

Comparativo da resistência a fadiga cíclica de dois instrumentos rotatórios de Níquel-Titânio

Comparative of resistance to fatigue cyclic two rotary instruments of Nickel-Titanium

Comparación de la resistencia a la fatiga cíclica de dos instrumentos rotativos de Níquel-Titanio

Recebido: 12/07/2024 | Revisado: 09/08/2024 | Aceitado: 12/08/2024 | Publicado: 15/08/2024

João Marcelo Ferreira de Medeiros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1270-5775>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: ferreirademedeiros@yahoo.com.br

Caleb Shitsuka

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9813-0457>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: cashitsuka@gmail.com

José Lucas Martins

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4968-4688>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: lucas.martins@universidadebrasil.edu.br

Pedro Luiz de Carvalho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4237-0582>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: pedrolc@ufpa.br

Miguel Simão Haddad Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5731-1051>

Universidade São Francisco, Brasil

E-mail: miguel.filho@usf.edu.br

Graziela Salum

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0286-7175>

Universidade de Taubaté, Brasil

E-mail: grasalum@hotmail.com

Resumo

O propósito desta pesquisa foi analisar in vitro a resistência à fadiga cíclica de dois diferentes sistemas rotatórios ProFile Vortex® (Dentsply Tulsa Dental, USA) e ProTaper® (Dentsply Maillefer, Suíça) considerando o número de ciclos, tempo e o tamanho da porção fraturada dos instrumentos utilizados em canais radiculares curvos de aço em um dispositivo. Dividiram-se quarenta instrumentos em dois grupos. Grupo A: vinte instrumentos ProFile Vortex® n°25; 25mm; conicidade.06, e Grupo B: vinte instrumentos ProTaper® F1; 25mm. Após processo de limpeza dos instrumentos foi avaliado a resistência à fadiga cíclica submetendo-se todos os instrumentos a ensaio dinâmico em dispositivo desenvolvido até a ocorrência da fratura constatada visualmente. O número de ciclos até a fratura, tempo expresso em segundos e o tamanho da porção fraturada foi registrado e realizou-se estatística descritiva, o teste “t” de Student e o teste U de Mann-Whitney. Os instrumentos Profile Vortex® apresentaram maior resistência à fadiga cíclica, tempo e tamanho da porção fraturada dos instrumentos com significado estatístico (P valor<0,05) comparados com instrumentos Protaper®. Concluiu-se que os instrumentos Profile Vortex® completaram maior número de ciclos e levaram mais tempo para fraturar comparados aos instrumentos ProTaper®. A porção do instrumento fraturado em milímetros foi maior para as limas Profile Vortex®.

Palavras-chave: Endodontia; Instrumentos odontológicos; Níquel; Titânio; Preparo do canal radicular; Fadiga; Resistência à flexão; Fraturas por torsão.

Abstract

The purpose of this study was to analyze in vitro the cyclic fatigue resistance of two different rotary systems, ProFile Vortex® (Dentsply Tulsa Dental, USA) and ProTaper® (Dentsply Maillefer, Switzerland), considering the number of cycles, time and size of the fractured portion of the instruments used in curved steel root canals in a device. Forty instruments were divided into two groups. Group A: twenty ProFile Vortex® instruments No. 25; 25mm; taper .06 and Group B: twenty ProTaper® F1 instruments; 25mm. After the instrument cleaning process, the cyclic fatigue resistance was evaluated by subjecting all instruments to dynamic testing in a device developed until the occurrence of visually detected fracture. The number of cycles until fracture, time expressed in seconds and the size of the fractured portion were recorded and descriptive statistics, Student's t-test and the Mann-Whitney U test were performed. Profile Vortex®

instruments showed higher cyclic fatigue resistance, time and size of the fractured portion of the instruments with statistical significance (P value <0.05) compared to Protaper® instruments. It was concluded that Profile Vortex® instruments completed a greater number of cycles and took longer to fracture compared to ProTaper® instruments. The fractured portion of the instrument in millimeters was greater for Profile Vortex® files.

