; ER, 2013).

O metalurgista William Buehler, durante o estudo de ligas intermetálicas para serem utilizadas na fuselagem de submarinos e mísseis do projeto Polaris, foi o responsável pela descoberta da liga de NiTi. A liga foi nomeada com o acrônimo de NiTiNol, no qual Ni seria de Níquel, Ti de Titânio e Nol de Naval Ordnance Laboratory. Essa liga se destaca por possuir as propriedades de super elasticidade e efeito de memória de forma, decorrentes de mudanças na cristalografia da liga, entre as duas fases principais, austenita e martensita (ALIPOUR; TAROMIAN; GHOMI; ZARE *et al.*, 2022; GUTMANN; GAO, 2012; KUHN; TAVERNIER; JORDAN, 2001). Essas propriedades levaram o níquel-titânio a aplicações bem-sucedidas em diversas áreas do conhecimento, inclusive na endodontia, na fabricação de limas. Desta forma, o objetivo do presente estudo é fazer uma revisão de literatura sobre as principais evoluções nas propriedades mecânicas dos instrumentos endodônticos fabricados em Níquel-Titânio.

METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir da busca eletrônica de artigos indexados em língua inglesa em bases de dados eletrônicas (PubMed, Scopus e Web of Science), sem restrição de tempo. Foram excluídos os artigos que não estivessem em língua inglesa, que não se adequassem ao objetivo do estudo, que não estivessem disponíveis na íntegra, além de relatos de casos e relatos de séries de casos. Foram verificados os artigos a partir do cruzamento dos seguintes descritores: NiTi, Nitinol, Endodontics, que foram combinados com operadores booleanos.

REVISÃO DA LITERATURA

Os autores Civjan, Huget & Desimon (1975) foram os primeiros a propor o uso do NiTi como material para a fabricação de instrumentos endodônticos. No entanto, somente em 1988, com WALIA; BRANTLEY; GERSTEIN (1988), o primeiro artigo avaliou as propriedades mecânicas de limas endodônticas fabricadas em NiTi. Os autores desse trabalho

avaliaram a viabilidade na fabricação de um instrumento endodôntico de Nitinol e as suas propriedades de flexão e torção. Para esse estudo, foram fabricadas limas de Nitinol de calibre #15 e secção transversal triangular para serem comparadas com instrumentos de aço inoxidável com a mesma secção transversal e do mesmo calibre. Observou-se que as limas de Nitinol possuíam 2 a 3 vezes mais flexão elástica do que as limas de aço inoxidável, além de maior resistência à fratura em torção. Desde então, novos instrumentos foram fabricados com o intuito de produzir limas com alta eficiência de corte, mantendo uma excelente resistência à fratura mesmo em áreas de grande dificuldade anatômica, e conseqüentemente diminuindo o tempo necessário para o preparo dos canais radiculares.

A primeira geração de instrumentos de NiTi é denominada de instrumentos de NiTi convencional, Super Elástico (SE) ou pseudoelástico. Esses são fabricados de NiTi austenítico em temperatura ambiente e, portanto, são mais rígidos. O primeiro instrumento rotatório de NiTi foi introduzido no mercado em 1992, desenvolvido por John McSpadden (GAVINI; SANTOS; CALDEIRA; MACHADO *et al.*, 2018). Outros instrumentos fabricados em NiTi SE são: ProFile e ProFile GT (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça), LightSpeed (Kerr, Califórnia, Estados Unidos), Quantec (Kerr, Califórnia, Estados Unidos), K3 (SybronEndo, Orange, Estados Unidos), MTwo (VDW, Munique, Alemanha), Hero 642 (Micro Mega, Besançon, França).

O Sistema ProTaper, lançado no mercado pela Dentsply, representou uma segunda geração de instrumentos de NiTi SE, em decorrência da variação progressiva do taper (conicidade) nos instrumentos. Isso diferiu dos outros comercializados até então, que apresentavam taper progressivo ao longo da parte de trabalho (CLAUDER; BAUMANN, 2004). Essa característica, combinada com uma secção transversal triangular convexa, permite que o instrumento trabalhe em áreas específicas do canal durante o preparo no sentido coroa-ápice, reduzindo o contato com as paredes dentinárias e, conseqüentemente, diminuindo o estresse no instrumento, além de proporcionar maior flexibilidade (ANKRUM; HARTWELL; TRUITT, 2004; PAQUE; MUSCH; HULSMANN, 2005).

