

Evolução histórica dos instrumentos endodônticos de níquel-titânio: revisão de literatura

Historical evolution of nickel-titanium endodontic instruments: literature review

Evolución histórica del instrumental endodóntico de níquel-titanio: revisión de literatura

DOI:10.34119/bjhrv7n3-323

Submitted: May 07th, 2024

Approved: May 28th, 2024

Claudio Batista Rodrigues

Graduando em Odontologia

Instituição: Faculdade Planalto Central

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: claudiorodriguescorretor@hotmail.com

Victor Igor Carvalho de Araújo

Graduando em Odontologia

Instituição: Faculdade Planalto Central

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: victorigor009@gmail.com

Wallison de Aragão Pereira

Graduando em Odontologia

Instituição: Faculdade Planalto Central

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: dr.wallisonpereira@gmail.com

Alison Guimarães Gomes

Graduando em Odontologia

Instituição: Faculdade Planalto Central

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: alisonguigo@gmail.com

Ephraim Batista Soares dos Santos

Graduando em Odontologia

Instituição: Faculdade Planalto Central

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: ephraibatista@gmail.com

Gisela Gusmão Frois

Especialista em Implantodontia

Instituição: Faculdades Unidas do Norte Minas (FUNORTE)

Endereço: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

E-mail: gifrois@yahoo.com.br

Diego Gomes Vilela

Mestre em Clínicas Odontológicas
Instituição: São Leopoldo Mandic
Endereço: Campinas, São Paulo, Brasil
E-mail: diego.vilela@hotmail.com

Gustavo Oliveira Campos

Doutor em Odontologia
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Endereço: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil
E-mail: gustavocampos03@hotmail.com

RESUMO

Introdução: os instrumentos endodônticos confeccionados com uma liga de Níquel e Titânio foram importantes para a endodontia atual. Com o aprimoramento da liga metálica utilizada para a fabricação possibilitou uma automatização e conferiu excelentes propriedades para os instrumentos tais como uma melhor flexibilidade e resistência a fratura. Objetivos: discorrer por meio de revisão de literatura a evolução dos instrumentos endodônticos de níquel titânio, além dos fatores envolvidos nessa evolução, como a necessidade de melhorar a flexibilidade, resistência e durabilidade dos instrumentos. Metodologia: é baseada na revisão integrativa da literatura. É uma abordagem sistematizada que permite a compilação e análise de estudos anteriores para aprofundar a compreensão em uma área específica. Tal processo é fundamental para compreender as tendências atuais, lacunas existentes e direções futuras em um determinado campo de estudo. Resultados: a revisão aponta um progresso notável na tecnologia de instrumentos endodônticos de NiTi, sobretudo nas áreas de flexibilidade, resistência à fratura e avanços nos tratamentos termomecânicos. Houve clara tendência na literatura de promover inovação contínua, com o objetivo de melhorar eficácia e segurança nos procedimentos endodônticos. Conclusão: a composição química e o tratamento termomecânico durante a fabricação afetam as propriedades mecânicas e o comportamento da liga NiTi. O conhecimento dessas propriedades e da sua associação com as propriedades metalúrgicas é fundamental para entender o comportamento dos instrumentos de Níquel-Titânio durante a formação do Sistema de Canais Radiculares.

Palavras-chave: níquel-titânio, endodontia, instrumentos endodônticos.

ABSTRACT

Introduction: Endodontic instruments made from an alloy of nickel and titanium have been important for today's endodontics. With the improvement of the metal alloy used for manufacturing, it has been possible to automate and give the instruments excellent properties such as better flexibility and resistance to fracture. Objectives: To review the literature on the evolution of nickel titanium endodontic instruments, as well as the factors involved in this evolution, such as the need to improve the flexibility, strength and durability of the instruments. Methodology: This is based on an integrative literature review. It is a systematized approach that allows the compilation and analysis of previous studies to deepen understanding in a specific area. This process is fundamental to understanding current trends, existing gaps and future directions in a given field of study. Results: The review points to notable progress in NiTi endodontic instrument technology, particularly in the areas of flexibility, fracture resistance and advances in thermomechanical treatments. There has been a clear trend in the literature to promote continuous innovation, with the aim of improving efficacy and safety in endodontic procedures. Conclusion: The chemical composition and thermomechanical

treatment during manufacture affect the mechanical properties and behavior of the NiTi alloy. Knowledge of these properties and their association with metallurgical properties is fundamental to understanding the behavior of Nickel-Titanium instruments during the formation of the Root Canal System.

Keywords: nickel-titanium, endodontics, endodontic instruments.

RESUMEN

Introducción: Los instrumentos endodónticos fabricados con una aleación de níquel y titanio han sido importantes para la endodoncia actual. Con la mejora de la aleación metálica utilizada para su fabricación, ha sido posible automatizar y dotar a los instrumentos de excelentes propiedades, como una mayor flexibilidad y resistencia a la fractura. **Objetivos:** Revisar la literatura sobre la evolución de los instrumentos endodónticos de níquel titanio, así como los factores implicados en esta evolución, como la necesidad de mejorar la flexibilidad, resistencia y durabilidad de los instrumentos. **Metodología:** Se basa en una revisión bibliográfica integradora. Se trata de un enfoque sistematizado que permite recopilar y analizar estudios anteriores para profundizar en el conocimiento de un área específica. Este proceso es fundamental para comprender las tendencias actuales, las lagunas existentes y las orientaciones futuras en un campo de estudio determinado. **Resultados:** La revisión señala notables avances en la tecnología de instrumentos endodónticos de NiTi, especialmente en las áreas de flexibilidad, resistencia a la fractura y avances en los tratamientos termomecánicos. Se ha observado una clara tendencia en la literatura a promover la innovación continua, con el objetivo de mejorar la eficacia y la seguridad en los procedimientos endodónticos. **Conclusión:** La composición química y el tratamiento termomecánico durante la fabricación afectan a las propiedades mecánicas y al comportamiento de la aleación NiTi. El conocimiento de estas propiedades y su asociación con las propiedades metalúrgicas es fundamental para comprender el comportamiento de los instrumentos de Níquel-Titanio durante la formación del Sistema de Conductos Radiculares.

Palabras clave: níquel-titanio, endodoncia, instrumentos endodónticos.

1 INTRODUÇÃO

O sucesso do tratamento endodôntico está relacionado à adequada limpeza, desinfecção e formatação do sistema de canais radiculares, além de uma obturação hermética capaz de manter a sanitização químico-mecânica realizada (Schilder, 1974). O preparo mecânico e a modelagem do Sistema de Canais Radiculares (SCR) são etapas fundamentais, sob auxílio dos instrumentos endodônticos, pois favorecem os demais processos e o sucesso da terapia endodôntica (Peters, 2004).