Keywords: Endodontic; Dental instruments; Nickel; Titanium; Root canal preparation; Fatigue; Flexural strength; Torsional fractures.

Resumen

El propósito de esta investigación fue analizar in vitro la resistencia a la fatiga cíclica de dos sistemas rotativos diferentes ProFile Vortex® (Dentsply Tulsa Dental, USA) y ProTaper® (Dentsply Maillefer, Suiza) considerando el número de ciclos, tiempo y tamaño del Porción fracturada de instrumentos utilizados en conductos radiculares de acero curvados en un solo dispositivo. Cuarenta instrumentos se dividieron en dos grupos. Grupo A: veinte instrumentos ProFile Vortex® nº25; 25 mm; taper.06 y Grupo B: veinte instrumentos ProTaper® F1; 25 mm. Después de limpiar los instrumentos, se evaluó la resistencia a la fatiga cíclica sometiendo todos los instrumentos a pruebas dinámicas en un dispositivo desarrollado hasta que se produjo la fractura visualmente. Se registró el número de ciclos hasta la fractura, el tiempo expresado en segundos y el tamaño de la porción fracturada y se realizó estadística descriptiva, prueba “t” de Student y prueba de U-Mann-Whitney. Los instrumentos Profile Vortex® mostraron mayor resistencia a la fatiga cíclica, el tiempo y el tamaño de la porción fracturada de los instrumentos con significación estadística (valor de $P <0,05$) en comparación con los instrumentos Protaper®. Se concluyó que los instrumentos Profile Vortex® completaron un mayor número de ciclos y tardaron más en fracturarse en comparación con los instrumentos ProTaper®. La porción del instrumento fracturada en milímetros fue mayor para las limas Profile Vortex®.

Palabras clave: Endodencia; Instrumentos dentales; Níquel; Titanio; Preparación del conducto radicular; Fatiga; Resistencia flexional; Fracturas por torsión.

1. Introdução

Wei et al. (2007) investigaram modo de fratura das limas rotatórias ProTaper após uso clínico determinando melhor modo de fratura em 100 limas ProTaper fraturadas analisando sob estereomicroscopia presença de deformação plástica na aresta de corte no local de fratura e, em exames fractográficos e longitudinais feitos em microscópio eletrônico de varredura (MEV). A estereomicroscopia revelou 88 casos de flexão e 12 casos de torção enquanto fractomicrografias constatou 91 casos de flexão com estrias de fadiga e 3 casos de torção com marcas de abrasão. Em 6 limas falhas de flexão e torção além de rachaduras e microfissuras achados em micrografias. Ao exame da superfície fraturada em alta ampliação por MEV representou método melhor revelando modo de fratura da lima de NiTi.

Johnson et al. (2008) garantiram que limas ProFile Vortex são fabricadas a partir de Ni-Ti modificado conhecido como *M-wire* produzido por meio da aplicação de uma série de tratamentos térmicos à liga de Ni-Ti. Indicam que uso do *M-Wire* aumentou a resistência à fadiga da lima mantendo as mesmas propriedades de torção das limas Ni-Ti tradicionais. Aliás, o sistema Profile Vortex feito com *design* de ângulos helicoidais específicos sugere que esta geometria desempenha capacidade de corte mais eficiente.

Gambarini et al. (2008) compararam limas Twisted File fabricadas por torção e limas GT series X de liga *M-Wire*, com limas K3, por métodos de usinagem. GA: 10 limas K3 e 10 limas Twisted File, ambas tamanho 25 e conicidade .06; GB: 10 limas K3 e 10 limas GTX, ambos tamanhos 20 e .06 de conicidade. Testes em dispositivo avaliou resistência à fadiga cíclica da lima por meio de ciclos até a fratura. As limas *M-Wire* não mostraram maior resistência à fadiga cíclica comparadas com limas fabricadas por usinagem.