Apesar das inúmeras vantagens dos primeiros instrumentos de NiTi em comparação com os instrumentos de aço inoxidável, como a redução no tempo necessário para realizar a instrumentação e excelente capacidade de corte, a separação ou fratura do instrumento era uma conseqüência que ocorria com certa frequência, devido à baixa flexibilidade desses primeiros instrumentos de NiTi (SONNTAG; GUNTERMANN; KIM; STACHNISS, 2003). Existem duas razões principais pelas quais um instrumento fratura. A primeira delas é a fadiga cíclica, principalmente em casos de dentes com curvatura acentuada, em que o instrumento é submetido a sucessivos ciclos de tensão e compressão, criando microtrincas que podem se propagar até levar à fratura (MADARATI; HUNTER; DUMMER, 2013; MARTINS; MARTINS; BRAZ FERNANDES; SILVA, 2022). Este fenômeno é responsável por 44,3% das fraturas de instrumentos (SATTAPAN; NERVO; PALAMARA; MES-

SER, 2000). A segunda é a fadiga torcional, que ocorre principalmente em canais atrésicos ou constrictos, onde a ponta do instrumento ou outra parte desse fica presa, enquanto a lima continua a rotacionar até que a força supere o limite de deformação plástica, terminando por levar à fratura (ALCALDE; DUARTE; BRAMANTE; DE VASCONSELOS; TANOMARU *et al.*, 2018; PEDULLÀ; LO SAVIO; BONINELLI; PLOTINO *et al.*, 2016). Este tipo de fratura ocorre na maioria dos casos (SATTAPAN; NERVO; PALAMARA; MESSER, 2000). Assim, algumas estratégias passaram a ser adotadas para aumentar a eficiência e segurança no uso de limas rotatórias de NiTi. Fatores como composição química, microestrutura, constituição das fases e procedimentos de fabricação podem influenciar nas propriedades mecânicas das ligas de NiTi (GOO; KWAK; HA; PEDULLÀ *et al.*, 2017). A maioria das ligas de NiTi usadas na fabricação de instrumentos endodônticos são feitas de aproximadamente 56% de Níquel e 44% de Titânio, porém pequenos ajustes na razão desses dois elementos causam mudança na temperatura de transformação, o que tem relação direta com as suas propriedades mecânicas (GUTMANN; GAO, 2012).

O eletropolimento da superfície, introduzido no mercado pela FKG em 1999 na fabricação dos instrumentos do sistema Race, foi umas das primeiras estratégias para modificar o processo de fabricação com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas. Após o processo de produção dos instrumentos, que normalmente são fabricados por usinagem e que naturalmente apresentam defeitos superficiais, a FKG passou a realizar um tratamento de superfície para reduzir esses defeitos (ANDERSON; PRICE; PARASHOS, 2007). Os instrumentos são conectados a um ânodo e são imersos junto com outro eletrodo em um banho de eletrólitos com temperatura controlada, seguido pela passagem de corrente elétrica direta para a solução. O metal no ânodo é dissolvido na solução, enquanto uma reação de redução ocorre no cátodo. Esse processo altera a composição e a textura da superfície do instrumento e cria uma camada de óxido superficial mais homogênea que atua como um filme protetor, com menos defeitos e tensões superficiais residuais (CHI; ZHANG; LIN; TONG, 2021). No processo, a resistência à corrosão do metal é aumentada, juntamente com características de superfície melhoradas, além de aumentar a eficiência de corte e a resistência à fadiga cíclica quando comparado aos instrumentos de NiTi convencionais (ANDERSON; PRICE; PARASHOS, 2007; SCHAFFER; OITZINGER, 2008). Outros instrumentos com eletropolimento incluem o EndoSequence (Brasseler, Savannah, EUA) e o OneShape (Micro Mega, Besançon, França).