A história da endodontia é rica em momentos fundamentais para a evolução da especialidade. O aço inoxidável era o metal utilizado na fabricação dos instrumentos endodônticos. Porém, possuía limitações, como baixa flexibilidade e alto módulo de elasticidade, características relacionadas com iatrogenias durante a prática endodôntica, tais

como: zip, rasgo radicular, perfuração, transporte de canais e instrumentos fraturados (Peters, 2004).

Os avanços nas técnicas usadas e os resultados positivos permitiram o desenvolvimento de uma nova forma de endodontia. Isso permitiu a automatização dos aparelhos e um processo terapêutico mais eficiente e uma maior comodidade para os pacientes. O sucesso dos procedimentos endodônticos é elevado pelo uso de novos instrumentos e expertise anatômica. Aliando a maior resistência dos instrumentais combinada com a experiência do profissional, há redução no risco de falha (Santos *et al.*, 2021).

A introdução da liga Níquel-Titânio (NiTi) na Endodontia representou um marco, desde que Walia, Brantley e Gerstein (1988) utilizaram o NiTi como material alternativo à confecção de instrumentos endodônticos. A liga de NiTi destacou-se por oferecer maior flexibilidade comparada ao aço inoxidável, reduzindo significativamente o risco de falhas como fraturas de instrumentos e erros de procedimento. Esse avanço representou um salto qualitativo na prática endodôntica, minimizando riscos e melhorando os resultados dos tratamentos (Walia, Brantley, Gerstein, 1988).

A utilização dos instrumentos endodônticos de NiTi tem como vantagem otimizar a instrumentação em canais curvos, bem como minimizar os erros de procedimento durante o tratamento endodôntico. Também proporciona maior agilidade na preparação dos canais, pois apresentam sequências reduzidas em comparação às técnicas manuais, e uma maior segurança em razão do seu baixo módulo de elasticidade, que confere à sua grande flexibilidade, permitindo o trabalho em áreas de curvaturas com uma redução do transporte do canal e menor curva de aprendizado (Gao *et al.*, 2010). No entanto, embora as limas de NiTi proporcionem vantagens, também apresentam risco de fratura durante o uso relacionado às motores, ocorrendo por meio de fadiga flexional e torcional, o que pode reduzir o índice de sucesso dos tratamentos (Oliveira *et al.*, 2023).

Portanto, o objetivo do presente trabalho é discorrer, por meio de revisão de literatura, sobre a evolução dos instrumentos endodônticos de níquel-titânio, além dos fatores envolvidos nessa evolução, como a necessidade de melhorar a flexibilidade, resistência e durabilidade dos instrumentos.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada na presente pesquisa é baseada na revisão integrativa da literatura. É uma abordagem sistematizada que permite a compilação e análise de estudos

anteriores para aprofundar a compreensão em uma área específica. Tal processo é fundamental para compreender as tendências atuais, lacunas existentes e direções futuras em um determinado campo de estudo (Souza, 2010).

A presente revisão foi constituída nas etapas a seguir: a) construção da pergunta norteadora; b) busca nas bases de dados; c) coleta de dados; d) análise crítica dos estudos encontrados e incluídos; e) interpretação dos resultados e f) apresentação dos resultados (Souza, 2010).

Foram utilizadas as bases de dados: PubMed (MEDLINE), Biblioteca Virtual em Saúde (BVS) e Google Acadêmico. Nessas bases, utilizou-se os descritores controlados em Ciências da Saúde (DeCs) e do Medical Subject Headings (MeSH) (2024) para identificar os descritores universais. Em seguida, foram cruzados com o operador booleano OR, conforme demonstra a Tabela 1.

Tabela 1. Estratégia de busca utilizada na pesquisa

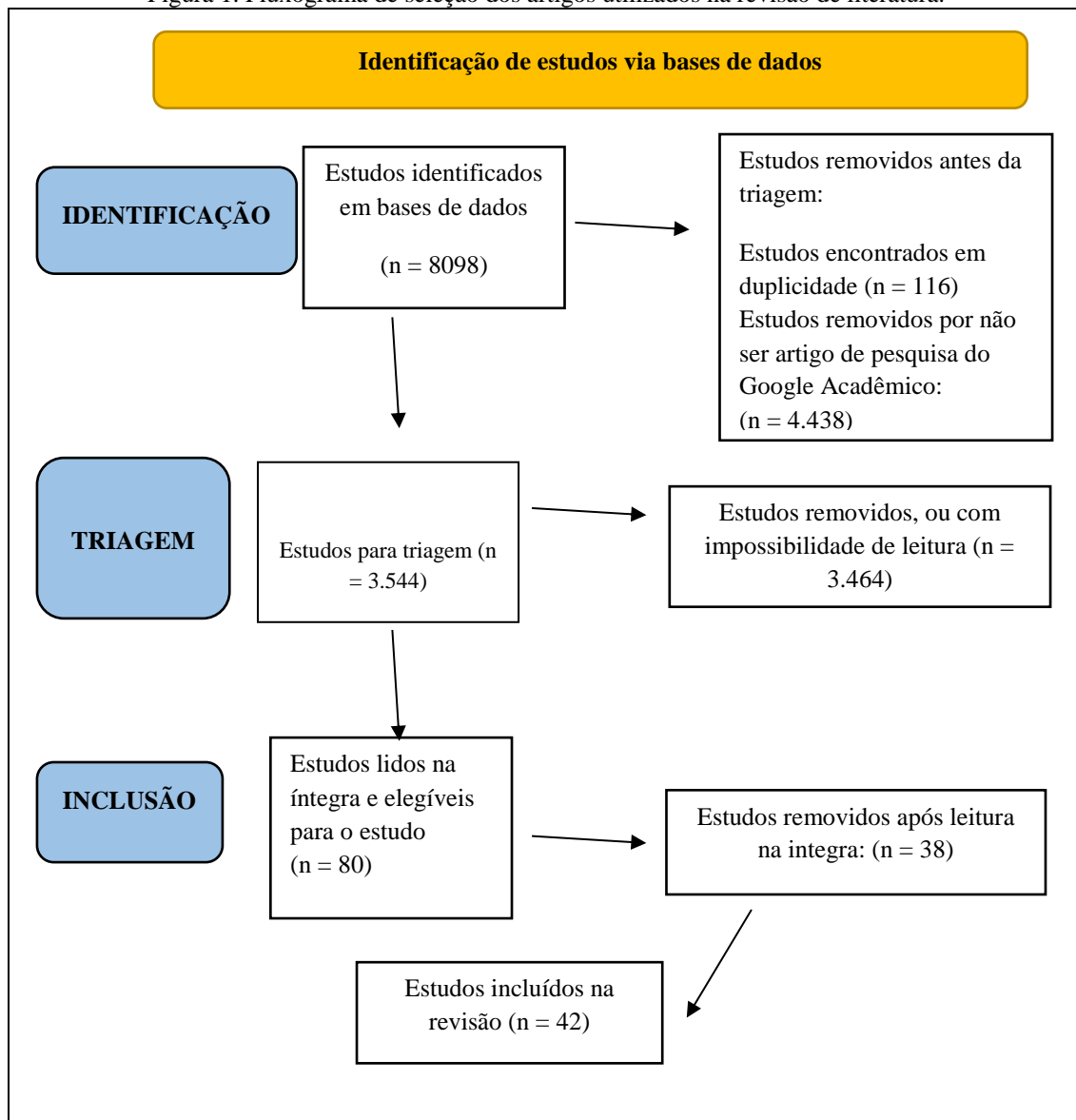
Plataforma de Pesquisa	Estratégia de Busca	Resultados
PubMed	("root canal preparation" OR "root canal treatment" OR "endodontics" OR "endodontic") AND ("instrument" OR "dental alloy" OR "nickel-titanium" OR "niti" OR "nitinol" OR "steinless stell") AND ("heat treatment" OR "superficial treatment" OR "thermomechanical treatment" OR "martensite" OR "austenite" OR "R phase" OR "titanium dioxide" OR "TiO2" OR "M wire" OR "CM wire") AND ("history" OR "future" OR "concepts" OR "properties" OR "characteristics" OR "characterization")	123
SciELO	("root canal preparation" OR "root canal treatment" OR "endodontics" OR "endodontic") AND ("instrument" OR "dental alloy" OR "nickel-titanium" OR "niti" OR "nitinol" OR "steinless stell") AND ("heat treatment" OR "superficial treatment" OR "thermomechanical treatment" OR "martensite" OR "austenite" OR "R phase" OR "titanium dioxide" OR "TiO2" OR "M wire" OR "CM wire") AND ("history" OR "future" OR "concepts" OR "properties" OR "characteristics" OR "characterization")	2
Lilacs	("root canal preparation" OR "root canal treatment" OR "endodontics" OR "endodontic") AND ("instrument" OR "dental alloy" OR "nickel-titanium" OR "niti" OR "nitinol" OR "steinless stell") AND ("heat treatment" OR "superficial treatment" OR "thermomechanical treatment" OR "martensite" OR "austenite" OR "R phase" OR "titanium dioxide" OR "TiO2" OR "M wire" OR "CM wire") AND ("history" OR "future" OR "concepts" OR "properties" OR "characteristics" OR "characterization")	13
Google Acadêmico	("root canal preparation" OR "root canal treatment" OR "endodontics" OR "endodontic") AND ("instrument" OR "dental alloy" OR "nickel-titanium" OR "niti" OR "nitinol" OR "steinless stell") AND ("heat treatment" OR "superficial treatment" OR "thermomechanical treatment" OR "martensite" OR "austenite" OR "R phase" OR "titanium dioxide" OR "TiO2" OR "M wire" OR "CM wire") AND ("history" OR "future" OR "concepts" OR "properties" OR "characteristics" OR "characterization")	7960