Kell et al. (2009) ressaltaram que o *M-Wire* (Sportswire LLC, Langley, OK) foi criado alterando temperaturas da liga durante o processo de fabricação das limas GT série X. Investigaram perfis de torção de limas novas e usadas 20/0.06 GT série X (GTX) e GT (GT). Utilizaram 30 limas 2, 6 ou 10 vezes em canais simulados permanecendo como controles as não usadas ocorrendo significado estatístico em testes de torque e ângulo de fratura entre grupos experimentais. As limas GTX mostraram aumento significativo em testes de torque com dois e seis usos em contraste com o GT que mostrou redução linear em testes de torque com aumento do uso. Não ocorreu significado estatístico entre limas GTX e GT em ângulo de fratura de novas limas, mas

mostraram redução significativa em ângulo de fratura em todos grupos, exceto o grupo de 2 usos GT. Concluíram que as limas GTX tiveram maior resistência à fratura torcional após uso em comparação com o GT.

Gao et al. (2010) analisaram resistência à fadiga de limas Profile Vortex de diferentes materiais: *M-Wire* e regular Wire (*SE-Wire*), em diferentes velocidades, 300 e 500rpm e conicidades .04 e .06 em 160 canais artificiais de aço inoxidável, com 5mm de raio e 90° de curvatura e tempo até fratura e números de ciclos até fratura comparados. Enquanto a área da lima fraturada em microscópio eram mais de 50% das limas *SE-Wire* com fraturas e com várias trincas as limas *M-Wire* tinham única trinca. Limas com diferentes materiais e velocidades exibiram significado estatístico, porém, sem significado estatístico as limas com mesmo material a diferentes velocidades. Limas feitas com *M-Wire* exibiram maior resistência à fadiga cíclica em relação as limas com *SE-Wire*. Concluíram, tratamento térmico da liga elevou resistência prolongada à fadiga das limas Vortex e tal fato foi particularmente favorável em altas velocidades.

Peters e Peters (2011) relevaram que as limas Profile Vortex com numeração de 15 a 50, 8 limas com conicidades .04 e .06. e comprimentos 21, 25 e 30 milímetros. Todas com secção transversal triangular, maior resistência, ponta inativa, ausência de arestas radiais e *design* com ângulos helicoidais específicos sugerindo maior poder de corte sendo influenciada pela velocidade. A velocidade de cada lima varia e as limas Vortex podem ser operadas até 500rpm, portanto, esta variável, isto é, velocidade de rotação feita para trabalhar em velocidade superior comparada a 300 rpm graças ao tratamento térmico na área de corte da lima o que de acordo com fabricante a torna mais flexível e com maior resistência à fratura.

Bardsley (2011) pesquisaram 3 diferentes velocidades considerando torque e força apical em canais simulados em forma de S preparados com limas Vortex #15 a #30 e conicidade .04 (n=12/grupo). A sequência de preparo atendeu especificações do fabricante: #30, #25 e #20 introduzidos dentro do canal progressivamente utilizando técnica *crown-down*, #15 preparou todo comprimento do canal e alargamento apical com limas 20 e 25. Um total de 216 preparos usando plataforma e velocidades aplicadas de 200, 400 e 600rpm com 2 ciclos de vai-e-vem e avanços em profundidade pré-definidos sendo torque e força apical registrados. Torque e força apical oscilaram sendo maiores no grupo de 200rpm em todos os tamanhos. O torque e força foram reduzidos em 32% e 48%, respectivamente em até 400rpm não ocorrendo reduções quando a velocidade aumentou a 600rpm. A velocidade das limas Vortex no grupo 400rpm, produziu menos torque e força, comparados com o grupo de 200rpm.

Pereira et al. (2012) cotejaram propriedades físicas e mecânicas de 2 fios com 1,0mm de diâmetro distintos, processado de modo convencional (*C-Wire*) e outro produzido por tratamento térmico (*M-Wire*). A composição química dos fios foi determinada por espectroscopia de energia dispersiva de raio-X, fase de constituição por difração de raio-X e as temperaturas de transformação foram medidas por escaneamento calorimétrico diferencial. O fio *M-Wire* tem propriedades que propiciam mais flexibilidade e resistência à fadiga cíclica comparada a fios convencional processados.