Outra forma de se modificar as propriedades mecânicas dos instrumentos fabricados com liga de NiTi, é por meio de tratamentos térmicos. Esses tratamentos térmicos modificam a temperatura específica necessária para as transformações conformacionais ou cristalográficas da liga (KUHN; JORDAN, 2002; KUHN; TAVERNIER; JORDAN, 2001). Várias empresas possuem seus tratamentos térmicos específicos, e, conseqüentemente, não se têm todos os detalhes de como funcionam, devido ao segredo de fabricação. No entanto,

basicamente, consistem em aquecer o material até uma determinada temperatura e resfriá-lo sob condições ambientais controladas, durante um certo período, com o objetivo de afetar a temperatura de transição entre as fases, modificando a resistência à fadiga cíclica e torcional (ARIAS; PETERS, 2022; GOO; KWAK; HA; PEDULLÀ *et al.*, 2017). Esses processos térmicos podem resultar em ligas com super elasticidade e com efeito de memória de forma (ZANZA; REDA; TESTARELLI, 2022; ZUPANC; VAHDAT-PAJOUH; SCHÄFER, 2018).

Em 2008, a Sybron Endo introduziu no mercado uma série de instrumentos mecanizados submetidos a um tratamento térmico especial, em que uma nova fase é adicionada à estrutura cristalina da liga, melhorando a flexibilidade, além de diminuir parte do estresse interno causado pelo processo de usinagem. Essa fase da liga NiTi (a fase R ou romboédrica) é uma fase intermediária entre a martensita e a austenita e ocorre durante a transformação martensítica ao resfriar para a fase R, bem como da fase R para martensita (KUHN; JORDAN, 2002). Materiais em fase R podem ser fabricados por torção, o que leva a menos defeitos de superfície do que os materiais fabricados por usinagem. Os instrumentos TF (Sybron Endo) são fabricados a partir do fio de NiTi bruto na estrutura cristalina da austenita, transformando-o em uma fase diferente da estrutura cristalina (fase R) por um processo de aquecimento e resfriamento (GAMBARINI; GEROSA; DE LUCA; GARALA *et al.*, 2008; ZUPANC; VAHDAT-PAJOUH; SCHÄFER, 2018). Os instrumentos TF precisam de um menor tempo para determinar um ângulo de 45° nos 03 mm finais do instrumento em comparação com instrumentos fabricados em NiTi pseudo-elástico, o que confere maior flexibilidade ao instrumento (GAMBARINI; GEROSA; DE LUCA; GARALA *et al.*, 2008; GAMBARINI; PLOTINO; GRANDE; AL-SUDANI *et al.*, 2011). Outro exemplo de instrumento semelhante é o sistema K3XF (SybronEndo).

Em 2007, a Tulsa Dental desenvolveu uma nova liga de NiTi, denominada de M-Wire, composta de Nitinol 508 (Níquel 55,8% e o restante de Titânio), a qual recebe um tratamento térmico único antes dos instrumentos serem fabricados. Esse material contém martensita e fase R, enquanto mantém a super elasticidade (SHEN; ZHOU; ZHENG; PENG *et al.*, 2013). A martensita pode ser facilmente deformada, mesmo sob menor estresse, enquanto a austenita necessita de maior estresse para deformar (GUTMANN; GAO, 2012). Assim, esses instrumentos apresentam maior flexibilidade e resistência à fadiga e estão associados a um menor tempo de instrumentação em comparação ao Protaper Universal, porque conseguem se deformar plasticamente ao invés de fraturar (JOHNSON; LLOYD; KUTTLER; NAMEROW, 2008; RUIZ-SÁNCHEZ; FAUS-LLÁCER; FAUS-MATOSES; ZUBIZARRETA-MACHO *et al.*, 2020). Os sistemas ProFile GT-X (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça), ProFile Vortex (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça), Protaper Next (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça), Reciproc (VDW, Munique, Alemanha) e Wave One (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça) são exemplos de instrumentos fabricados em NiTi com tratamento térmico M-Wire.