Fonte: O Autor, 2024.

No processo de busca de dados, foram adotados os seguintes critérios de inclusão: publicações na íntegra disponíveis; ter como idioma de publicação o português e o inglês; artigos publicados no período de 1988 a 2024. O recorte temporal teve como marco a introdução da liga NiTi na Endodontia em 1988. Foram excluídos da pesquisa os estudos sem adequação a critérios como: fuga da temática, artigos de revisões, biografias, dissertações, relatos de experiência, teses e Conference Paper.

A busca pelos artigos ocorreu de 2022 a 2024, sob procedimento pareado. Inicialmente, realizou-se análise dos títulos e resumos com auxílio de checklist para seleção dos artigos com potencial para responderem à questão norteadora. Dessa forma, houve a seleção de 80 artigos. Após a leitura na íntegra, 38 artigos foram excluídos por duplicações, desvios do tema principal, acesso restrito e natureza de revisão. Os 42 selecionados passaram por leitura detalhada, análise descritiva e classificação por nível de evidência. Os artigos foram classificados em sete níveis, sendo: I) revisões sistemáticas ou de metanálise; II) estudos derivados de ensaios clínicos, desde que controlados e delineados; III) ensaios clínicos sem randomização; IV) estudos de coorte e caso-controle; V) revisão sistemática de pesquisas descritivas e qualitativas; VI) pesquisas descritivas ou qualitativas e VII) opiniões de pesquisadores referenciados como autoridades e/ou de opinião de um comitê de especialistas. O processo de filtragem e seleção dos artigos pode ser visualizado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma de seleção dos artigos utilizados na revisão de literatura.



Fonte: Adaptado do Relatório PRISMA de 2020.

3 RESULTADOS

A presente revisão integrativa consolidou 42 estudos que exploram a evolução histórica e as propriedades dos instrumentos endodônticos de Níquel-Titânio (NiTi). A seleção ocorreu de 80 artigos iniciais, baseando-se em critérios rigorosos e detalhados para eliminar duplicatas, desvios temáticos, acessos restritos e revisões literárias. A seleção e exclusão são visualmente descritas no fluxograma de seleção dos artigos, ressaltando o rigor metodológico deste estudo.

A metodologia aplicada nesta revisão, embora rigorosa e alinhada com os princípios da revisão integrativa, apresenta limitações a serem reconhecidas. A seleção de estudos exclusivamente em inglês e português pode ter excluído pesquisas relevantes em outros

idiomas, potencialmente enviesando os resultados. A delimitação temporal também pode ter omitido estudos pioneiros ou recentes avanços tecnológicos ainda sem publicação ampla ou indexados.

A revisão aponta um progresso notável na tecnologia de instrumentos endodônticos de NiTi, sobretudo nas áreas de flexibilidade, resistência à fratura e avanços nos tratamentos termomecânicos. Houve clara tendência na literatura de promover inovação contínua, tanto em design quanto em composição das ligas de NiTi, com o objetivo de melhorar eficácia e segurança nos procedimentos endodônticos.

Os estudos analisados detalham diversos tratamentos aplicados às ligas de NiTi, como eletropolimento e tratamentos termomecânicos, incluindo M-Wire e CM-Wire, além de novas técnicas como a Usinagem por Descargas Elétricas (EDM). Tais abordagens têm melhorado substancialmente as propriedades mecânicas dos instrumentos, aumentando a flexibilidade e resistência à fadiga.

Os avanços tecnológicos, particularmente no design dos instrumentos e sistemas de rotação, têm minimizado os riscos de fraturas. Esses progressos acompanham uma compreensão mais aprofundada das complexidades anatômicas dos canais radiculares, permitindo que os instrumentos se adaptem mais efetivamente a esses desafios.

Os estudos sugerem uma tendência em direção ao desenvolvimento de instrumentos mais personalizados, capazes de atender às variadas necessidades endodônticas com segurança e eficiência aumentadas. Também há um interesse crescente na interação entre as propriedades dos instrumentos e as técnicas de instrumentação, o que poderia maximizar os resultados dos tratamentos endodônticos.