Gao et al. (2012) testaram *M-Wire* NiTi, NiTi convencional e aço inox na resistência à fadiga, propriedades torcionais, flexibilidade e dureza Vickers, comparando com lima Profile Vortex Blue 25 e .06 de conicidade em canal de aço inoxidável raio de 5mm, ângulo de curvatura de 90° e velocidade de 500rpm. O teste de microdureza aplicado na secção transversal das limas com 300gf de carga e tempo de 15 segundos. Significado estatístico no teste de fadiga cíclica e flexibilidade das limas com materiais diferentes sendo lima Profile Vortex Blue NiTi em primeiro lugar na resistência à fadiga e flexibilidade seguida a *M-Wire* NiTi, NiTi convencional e aço inoxidável. Resistência a torção e microdureza do aço inoxidável *M-Wire* NiTi em primeiro lugar e segundo, respectivamente sem significado estatístico entre NiTi convencional e Vortex Blue. A Vortex Blue e *M-Wire* NiTi tiveram vantagens sobre NiTi convencional e lima Profile Vortex Blue maior resistência à fadiga e flexibilidade comparada com Vortex ProFile *M-Wire*.

Bouska et al. (2012) avaliaram limas Profile Vortex, Twisted File, Profile, GTX e Endosequence quanto a resistência à fadiga cíclica limas de diferentes geometrias e métodos de fabricação, mesmo tamanho #25, mesma conicidade .06, velocidades e torques segundo fabricante em canais simulados de aço, curvatura de 60° e raio de 5mm obtendo significado estatístico entre

as limas graças a diferentes processos de fabricação ou diferenças geométricas. As limas ProFile Vortex, Twisted File e GTX exibiram maior resistência à fadiga cíclica em relação as limas EndoSequence e ProFile.

Al Sudani et al. (2012) avaliaram resistência à fadiga de limas ProFile e Vortex em canal artificial de aço com dupla curvatura sendo primeira 60° e raio de 5mm e a segunda curva mais apical, ângulo de 70° e raio de 2mm e em canal de aço inox com curva única ângulo de 60° de curvatura e raio de 5mm. Em 10 limas de mesma conicidade e diâmetro de ponta (25/.06), velocidade constante de 300rpm, movimento de rotação contínua à direita, até a fratura. O número de ciclos a fratura foi sempre menor para o canal com dupla curvatura do que com uma única curvatura com significado estatístico. No canal com dupla curvatura a fratura sempre ocorreu primeiro na curvatura mais apical do que na curvatura mais coronária. Tal fato foi atribuído a mudança abrupta do raio de curvatura da porção coronária para a apical, isto é, de 5mm para 2mm. Significado estatístico ocorreu entre limas fraturadas das diferentes marcas, apenas no canal artificial com única curva. As limas ProFile registraram média de 633,5 ($\pm 75,1$) ciclos a fratura, enquanto as limas Vortex registraram 548 ($\pm 48,9$) ciclos. Essas diferenças entre as limas sugerem que quanto mais complexa a anatomia do canal, mais adversos são as consequências na resistência das limas à fadiga.

Lopes (2013) compararam o comportamento mecânico de limas de NiTi com forma geométrica semelhante, porém, produzidos por métodos de fabricação diferentes em 30 limas 25/.06 RaCe, com 25 mm de comprimento, de fio de NiTi convencional (usinados), 30 limas especiais 25/.06 Twisted File (TF), com 27mm de comprimento, fabricados por torção e 30 limas 25/.06 ProFile Vortex, com 25mm de comprimento, liga *M-Wire* empregados no teste de flexibilidade, flexão rotatória e de torção. Ocorreu significado estatístico entre valores de carga máxima decrescente na seguinte ordem: ProFile Vortex>RaCe>TF. Ao ensaio de flexão rotatória as limas Race com menor significado estatístico a fratura do que limas ProFile Vortex, as quais foram significativamente inferiores as limas TF com relação ao tempo e número de ciclos a fratura. No ensaio de torção, as limas ProFile Vortex com maiores valores de força máxima e torque máximo antes da fratura, seguidos pelas limas RaCe e TF. As limas TF mais flexíveis que as limas RaCe e menos resistentes à flexibilidade que as limas ProFile Vortex. Quanto ao ensaio de flexão rotatória, as limas TF mostraram atuação significativamente superior em relação ao tempo e número de ciclos a fratura que outras limas testadas existindo clara relação entre flexibilidade e resistência à torção. A lima mais flexível (TF) foi menos resistente à torção e a lima ProFile Vortex mais resistente à torção e menos flexível.