Um novo tipo de tratamento térmico, denominado de CM (controle de memória) foi introduzido no mercado pela DS Dental (Johnson City, EUA). Após a usinagem do Nitinol SE508, um processo de aquecimento e resfriamento dá a liga um tipo de controle sobre a efeito de memória de forma, permitindo que os instrumentos sejam previamente dobrados e conferindo maior flexibilidade e resistência à fadiga. Esses instrumentos contêm menor quantidade de Níquel que as limas fabricadas a partir de NiTi SE (54 a 57%), além de possuírem maior quantidade de martensita em temperatura ambiente, o que melhora as propriedades mecânicas da liga, uma vez que a martensita apresenta um menor módulo de elasticidade (ZUPANC; VAHDAT-PAJOUH; SCHÄFER, 2018). Esses retornam à sua forma original, quando autoclavados (GOO; KWAK; HA; PEDULLÀ *et al.*, 2017; TABASSUM; ZAFAR; UMER, 2019). Apresentam maior resistência à fadiga cíclica e maior flexibilidade do que instrumentos de NiTi SE e com tratamento M-Wire (ALCALDE; DUARTE; BRAMANTE; DE VASCONSELOS; TANOMARU-FILHO *et al.*, 2018; GOO; KWAK; HA; PEDULLÀ *et al.*, 2017; VIVAN; COSTA; CONTI; DUQUE *et al.*, 2022). Exemplos de instrumentos fabricados com tratamento térmico CM: Hyflex CM (Coltene, Altstetten, Suíça), Prodesign S e Logic 2 (Easy, Belo Horizonte, Brasil).

Em 2012, a Dentsply Sirona introduziu um novo tratamento térmico para as liga de NiTi CM, no qual os instrumentos são repetidamente aquecidos e resfriados, resultando em uma superfície com coloração correspondente à espessura da camada de Óxido de Titânio, o que resulta na melhoria da eficiência de corte e da resistência à corrosão, sem afetar a super elasticidade das limas (PLOTINO; GRANDE; COTTI; TESTARELLI *et al.*, 2014). Esses instrumentos possuem maior quantidade de martensita estável do que as ligas em M-Wire (DE-DEUS; SILVA; VIEIRA; BELLADONNA *et al.*, 2017). Os sistemas X1 Blue (MKLife), Vortex Blue (VDW, Munique, Alemanha), Wave One (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suíça), X1 e Sequence Rotary File (MK Life, Porto Alegre, Rio Grande do Sul) são exemplos de instrumentos com esse tipo de tratamento térmico

Recentemente, a Coltene lançou no mercado o sistema Hyflex EDM feito de liga de NiTi CM 495, fabricado usando erosão através de descargas elétricas, ou seja, por um processo de usinagem sem contato. Esse método de fabricação “derrete” a superfície do metal, parcialmente evaporando pequenas porções do metal. Em seguida, o instrumento é tratado termicamente em temperaturas entre 300 e 600°C por um intervalo entre 10 minutos e 5 horas, antes ou depois de uma limpeza ultrassônica e um banho ácido. Esse método otimiza a resistência à fratura e aumenta a resistência à fadiga cíclica (PEDULLÀ; LO SAVIO; BONINELLI; PLOTINO *et al.*, 2016).

Outro tratamento recentemente empregado na fabricação de limas é o Max-Wire (Martensita-Austenita Electropolimento-flex), desenvolvido pela FKG. Os instrumentos da família XP (Finisher, Finisher-Retreatment, Endo Shaper), em temperatura igual ou maior que 35°C, mudam da fase martensita para austenita, dando ao instrumento um formato

semicircular. Isso permite que o instrumento realize um movimento excêntrico e trabalhe em uma maior porcentagem do volume do canal radicular durante o preparo biomecânico. Assim, em temperatura ambiente, o instrumento está em fase martensítica e, quando é introduzido no canal radicular, altera a sua forma devido à memória molecular da fase austenita (ELNAGHY, A.; ELSAKA, S., 2018; ELNAGHY, A. M.; ELSAKA, S. E., 2018).

Novos sistemas que executam cinemática de movimento excêntrico, como o Protaper Next (Dentsply), OneShape e Revo-S (Micro Mega), têm sido considerados como uma nova geração de instrumentos de NiTi (LIANG; YUE, 2022). O sistema Protaper Next apresentou uma maior resistência à fadiga cíclica que os sistemas ProTaper e HyFlex CM (ELNAGHY, 2014).