A análise consolidada na presente pesquisa evidencia o compromisso contínuo da comunidade científica com a inovação e melhoria dos instrumentos endodônticos de NiTi. Os avanços destacados nesta revisão não apenas esboçam o progresso técnico significativo realizado até o momento, mas apontam para futuras direções promissoras que poderiam transformar ainda mais a prática endodôntica, alinhando-se com as demandas contemporâneas por tratamentos mais eficientes, seguros e adaptáveis.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS INSTRUMENTOS DE NÍQUEL-TITÂNIO

As propriedades mecânicas dos instrumentos endodônticos NiTi, flexibilidade, resistência à torção e fadiga, são requisitos dos instrumentos que interferem no uso clínico. Possíveis estratégias para aumentar a eficiência e a segurança das limas de NiTi incluem melhorias no processo de fabricação ou uso de novas ligas que proporcionam propriedades mecânicas superiores, assim como inovações nas características geométricas e na cinemática. O conhecimento das propriedades mecânicas e de sua associação com as propriedades metalúrgicas dos instrumentos de NiTi é fundamental para compreender o comportamento desses instrumentos durante a formatação do Sistema de Canais Radiculares (SCR) (Peters, Bahia, Pereira, 2017; Zhou *et al.*, 2013).

A fim de otimizar o desempenho clínico dos instrumentos, várias modificações ocorreram nos instrumentos endodônticos, tais como: mudanças no design, na cinemática de uso, no tratamento térmico da liga metálica e em sua superfície. Assim, inúmeros instrumentos são lançados no mercado a cada ano. As empresas inovam a cada instrumento para fabricar um instrumento que possua propriedades excelentes e traga maior segurança à prática endodôntica (Gavini *et al.*, 2018).

Em relação ao design, são observadas modificações na ponta dos instrumentos, bem como hélice, pitch, ângulo helicoidal, ângulo de corte, seção transversal e conicidade do instrumento. Alterações em todas estas características podem favorecer a flexibilidade do instrumento, que, neste caso, está relacionada à quantidade de massa do instrumento, sendo essa relação flexibilidade-massa inversamente proporcional. Ou seja, instrumentos com maiores massas metálicas possuem menor flexibilidade. As modificações nas características geométricas também influenciam na capacidade de corte dos instrumentos (Basheer Ahamed *et al.*, 2018; Viana *et al.*, 2010).

4.2 CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS NITI

A liga metálica utilizada na confecção dos instrumentos endodônticos tem dois componentes químicos: níquel e titânio. Esta liga é formada pela união dos átomos de níquel e titânio, pois se reorganizam em estruturas cristalinas. Prevaecem em duas fases: a austenita, com estrutura cúbica de corpo centrado, na qual os átomos ocupam as posições centrais e do vértice

de um cubo, sendo caracterizada por uma estrutura com maior rigidez e; a martensita, com estrutura monoclinica ordenada, caracterizada por uma maior flexibilidade ao instrumento. Apesar da prevalência destas duas fases, uma intermediária pode surgir. É a chamada fase R. Se encontra em ligas NiTi binárias ricas em níquel e tratadas termicamente a uma temperatura apropriada. Sua estrutura caracteriza-se por uma distorção romboédrica da fase austenita cúbica (Zhou, Peng, Zeng, 2013; Há *et al.*, 2015; Ounsi *et al.*, 2017).

Diminuição no tempo de trabalho, simplificação da técnica e do número de instrumentos utilizados, bem como acompanhar com maior facilidade a curvatura do canal devido à maior flexibilidade sob a forma original e com menor extrusão de debris no forame apical são algumas das vantagens dos instrumentos de NiTi (Ounsi *et al.*, 2017; Gutmann; Gao, 2012). Entretanto, para um uso clínico seguro e eficiente desses instrumentos, é preciso conhecer as propriedades mecânicas e mecanismos de fratura, assim como a relação com a anatomia do sistema de canais radiculares (Peters, 2004).

As características da liga NiTi estão associadas à mudança de estrutura cristalina, e pode sofrer indução de tensão ou variações de temperatura, denominada transformação martensítica. Trata-se de uma fase de alta simetria chamada austenita ou fase parente, e uma fase de baixa simetria, a martensita. Durante a transformação martensítica, os átomos se movem cooperativamente por meio de um mecanismo de cisalhamento, alterando a estrutura cristalina e não a composição química da matriz tipicamente. A austenita é estável em altas temperaturas e baixos valores de tensão. Já a martensita é estável em baixas temperaturas e altos valores de tensão (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Thompson, 2000; Zhou, Shen, Zheng, 2012).

A transformação de fase é o efeito que modifica a ordenação dos átomos das estruturas cristalinas da liga, sem modificar a quantidade de átomos de cada elemento. Quando isso ocorre, as propriedades da liga são alteradas, inferindo em propriedades como flexibilidade, dureza, modificação nas temperaturas de transformação e resistência mecânica (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Thompson, 2000; Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018).

A transformação da fase austenita para martensita ocorre tanto pela aplicação de tensão quanto pela modificação da temperatura do metal, chamado transformação martensítica. No estado martensítico, o metal apresenta elevada elasticidade, efeito memória de forma e amortecimento de vibrações mecânicas (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Thompson, 2000; Zinelis *et al.*, 2010).

Quando o material no estado martensítico é aquecido, a martensita torna-se instável e ocorre a transformação reversa. Ou seja, a martensita retorna à fase parente. Devido à baixa simetria da martensita, o retorno à fase de alta temperatura se dá pelo caminho inverso da

transformação martensítica. Já a fase parente é formada na sua orientação original. Em instrumentos endodônticos, a curvatura do canal é o que desencadeia a transformação martensítica por conta da tensão imposta ao instrumento. A tensão cessa quando o instrumento é retirado do interior do canal e ocorre a transformação reversa, restaurando à forma original (Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018; Otsuka; Ren, 2005).

A liga NiTi possui algumas propriedades interessantes para uso na Endodontia, tais como a superelasticidade e o efeito memória de forma (Walia, Brantley, Gerstein, 1988; Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018; Zinelis *et al.*, 2010). Ambos os efeitos estão intimamente ligados e podem ser definidos pela transformação de fase da liga. Ou seja, quando a liga se encontra em fase austenita sob temperatura ambiente e sofre tensão, há uma instabilidade em sua estrutura cristalina que, aos poucos, transforma-se em estrutura martensita. Ao remover esta tensão, as estruturas cristalinas retornam a fase austenita, fenômeno denominado superelasticidade. Quando esta modificação de fase ocorre com modificações na temperatura da liga, tal efeito é chamado de memória de forma (Walia *et al.*, 1988; Zupanc, Vahdat-Pajouh, 2018; Zinelis *et al.*, 2010).