Braga et al. (2014) analisaram influência do *M-Wire* e das tecnologias de memória controlada na resistência à fadiga de limas rotatórias de NiTi, comparando limas feitas com essas 2 tecnologias com limas NiTi convencionais. Foram escolhidas novas limas 30/.06 da EndoWave, HyFlex, sistemas ProFile Vortex e Typhoon juntamente com limas ProTaper Universal F2. As composições e temperaturas de transformação das limas foram analisadas utilizando espectroscopia de energia dispersiva de raios X e calorimetria diferencial de varredura. O número de ciclos a fratura foi determinado usando dispositivo de teste de fadiga. A análise de espectroscopia de energia dispersiva de raios X mostrou que, em média, todas as limas exibiam a mesma composição química, ou seja, 51% níquel e 49% titânio. As Limas ProFile Vortex, Typhoon e HyFlex exibiram temperaturas de transformação aumentadas. Os valores médios do número de ciclos a fratura foram 150% maiores para as limas Typhoon comparada as limas ProFile Vortex e 390% maiores para as limas HyFlex em comparação com as limas EndoWave. Concluíram que, as tecnologias *M-Wire* e de memória controlada (CM) aumentam a resistência à fadiga das limas rotatórias de Ni-Ti.

Pereira et al. (2015) investigaram se limas Ni-Ti com *designs* semelhantes fabricados por diferentes tratamentos térmicos apresentariam comportamento *in vitro* significativamente diferente em 36 limas ProTaper Universal, ProFile Vortex, Vortex Blue e TYPHOON Infinite Flex NiTi todos os tamanhos 25/.06 avaliados quanto a resistência à flexão, torção na fratura e testes dinâmicos de torção realizados com as limas (n=12). A flexibilidade significativamente maior para o TYPHOON em comparação com outros 3 grupos. Com relação ao torque máximo a fratura, o grupo ProFile Vortex apresentou maior resistência à torção entre as limas analisadas, seguido pelo Vortex Blue, TYPHOON e ProTaper Universal. Os escores médios de torque dinâmico foram maiores para TYPHOON ($3,01 \pm 0,71$ Ncm) e menores para ProFile Vortex ($1,62 \pm 0,79$ Ncm) sem significado

estatístico entre os grupos ProTaper Universal com TYPHOON e Vortex Blue e este último com ProFile Vortex. As limas TYPHOON foram significativamente mais flexíveis do que as limas testadas. A ProFile Vortex apresentou maior resistência a torção e TYPHOON, apesar de ser mais flexível, apresentou momentos torcionais semelhantes as demais limas.

Shim et al. (2017) averiguaram efeito do tratamento termomecânico nas propriedades mecânicas e metalúrgicas de limas de Ni-Ti em 8 tipos de limas com tamanhos ISO #25: ProFile, K3 e One Shape para a liga convencional; ProTaper NEXT, Reciproc e WaveOne para a liga M-wire; HyFlex CM para o fio de memória controlada (CM) e TF para a liga da fase R. Fizeram testes de fratura por torção e por fadiga cíclica sendo submetidos análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os grupos fio CM e fase R apresentaram menor módulo de elasticidade, seguidos pela *M-Wire*. O torque máximo da lima *M-Wire* foi comparável a lima convencional, enquanto limas CM e fase R foram menores. Foi maior resistência à fadiga cíclica das limas NiTi tratados termomecanicamente.