Recentemente, a Dentsply introduziu no mercado o sistema TruNatomy, em que, segundo o fabricante, a combinação do desenho do instrumento e do tratamento térmico permitem maior flexibilidade e modelagem eficiente. Esse possui secção transversal descentralizada com conicidade regressiva e apenas duas arestas de corte com um design fino do fio de NiTi, com diâmetro máximo do núcleo de 0,8 mm (KIM; JEON; SEO, 2021). Outro sistema comercializado recentemente é o EdgeFile (Edge, Albuquerque, EUA), que possui um tratamento térmico denominado de Fire-Wire. Esse tratamento térmico permite a confecção de instrumentos com maior flexibilidade e resistência à fadiga cíclica (BUENO; CURY; VASQUES; SIVIERI-ARAUJO *et al.*, 2019). Além desses instrumentos, há pouco tempo foram lançados os instrumentos flat (com uma superfície plana na área de corte dos instrumentos) como as limas Flat File (MK Life, Porto Alegre, Rio Grande do Sul), que, apesar de apresentarem maior eficácia de corte, demonstraram piores performances no tempo, rotação e torque máximo até a fratura (SILVA; ALCALDE; MARTINS; VIEIRA *et al.*, 2023).

CONCLUSÃO

A introdução do NiTi na endodontia trouxe maior segurança e efetividade durante o preparo biomecânico. Embora o processo de fabricação dos instrumentos endodônticos de liga de NiTi não seja detalhadamente conhecido devido à propriedade intelectual das fabricantes, é evidente a relação entre os tratamentos térmicos e as propriedades mecânicas dos instrumentos. A resistência à fadiga torcional e cíclica dos instrumentos é influenciada pela composição química, tratamento térmico e configuração geométrica. Portanto, instrumentos com mais martensita em sua composição e com tratamentos térmicos, são mais flexíveis que os instrumentos de NiTi SE, sendo primordiais para a confecção de instrumentos mais flexíveis e com maior resistência à fratura no preparo de canais curvos.

REFERÊNCIAS

- ALCALDE, M. P.; DUARTE, M. A. H.; BRAMANTE, C. M.; DE VASCONSELOS, B. C. *et al.* Cyclic fatigue and torsional strength of three different thermally treated reciprocating nickel-titanium instruments. **Clinical Oral Investigations**, v. 22, n. 4, p. 1865-1871, May 2018. Article.
- ALCALDE, M. P.; DUARTE, M. A. H.; BRAMANTE, C. M.; DE VASCONSELOS, B. C. *et al.* Cyclic fatigue and torsional strength of three different thermally treated reciprocating nickel-titanium instruments. **Clin Oral Investig**, 22, n. 4, p. 1865-1871, May 2018.
- ALIPOUR, S.; TAROMIAN, F.; GHOMI, E. R.; ZARE, M. *et al.* Nitinol: From historical milestones to functional properties and biomedical applications. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H-Journal of Engineering in Medicine**, 236, n. 11, p. 1595-1612, Nov 2022.
- ANDERSON, M. E.; PRICE, J. W.; PARASHOS, P. Fracture resistance of electropolished rotary nickel-titanium endodontic instruments. **J Endod**, 33, n. 10, p. 1212-1216, Oct 2007.
- ANKRUM, M. T.; HARTWELL, G. R.; TRUITT, J. E. K3 endo, ProTaper, and ProFile systems: Breakage and distortion, in severely curved roots of molars. **Journal of Endodontics**, 30, n. 4, p. 234-237, Apr 2004.
- ARIAS, A.; PETERS, O. A. Present status and future directions: Canal shaping. **Int Endod J**, 55 Suppl 3, n. Suppl 3, p. 637-655, May 2022.
- BUENO, C. R. E.; CURY, M. T. S.; VASQUES, A. M. V.; SIVIERI-ARAÚJO, G. *et al.* Cyclic fatigue resistance of novel Genius and Edgefile nickel-titanium reciprocating instruments. **Brazilian Oral Research**, 33, 2019.
- CELIK, D.; TASDEMIR, T.; ER, K. Comparative Study of 6 Rotary Nickel-Titanium Systems and Hand Instrumentation for Root Canal Preparation in Severely Curved Root Canals of Extracted Teeth. **Journal of Endodontics**, 39, n. 2, p. 278-282, Feb 2013.
- CHI, D.; ZHANG, Y.; LIN, X.; TONG, Z. Cyclic fatigue resistance for six types of nickel titanium instruments at artificial canals with different angles and radii of curvature. **Dent Mater J**, 40, n. 5, p. 1129-1135, Sep 30 2021.
- CIVJAN, S.; HUGET, E. F.; DESIMON, L. B. Potential applications of certain nickel-titanium (nitinol) alloys. **J Dent Res**, 54, n. 1, p. 89-96, Jan-Feb 1975.
- CLAUDER, T.; BAUMANN, M. A. ProTaper NT system. **Dent Clin North Am**, 48, n. 1, p. 87-111, Jan 2004.
- DE-DEUS, G.; SILVA, E. J.; VIEIRA, V. T.; BELLADONNA, F. G. *et al.* Blue Thermo-mechanical Treatment Optimizes Fatigue Resistance and Flexibility of the Reciproc Files. **J Endod**, 43, n. 3, p. 462-466, Mar 2017.
- ELNAGHY, A.; ELSAKA, S. Cyclic fatigue resistance of XP-endo Shaper compared with different nickel-titanium alloy instruments. **Clinical Oral Investigations**, 22, n. 3, p. 1433-1437, Apr 2018.