As temperaturas de transformação têm influência crítica sobre as propriedades mecânicas e comportamentais das ligas NiTi. Podem ser alteradas por pequenas mudanças na composição, impurezas e tratamentos térmicos durante o processo de fabricação. As temperaturas de transformação podem ser controladas a partir do teor de níquel encontrado na liga. Como exemplo, um aumento no teor de níquel acarretará uma diminuição na temperatura de transformação, implicando em uma transformação martensítica com maior facilidade (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Khalil-Allaf, Dlouhy, Eggeler, 2002; Testarelli *et al.*, 2011).

4.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO BASEADO NA CONICIDADE

A conicidade refere-se à variação do diâmetro do instrumento em relação ao comprimento. Quanto mais rápido o diâmetro se expandir em relação ao comprimento, maior será a conicidade e, conseqüentemente, a quantidade de metal que o instrumento terá em sua estrutura. Por isso, maior a rigidez e a resistência à fratura por torção. E quanto menor a conicidade, menor a quantidade de metal, assim como maior será a flexibilidade do instrumento endodôntico (Gavini *et al.*, 2018).

Os instrumentos fabricados em NiTi geralmente são utilizados em motores automatizados que permitem uma instrumentação mais eficiente. Proporcionam a obtenção de um canal com conicidade no sentido apical mais ampla. Isso facilita a atuação do profissional,

e diminui a incidência de iatrogenias como desvio do forame apical e fraturas do instrumento por fadiga e torção (Sousa, 2019).

4.4 FRATURAS DOS INSTRUMENTOS ENDODÔNTICOS DE NITI

O advento dos instrumentos mecanizados de NiTi também gerou preocupação com o risco de possíveis fraturas, pois estes podem fraturar mesmo abaixo do seu limite de elasticidade e sem apresentar sinais visíveis de deformações. A fratura de limas de aço inoxidável, por sua vez, é geralmente precedida por distorção das lâminas, que pode ser observada pelo profissional (Pruett, Clement, Carnes, 1997).

Os instrumentos de NiTi acionados a motor podem sofrer dois tipos de fratura: por torção ou por fadiga. A fratura por torção ocorre quando a ponta ou qualquer parte do instrumento se prende no interior do conduto radicular e o motor continua ativo, rotacionando seu longo eixo. O limite elástico do metal é excedido e o instrumento sofre deformação plástica seguida de fratura, especialmente em canais atrésicos e curvos (Petters *et al.*, 2017; Zhou, Peng, Zheng, 2013; Sattapan *et al.*, 2000).

A fratura por fadiga, porém, ocorre quando um instrumento rotaciona livremente sob tensões que irão exercer pontos constantes de compressão e tração no instrumento. Este tipo de fratura consiste em três estágios: indução e iniciação das linhas de fratura, na qual microtrincas são geradas; propagação e nucleação, com o crescimento dessas linhas de fratura e fratura final do instrumento no ponto de maior sobrecarga do material. Os níveis de tensão durante a rotação do instrumento são geralmente dependentes da geometria da curvatura e das cargas aplicadas, com um nível maior de tensão na área de curvatura máxima do canal radicular (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Testarelli *et al.*, 2011; Bahia; Buono, 2005).

No interior de um canal radicular, a curvatura e o calibre do canal, em conjunto com as características do instrumento como design e geometria, influenciam nos níveis de tensão sofridos e, conseqüentemente, na vida útil. Com o objetivo de aumentar a resistência a fratura, alterações na liga NiTi foram realizadas, tais como tratamentos térmicos, alterações em sua microestrutura, avanços na fabricação da lima (secções transversais mais rombóides e instrumentos com diferentes secções transversais diferentes ao longo de toda parte ativa, ângulos helicoidais e conicidades variados), além de novos métodos de preparo biomecânico (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Testarelli *et al.*, 2011).

4.5 LIGA NITI CONVENCIONAL

Com melhores propriedades comparados ao Aço inoxidável, a liga NiTi tornou-se popular na confecção dos instrumentos endodônticos (Walia, Brantley, Gerstein, 1988). Instrumentos confeccionados a partir da liga NiTi convencional contam com estrutura cristalina austenita como predominante na liga em temperatura ambiente, o que leva a superelasticidade (Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018). O primeiro instrumento a ser fabricado com esta liga, em 1992 pelo Dr. John McSpadden, seguiu a norma da International Organization for Standardization (ISO), com taper constante de 0,02.

Em 1994, Dr. Johnson introduziu no mercado os instrumentos Profile, sendo os primeiros confeccionados com conicidades acima de 0,02. A partir daí, diversos instrumentos foram lançados no mercado sob utilização da liga NiTi, como os sistemas Quantec, Great Taper Files, Protaper, K3, Mtwo, HeroShaper e Endosequence (Gavini *et al.*, 2018; Bansode *et al.*, 2016; Haapasalo; Shen, 2013).

4.6 ELETROPOLIMENTO

O eletropolimento é um processo eletroquímico realizado na superfície dos instrumentos de NiTi para reduzir os defeitos de fabricação e melhorar sua performance. O primeiro instrumento a utilizar deste tratamento foi o sistema Race, fabricado pela FKG em 1999 (Gavini *et al.*, 2018; Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018). O eletropolimento é capaz de aumentar a resistência a fadiga dos instrumentos de NiTi (Anderson, Price, Parashos, 2007; Bui, Mitchell, Baumgartner, 2008).

4.7 M-WIRE

Outra modificação observada no decorrer da história dos instrumentos endodônticos foi a realização de tratamentos termomecânicos. Tem por finalidade modificar as temperaturas de transformação da liga, com possibilidade de trabalhar com instrumentos mais flexíveis em temperatura ambiente ou instrumentos que requerem uma menor tensão para se tornarem mais flexíveis. Ou seja, o metal modifica sua estrutura cristalina de austenita para martensita (considerada a fase cristalina com maior flexibilidade) com mais facilidade. Através deste tratamento dos instrumentos, 4 reações podem ocorrer na liga: mudanças em sua composição

química, reorganização dos defeitos, redução dos defeitos e transformação estrutural de fase (Zhou *et al.*, 2013; Gavini *et al.*, 2018; Zupanc *et al.*, 2018).

O primeiro tratamento termomecânico realizado na liga NiTi ocorreu em 2008, sendo a liga nomeada M-Wire. Possuía a fase austenita como predominante, mas a temperatura de transição para a fase martensita exigia a diminuição menor de temperatura ou menor força recebida. Assim, a liga conta com maior flexibilidade e maior resistência a fadiga, em comparação aos instrumentos fabricados com a liga convencional (Johnson *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2012). Como exemplos de instrumentos endodônticos fabricados através desta liga, podemos citar: Reciproc, WaveOne, Protaper Next e Profile Vortex (Gavini *et al.*, 2018).