Zupanc et al. (2018) confirmaram que vários procedimentos de processamento das ligas de Ni-Ti foram idealizados para melhorar propriedades mecânicas das limas de NiTi. Além de tratamentos térmicos e mecânicos foram incluídos várias tecnologias de usinagem a exemplo de torção, usinagem por descarga elétrica, bem como técnicas de acabamento superficial final. As ligas de NiTi podem ser subdivididas em limas que contêm a fase austenítica (austenítica: NiTi convencional, M-Wire, R-Phase) e as que contêm a fase martensítica (martensítica: CM Wire, Gold e Blue tratados termicamente). As ligas de NiTi tratadas termomecanicamente são mais flexíveis, superior resistência à fadiga cíclica e maior ângulo de deflexão na fratura comparadas ao NiTi convencional. Estas propriedades melhoradas podem ser atribuídas a uma composição de fase modificada contendo quantidades variáveis de fase R e martensita. Limas feitas de ligas austeníticas possuem propriedades superelásticas devido à transformação martensítica induzida por tensão tendendo a retornar à forma original após deformação. Em contraste, as limas martensíticas são facilmente deformadas devido à reorientação das variantes de martensita e apresenta efeito de memória de forma quando aquecidos. O uso de liga martensítica resulta em limas mais flexíveis, com maior resistência à fadiga cíclica em comparação com a liga austenítica.

Topçuoğlu et al. (2020) confrontaram resistência à fadiga cíclica de 3 limas de Ni-Ti com memória controlada (CM) (One Curve, EdgeFile e HyFlex CM) em comparação com lima ProTaper Next feita de liga de Ni-Ti *M-wire* em 2 temperaturas diferentes (ambiente e intra-canal) em canal artificial em forma de S. Em 160 limas testaram a resistência a fadiga das 4 marcas de limas sendo número de ciclos até a fratura e os dados analisados. Em ambas temperaturas, a ProTaper Next exibiu a resistência a fadiga cíclica mais baixa comparada as outras limas. Nenhuma diferença à temperatura ambiente entre 3 limas CM relacionada à resistência a fadiga. Na temperatura intra-canal, o One Curve e o EdgeFile com maior resistência a fadiga que HyFlex CM. A temperatura intra-canal causou redução significativa na resistência a fadiga em todas limas comparada à temperatura ambiente.

Silva et al. (2020) compararam propriedades mecânicas e metalúrgicas e capacidade de modelagem de diferentes sistemas rotatórios. Novo NeoNiti A1, HyFlex EDM One File, ProTaper Gold F2 e ProTaper Universal F2 foram testadas quanto à fadiga cíclica, resistência à torção, *design* e atributos morfológicas em microscopia eletrônica de varredura, caracterização de ligas metálicas usando calorimetria diferencial de varredura e espectroscopia de energia dispersiva de raios X. A maior fadiga cíclica foi vista com limas NeoNiti e HyFlex EDM, enquanto o HyFlex EDM teve a maior rotação angular até a fratura. Análises espectroscópicas de raios X por microscopia eletrônica de varredura/energia dispersiva confirmaram semelhanças no *design* das limas e composição dos sistemas. A calorimetria diferencial de varredura mostrou que o ProTaper Gold teve temperaturas de transformação mais altas que ProTaper Universal, enquanto transformação semelhante foi observada entre o NeoNiti e o HyFlex.

Chhabra et al. (2023) estudaram vida útil de lima rotatória Neoendo Flex e ProTaper Next (PTN) em movimento alternado e compararam tempo necessário em ambos sistemas no preparo do canal. Selecionaram 100 incisivos centrais permanentes superiores e em 50 dentes usou movimento recíproco (RM) com a lima PTN (n=25) e a lima Neoendo Flex (n=25). A resistência à fratura e o tempo total de preparo do canal radicular, em 50 dentes utilizou em movimento contínuo (CM) em

canais preparados com PTN (n=25) e Neoendo Flex (n=25). Em RM, tanto as limas PTN quanto as Neoendo Flex podem ser usadas em um mínimo de 25 canais em dentes uniradiculares e sem significado estatístico no tempo total gasto pelo PTN e Neoendo Flex em ambos movimentos. O movimento recíproco foi melhor que o movimento contínuo com menor incidência de fratura das limas.