ELNAGHY, A. M. Cyclic fatigue resistance of ProTaper Next nickel-titanium rotary files. **International Endodontic Journal**, 47, n. 11, p. 1034-1039, Nov 2014.

ELNAGHY, A. M.; ELSAKA, S. E. Torsional resistance of XP-endo Shaper at body temperature compared with several nickel-titanium rotary instruments. **International Endodontic Journal**, 51, n. 5, p. 572-576, May 2018.

GAMBARINI, G.; GEROSA, R.; DE LUCA, M.; GARALA, M. *et al.* Mechanical properties of a new and improved nickel-titanium alloy for endodontic use: an evaluation of file flexibility. **Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod**, 105, n. 6, p. 798-800, Jun 2008.

GAMBARINI, G.; PLOTINO, G.; GRANDE, N. M.; AL-SUDANI, D. *et al.* Mechanical properties of nickel-titanium rotary instruments produced with a new manufacturing technique. **Int Endod J**, 44, n. 4, p. 337-341, Apr 2011.

GAVINI, G.; SANTOS, M. D.; CALDEIRA, C. L.; MACHADO, M. E. L. *et al.* Nickel-titanium instruments in endodontics: a concise review of the state of the art. **Braz Oral Res**, 32, n. suppl 1, p. e67, Oct 18 2018.

GOO, H. J.; KWAK, S. W.; HA, J. H.; PEDULLÀ, E. *et al.* Mechanical Properties of Various Heat-treated Nickel-titanium Rotary Instruments. **J Endod**, 43, n. 11, p. 1872-1877, Nov 2017.

GUTMANN, J. L.; GAO, Y. Alteration in the inherent metallic and surface properties of nickel-titanium root canal instruments to enhance performance, durability and safety: a focused review. **Int Endod J**, 45, n. 2, p. 113-128, Feb 2012.

JOHNSON, E.; LLOYD, A.; KUTTLER, S.; NAMEROW, K. Comparison between a novel nickel-titanium alloy and 508 nitinol on the cyclic fatigue life of ProFile 25/.04 rotary instruments. **J Endod**, 34, n. 11, p. 1406-1409, Nov 2008.

KIM, H.; JEON, S. J.; SEO, M. S. Comparison of the canal transportation of ProTaper GOLD, WaveOne GOLD, and TruNatomy in simulated double-curved canals. **Bmc Oral Health**, 21, n. 1, Oct 2021.

KUHN, G.; JORDAN, L. Fatigue and mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. **J Endod**, 28, n. 10, p. 716-720, Oct 2002.

KUHN, G.; TAVERNIER, B.; JORDAN, L. Influence of structure on nickel-titanium endodontic instruments failure. **J Endod**, 27, n. 8, p. 516-520, Aug 2001.