4.8 FASE R

A Fase R é cristalina intermediária entre as fases austenita e martensita. Em 2008, a empresa SybronEndo lançou no mercado os instrumentos Twisted File, com tratamento específico chamado Fase R. Este instrumento é fabricado por meio da torção do fio metálico, sendo diferente dos demais por serem usinados. Outros 2 instrumentos da mesma empresa contam com tal tratamento termomecânico, os sistemas K3XF e Twisted File Adaptive (Gavini *et al.*, 2018; Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018, 2018; Tabassum, Zafar, Umer, 2019).

4.9 CM-WIRE

Em 2010, um novo tratamento termomecânico foi introduzido no mercado. Aqui, a fase martensita é predominante em temperatura ambiente, resultando em um instrumento extremamente flexível, chamado CM-Wire. Esta liga ainda possui menos quantidade de níquel do que as ligas anteriores (Goo *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2011): Quando esta liga se encontra em temperatura ambiente, é facilmente deformável sob tensão. Também não recupera sua forma original com a remoção da tensão, sendo considerado uma liga com memória de forma controlada. Esta liga atinge sua forma austenita por meio da alta da temperatura, sendo a temperatura de austenita final acima da temperatura corporal. Dentre os instrumentos fabricados com tal liga, podemos citar HyFlex CM, BassiLogicTM e Typhoon (Martins, 2020).

4.10 CAMADA DE DIÓXIDO DE TITÂNIO (GOLD E BLUE)

Os tratamentos térmicos estão associados a manter a memória da forma do instrumento. Ou seja, pode ser exposto a um estresse operatório. Entretanto, quando aquecidos retornam ao seu estado inicial. Também é utilizado para melhorar a qualidade da liga, tornando-a mais resistente à fadiga. O tratamento térmico induz o efeito de memória, permitindo que o instrumento seja pré-curvado. Assim, gera maior resistência e mais flexibilidade. Abre margem para um acesso mais adequado em canais mais curvos ou mais centralizados (Losertová *et al.*, 2017).

Tratamentos térmicos na superfície dos instrumentos endodônticos foram realizados a partir de 2011, por meio dos instrumentos Vortex Blue, fabricados pela empresa Dentsply (Tian *et al.*, 2011). Nestes instrumentos, durante o tratamento térmico, o titânio reage com o oxigênio, e forma uma camada superficial de dióxido de titânio. A coloração desta camada é referente a sua espessura que, eventualmente, é relacionado à temperatura do tratamento térmico sofrido (De-Deus *et al.*, 2017; Hieawy *et al.*, 2015). Os tratamentos gold e blue aumentam a flexibilidade e a resistência a fadiga do instrumento endodôntico, na comparação a instrumentos idênticos fabricados a partir da liga NiTi convencional e M-wire (De-Deus *et al.*, 2017; Hieawy *et al.*, 2015). Dentre os instrumentos confeccionados desta maneira, podemos citar Reciproc Blue, Vortex Blue, WaveOne Gold, Protaper Gold e Sequence Rotary File (Ertuğru; Orhan, 2019).

4.11 MAX-WIRE

Em 2015, a empresa FKG lançou no mercado instrumentos endodônticos com um tratamento termomecânico único, patenteando-o como liga Max-Wire. Como resultado do tratamento da liga, a temperaturas iguais ou superiores a 35°C, passa da fase martensítica para a austenítica. Isso dá ao instrumento uma forma semicircular permitindo projetar-se contra as paredes do canal radicular ao rodar e realiza movimento rotativo excêntrico. Os instrumentos desse sistema são extremamente flexíveis e resistentes à fadiga graças ao seu diâmetro e à sua conicidade reduzidos. Os instrumentos que possuem liga são o XP-endo Finisher, XP-endo Finisher Retreatment e XP-endo Shaper (Peters, Arias, Choi, 2020).

4.12 USINAGEM POR DESCARGAS ELÉTRICAS (EDM)

Em 2016, a empresa Coltene, mesma fabricante dos instrumentos HyFlex CM, introduziu no mercado um novo instrumento, o HyFlex EDM. É fabricado a partir da liga CM, mas com um tratamento por descargas elétricas em sua superfície. Este tratamento ocorre por um procedimento de usinagem sem contato, onde a superfície do instrumento sofrerá ação de faíscas elétricas que levará a um processo de erosão, pois derrete e evapora esta superfície (Plotino *et al.*, 2009).

4.13 T-WIRE, C-WIRE E NOVOS TRATAMENTOS

Por meio de um fio NiTi, um tratamento termomecânico específico pode ser realizado pelas empresas. Assim, cada empresa pode patentear seu próprio tratamento na liga NiTi. A empresa MicroMega utilizou um tratamento na liga, denominando-a T-Wire para os instrumentos do sistema 2Shape e C-Wire aos instrumentos OneCurve (Hieawy *et al.*, 2015). Recentemente, as empresas VDW e Dentsply Sirona lançaram os instrumentos ROTATE e TruNatomy, respectivamente. Ambos contam com novos tratamentos térmicos, porém as empresas ainda não deram nome às ligas, citando estas apenas por “novo tratamento” (Shen *et al.*, 2013).

4.14 TRATAMENTOS RAINBOW

Entre os anos de 2023 e 2024, empresas como Quimidrol, Denco, Rogin e Ramo Medical surgiram com propostas interessantes, na qual os instrumentos contam com distintos tratamentos termomecânicos, proporcionando colorações na haste de um mesmo instrumento. Não existem comprovações científicas sobre suas propriedades.

5 DISCUSSÃO

As propriedades mecânicas dos instrumentos endodônticos NiTi, como flexibilidade, resistência à torção e fadiga, são fundamentais à eficiência e segurança no uso clínico. A flexibilidade é importante para a conformação dos instrumentos às curvas dos canais radiculares, enquanto a resistência à torção é necessária para evitar a fratura durante o uso. A fadiga é uma preocupação importante, pois o uso repetitivo dos instrumentos pode levar à falha

por fadiga. Ou seja, a quebra progressiva do material devido à aplicação repetida de tensão (Peters, 2004; Zhou, Peng, Zheng, 2013).

Segundo Walia, Brantley e Gerstein (1988), instrumentos de NiTi fabricados por meio de fios de ortodontia foram comparados com instrumentos de aço-inoxidável, verificando a resistência a torção e a flexibilidade. Através de instrumentos idênticos, mudando a liga utilizada, os Níquel-Titânio (NiTi) apresentaram flexibilidade e resistência à torção (em ambos os sentidos, rotação contínua no sentido horário e anti-horário) superior aos instrumentos de Aço Inoxidável.

Existem várias estratégias para melhorar a eficiência e segurança das limas de NiTi. Uma delas é melhorar o processo de fabricação, por exemplo, por meio de melhor controle das etapas de conformação e tratamento térmico. Outra estratégia é o uso de novas ligas que proporcionam propriedades mecânicas superiores, como maior resistência à torção e fadiga. Inovações nas características geométricas e na cinemática também podem melhorar a eficiência da formação do Sistema de Canais Radiculares (SCR) (Peters, 2004; Zhou, Peng, Zheng, 2013).

A composição química e o tratamento termomecânico durante a fabricação afetam as propriedades mecânicas e o comportamento da liga NiTi. O conhecimento dessas propriedades e da sua associação com as propriedades metalúrgicas é fundamental para entender o comportamento dos instrumentos de NiTi durante a formação do SCR. Por exemplo, uma maior quantidade de Níquel na liga NiTi pode aumentar a flexibilidade, enquanto uma maior quantidade de Titânio pode aumentar a resistência à torção e fadiga (Peters, 2004; Zhou, Peng, Zheng, 2013).

As modificações no design dos instrumentos podem afetar sua flexibilidade e capacidade de corte, a exemplo de modificações na ponta do instrumento, que podem afetar a capacidade de corte. Já as modificações na hélice, pitch, ângulo helicoidal, ângulo de corte, secção transversal e conicidade do instrumento podem afetar a flexibilidade (Basheer Ahamed *et al.*, 2018; Há *et al.*, 2015; He; Ni, 2010).

Vale lembrar que a liga NiTi é altamente sensível a mudanças de temperatura. Ainda pode sofrer transformações de fase reversíveis ou irreversíveis a depender das condições de tratamento térmico e do uso clínico dos instrumentos. Portanto, é crucial compreender as propriedades metalúrgicas e mecânicas da liga NiTi, além de como afetam o comportamento dos instrumentos endodônticos durante o tratamento endodôntico (Zhou, Peng, Zheng, 2013; Há *et al.*, 2013; Ounsi *et al.*, 2017).

A fratura de limas de NiTi geralmente ocorre devido à fadiga cíclica quando o instrumento é submetido a repetidas cargas de torção durante a sua utilização. Tais cargas

podem causar microtrincas na superfície do instrumento, propagando-se gradualmente até a fratura completa. As limas de Níquel-Titânio (NiTi) também possuem menor resistência à torção em comparação com as limas de aço inoxidável, o que aumenta o risco de fraturas (Pruett, Clement, Carnes, 1997).

O eletropolimento não é capaz de eliminar completamente o desenvolvimento de microfraturas, mas pode reduzir a presença de microfraturas, resíduos na superfície e fissuras, aumentando assim a resistência à corrosão da liga NiTi utilizada na confecção dos instrumentos endodônticos (Sousa, 2019).

As ligas CM-wire são uma evolução das ligas NiTi convencionais, o que lhes confere maior resistência à fadiga e uma maior durabilidade.

Estudos mostram que as limas endodônticas produzidas com ligas CM-wire apresentam maior resistência à fadiga em comparação com as limas de NiTi convencionais, M-wire e fase-R. Isso as torna mais seguras e eficazes no tratamento dos canais radiculares. As ligas CM-wire ainda têm maior resistência à corrosão e à deformação permanente, impulsionando a durabilidade e longevidade (Testarelli *et al.*, 2011). O tratamento térmico gold e blue em instrumentos de NiTi pode aumentar a flexibilidade e resistência à fadiga, na comparação com instrumentos de NiTi convencional e até mesmo com os fabricados com a liga M-wire (Goo *et al.*, 2017; Martins, 2020).

A tecnologia MaxWire foi projetada para ter maior resistência à fadiga cíclica e à torção. Isso dá mais durabilidade e eficiência na preparação do canal radicular. Também apresenta maior resistência à fadiga cíclica do que outras limas de NiTi convencionais e, ainda, pode ser utilizado em canais radiculares curvos e estreitos com segurança e eficácia (Zupanc, Vahdat-Pajouh, Schäfer, 2018; Testarelli *et al.*, 2011).

As empresas desenvolvem seus próprios tratamentos termomecânicos às ligas de NiTi e os patenteiam como tecnologia exclusiva. Assim, cada empresa pode ter uma liga de NiTi com características específicas para atender às necessidades do mercado. É comum vermos no mercado odontológico uma variedade de ligas de NiTi com distintas marcas e nomenclaturas patenteadas pelas fabricantes (Gavini *et al.*, 2018; Martins, 2020).

6 CONCLUSÕES

A evolução dos instrumentos de Níquel-Titânio trouxe grande melhoria na realização de tratamentos endodônticos, tornando-os mais eficientes e menos invasivos. As ligas termo mecanicamente tratadas, em particular, têm se desenvolvido bastante com o objetivo de fornecer limas mais resistentes à fratura e com características como superelasticidade e efeito memória de forma aprimoradas.

Novas tecnologias de produção, como a usinagem por eletroerosão, têm permitido a criação de instrumentos com formatos e tamanhos mais precisos e personalizados, aumentando ainda mais a eficiência e a segurança dos tratamentos endodônticos.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. E.; PRICE, J. W.; PARASHOS, P. Fracture resistance of electropolished rotary nickel-titanium endodontic instruments. **Journal of Endodontics**, 33, n. 10, p. 1212-1216, Oct 2007.
- BAHIA, M. G.; BUONO, V. T. Decrease in the fatigue resistance of nickel-titanium rotary instruments after clinical use in curved root canals. **Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology**, 100, n. 2, p. 249-255, Aug 2005.
- BANSODE, P.; WAVDHANE, M.; PATHAK, S.; KHEDGIKAR, S. *et al.* Evolution of rotary Ni-Ti file systems: a literature review. **Indian Journal of Applied Research**, VI, n. XII, 2016.
- BASHEER AHAMED, S. B.; VANAJASSUN, P. P.; RAJKUMAR, K.; MAHALAXMI, S. Comparative Evaluation of Stress Distribution in Experimentally Designed Nickel-titanium Rotary Files with Varying Cross Sections: A Finite Element Analysis. **Journal of Endodontics**, 44, n. 4, p. 654-658, Apr 2018.
- BUI, T. B.; MITCHELL, J. C.; BAUMGARTNER, J. C. Effect of electropolishing ProFile nickel-titanium rotary instruments on cyclic fatigue resistance, torsional resistance, and cutting efficiency. **Journal of Endodontics**, 34, n. 2, p. 190-193, Feb 2008.
- DE-DEUS, G.; SILVA, E. J.; VIEIRA, V. T.; BELLADONNA, F. G. *et al.* Blue Thermomechanical Treatment Optimizes Fatigue Resistance and Flexibility of the Reciproc Files. **Journal of Endodontics**, 43, n. 3, p. 462-466, Mar 2017.
- GAO, Y.; GUTMANN, J. L.; WILKINSON, K.; MAXWELL, R. *et al.* Evaluation of the impact of raw materials on the fatigue and mechanical properties of ProFile Vortex rotary instruments. **Journal of Endodontics**, 38, n. 3, p. 398-401, Mar 2012.
- GAO, Y.; SHOTTON, V.; WILKINSON, K.; PHILLIPS, G. *et al.* Effects of raw material and rotational speed on the cyclic fatigue of ProFile Vortex rotary instruments. **Journal of Endodontics**, 36, n. 7, p. 1205-1209, Jul 2010.
- 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. **Brazilian Oral Research**, 32, n. suppl 1, p. e67, Oct 2018.
- GOO, H. J.; KWAK, S. W.; HÁ, J. H.; PEDULLÀ, E. *et al.* Mechanical Properties of Various Heat-treated Nickel-titanium Rotary Instruments. **Journal of Endodontics**, 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. **International Endodontic Journal**, 45, n. 2, p. 113-128, Feb 2012.
- HÁ, J. H.; CHEUNG, G. S.; VERSLUIS, A.; LEE, C. J. *et al.* 'Screw-in' tendency of rotary nickel-titanium files due to design geometry. **International Endodontic Journal**, 48, n. 7, p. 666-672, Jul 2015.