LIANG, Y. H.; YUE, L. Evolution and development: engine-driven endodontic rotary nickel-titanium instruments. **International Journal of Oral Science**, 14, n. 1, Dec 2022.

MADARATI, A. A.; HUNTER, M. J.; DUMMER, P. M. H. Management of Intracanal Separated Instruments. **Journal of Endodontics**, 39, n. 5, p. 569-581, May 2013.

MARTINS, J. N. R.; MARTINS, R. F.; BRAZ FERNANDES, F. M.; SILVA, E. What Meaningful Information Are the Instruments Mechanical Testing Giving Us? A Comprehensive Review. **J Endod**, 48, n. 8, p. 985-1004, Aug 2022.

PAQUE, F.; MUSCH, U.; HULSMANN, M. Comparison of root canal preparation using RaCe and ProTaper rotary Ni-Ti instruments. **International Endodontic Journal**, 38, n. 1, p. 8-16, Jan 2005.

PEDULLÀ, E.; LO SAVIO, F.; BONINELLI, S.; PLOTINO, G. *et al.* Torsional and Cyclic Fatigue Resistance of a New Nickel-Titanium Instrument Manufactured by Electrical Discharge Machining. **J Endod**, 42, n. 1, p. 156-159, Jan 2016.

PLOTINO, G.; GRANDE, N. M.; COTTI, E.; TESTARELLI, L. *et al.* Blue treatment enhances cyclic fatigue resistance of vortex nickel-titanium rotary files. **J Endod**, 40, n. 9, p. 1451-1453, Sep 2014.

RUIZ-SÁNCHEZ, C.; FAUS-LLÁCER, V.; FAUS-MATOSSES, I.; ZUBIZARRETA-MACHO, Á. *et al.* The Influence of NiTi Alloy on the Cyclic Fatigue Resistance of Endodontic Files. **J Clin Med**, 9, n. 11, Nov 21 2020.

SATTAPAN, B.; NERVO, G. J.; PALAMARA, J. E.; MESSER, H. H. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. **J Endod**, 26, n. 3, p. 161-165, Mar 2000.

SCHAFFER, E.; OITZINGER, M. Cutting efficiency of five different types of rotary nickel-titanium instruments. **Journal of Endodontics**, 34, n. 2, p. 198-200, Feb 2008.

SHEN, Y.; ZHOU, H. M.; ZHENG, Y. F.; PENG, B. *et al.* Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. **J Endod**, 39, n. 2, p. 163-172, Feb 2013.

SILVA, E.; ALCALDE, M. P.; MARTINS, J. N. R.; VIEIRA, V. T. L. *et al.* To flat or not to flat? Exploring the impact of flat-side design on rotary instruments using a comprehensive multimethod investigation. **Int Endod J**, Aug 18 2023.

SONNTAG, D.; GUNTERMANN, A.; KIM, S. K.; STACHNISS, V. Root canal shaping with manual stainless steel files and rotary Ni-Ti files performed by students. **Int Endod J**, 36, n. 4, p. 246-255, Apr 2003.

TABASSUM, S.; ZAFAR, K.; UMER, F. Nickel-Titanium Rotary File Systems: What's New? **Eur Endod J**, 4, n. 3, p. 111-117, 2019.

VIVAN, R. R.; COSTA, V.; CONTI, L. C.; DUQUE, J. A. *et al.* Effect of nickel-titanium alloys on root canal preparation and on mechanical properties of rotary instruments. **Braz Oral Res**, 36, p. e085, 2022.

WALIA, H. M.; BRANTLEY, W. A.; GERSTEIN, H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. **J Endod**, 14, n. 7, p. 346-351, Jul 1988.

ZANZA, A.; REDA, R.; TESTARELLI, L. Nickel-Titanium Rotary Instruments: Mechanical and Metallurgical Characteristics. *In: Clin Pract*. Switzerland, 2022. v. 12, p. 94-96.

ZUPANC, J.; VAHDAT-PAJOUH, N.; SCHÄFER, E. New thermomechanically treated NiTi alloys - a review. **Int Endod J**, 51, n. 10, p. 1088-1103, Oct 2018.