HÁ, J. H.; KIM, S. K.; COHENCA, N.; KIM, H. C. Effect of R-phase heat treatment on torsional resistance and cyclic fatigue fracture. **Journal of Endodontics**, 39, n. 3, p. 389-393, Mar 2013.

HAAPASALO, M.; SHEN, Y. Evolution of nickel-titanium instruments: From past to future. **Endodontic Topics**, 29, n. 1, 2013.

HIEAWY, A.; HAAPASALO, M.; ZHOU, H.; WANG, Z. J. *et al.* Phase Transformation Behavior and Resistance to Bending and Cyclic Fatigue of ProTaper Gold and ProTaper Universal Instruments. **Journal of Endodontics**, 41, n. 7, p. 1134-1138, Jul 2015.

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. **Journal of Endodontics**, 34, n. 11, p. 1406-1409, Nov 2008.

LOSERTOVIÁ, M.; ŠTENČEK, M.; MATÝSEK, D.; ŠTEFEK, O. *et al.* Microstructure evolution of heat treated NiTi alloys. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 266, 2017.

MARTINS, S.C.S. Comportamento mecânico de instrumentos endodônticos de NiTi: uma abordagem numérica. Minas Gerais. Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36395>>. Acesso em: 06. Mai. 2023.

OLIVEIRA, R. T. DE; FONSECA V. A. F.; MOFFA E. B.; CIRELLI T. *et al.* Poder de corte e resistência à fratura de limas manuais de níquel titânio após a aplicação de diferentes protocolos. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 6, n. 3, p. 13764–13775, 27 jun. 2023.
OTSUKA, K.; REN, X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. **Progress in Materials Science**, 50, n. 5, 2005.

OUNSI, H. F.; NASSIF, W.; GRANDINI, S.; SALAMEH, Z. *et al.* Evolution of Nickel-titanium Alloys in Endodontics. **The Journal of Contemporary Dental Practice**, 18, n. 11, p. 1090-1096, Nov 2017.

PETERS, O. A. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. **Journal of Endodontics**, 30, n. 8, p. 559-567, Aug 2004.

PETERS, O. A.; ARIAS, A.; CHOI, A. Mechanical Properties of a Novel Nickel-titanium Root Canal Instrument: Stationary and Dynamic Tests. **Journal of Endodontics**, May 2020.
PETERS, O. A.; DE AZEVEDO BAHIA, M. G.; PEREIRA, E. S. Contemporary Root Canal Preparation: Innovations in Biomechanics. **Dental Clinics of North America**, 61, n. 1, p. 37-58, 01 2017.

PLOTINO, G.; GRANDE, N. M.; CORDARO, M.; TESTARELLI, L. *et al.* A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. **Journal of Endodontics**, 35, n. 11, p. 1469-1476, Nov 2009.

PRUETT, J. P.; CLEMENT, D. J.; CARNES, D. L. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. **Journal of Endodontics**, 23, n. 2, p. 77-85, Feb 1997.

SANTOS, J. V. DOS; HILÁRIO, J. S.; CARVALHO, R. K. H. C.; SILVA, L. H. V. *et al.*; *Fratura de limas endodônticas no canal radicular: revisão de literatura / Endodontic lime fracture in the radicular channel: literature review*. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 4, n. 3, p. 11983–11994, 1 jun. 2021.

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

SCHILDER, H. Cleaning and shaping the root canal. **Dental Clinics of North America**, 18, n. 2, p. 269-296, Apr 1974.

SHEN, Y.; ZHOU, H. M.; ZHENG, Y. F.; CAMPBELL, L. *et al.* Metallurgical characterization of controlled memory wire nickel-titanium rotary instruments. **Journal of Endodontics**, 37, n. 11, p. 1566-1571, Nov 2011.

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

SOUSA, L.F.M. Evolução da composição das ligas metálicas utilizadas em endodontia mecanizada: da liga de aço inoxidável à liga m-wire. Instituto Universitário Egas Moniz; Mestrado integrado em medicina dentária, 2019. Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/30886>>. Acesso em: 06. Mai. 2023.

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

TESTARELLI, L.; PLOTINO, G.; AL-SUDANI, D.; VINCENZI, V. *et al.* Bending properties of a new nickel-titanium alloy with a lower percent by weight of nickel. **Journal of Endodontics**, 37, n. 9, p. 1293-1295, Sep 2011.

THOMPSON, S. A. Na overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. **International Endodontic Journal**, 33, n. 4, p. 297-310, Jul 2000.

TIAN, H.; SCHRYVERS, D.; LIU, D.; JIANG, Q. *et al.* Stability of Ni in nitinol oxide surfaces. **Acta Biomater**, 7, n. 2, p. 892-899, Feb 2011.

VIANA, A. C.; MELO, M.; BAHIA, M.; BUONO, V. T. Relationship between flexibility and physical, chemical, and geometric characteristics of rotary nickel-titanium instruments. **Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology**, 110, n. 4, p. 527-533, Oct 2010.

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

ZHOU, H. M.; SHEN, Y.; ZHENG, W.; LI, L. *et al.* Mechanical properties of controlled memory and superelastic nickel-titanium wires used in the manufacture of rotary endodontic instruments. **Journal of Endodontics**, 38, n. 11, p. 1535-1540, Nov 2012.

ZHOU, H.; PENG, B.; ZHENG, Y.-F. Na overview of the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. **Endodontic Topics**, 29, n. 1, 2013.

ZINELIS, S.; ELIADES, T.; ELIADES, G. A metallurgical characterization of tem endodontic Ni-Ti instruments: assessing the clinical relevance of shape memory and superelastic properties of Ni-Ti endodontic instruments. **International Endodontic Journal**, 43, n. 2, p. 125-134, Feb 2010.

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