Grande et al. (2023) mostrou que introdução de limas de NiTi mudou rapidamente a endodontia clínica nas últimas décadas. Antes do NiTi, era necessário uso de mais limas no preparo do canal radicular, mais abordagens, sequências e técnicas desenvolvidas ao longo dos anos. Atualmente, limas de NiTi sofreram uma série de alterações no *design*, tratamentos de superfície e térmicos com vistas a melhores resultados da instrumentação que sofrem riscos associados a preparação do canal durante o tratamento. O tratamento térmico é uma das abordagens mais fundamentais na melhoria da resistência à fadiga e a flexibilidade das limas de NiTi e novas cinemáticas foram desenvolvidas oferecendo maior segurança e eficiência.

Assaf et al. (2024) avaliaram 80 novas limas de tamanhos de ponta e conicidade semelhantes (#25/0,06) de 2 sistemas NiTi, One Curve e E3 Azure em dispositivo de fadiga cíclica divididos em 4 subgrupos conforme localização da curvatura do canal. Uma coronária a 5 mm do orifício do canal radicular e outra apical a 10 mm do orifício do canal e ângulo de acesso à lima (0° ou 30°). As limas feitas em canais simulados de aço inoxidável com curvatura de 60° e um raio de 3 mm em dispositivo feito para picos verticais controlados durante a rotação da lima. O tempo até fratura foi registrado e o comprimento dos segmentos do fragmento foi medido. Examinaram limas fraturadas em microscópio eletrônico de varredura que exibiu significado estatístico das limas revelando menor resistência à fadiga cíclica quando o ângulo de acesso da lima era de 30° e curvatura do canal radicular localizada coronalmente em ambas limas. O ângulo de acesso da lima contribuiu na fadiga cíclica, seguido a localização da curvatura da lima e, por fim, tipo de lima. O exame fractográfico revelou modo de fratura predominantemente dúctil em todas limas testadas. As limas OC com resistência superior à fadiga em relação limas EZ sendo que curvaturas coronais impactaram uniformemente a resistência à fadiga cíclica em comparação com curvaturas apicais.

Diaconu et al. (2024) avaliaram a resistência à fadiga cíclica das limas Protaper Ultimate (PTU) em comparação com as limas Protaper Gold (PTG) e M3 UDG (M3) em várias cinemáticas de movimento em canais simulados num total de 60 novas limas divididas em 6 grupos (10 limas por grupo). Os grupos 1, 3 e 5 usaram rotação contínua enquanto os grupos 2, 4 e 6 usaram movimento recíprocante para frente em canal de aço inoxidável na realização do teste de fadiga cíclica. Em todas comparações ocorreram significado estatístico no tempo até a fratura para cada grupo de estudo, exceto as limas PTG e M3, que tiveram desempenho semelhante usando rotação contínua e recíproca. Concluíram que as limas PTU tiveram desempenho melhor do que as limas PTG e M3 em termos de tempo até a fratura e número de ciclos até a fratura usando os 2 movimentos.

Hamid et al. (2024) compararam o efeito do tratamento térmico na resistência à fadiga cíclica de 3 diferentes sistemas de limas rotatórias de NiTi: TruNatomy, HyFlex CM e NeoEndo flex em canais curvos simulados em dois raios de curvatura diferentes. Um total de 60 limas rotatórias de NiTi sendo as amostras divididas em 3 grupos TruNatomy, HyFlex CM e NeoEndo flex. Todos as limas foram submetidas a testes de fadiga cíclica usando canal de aço inoxidável com ângulo de curvatura de 60° e dois raios de curvatura de 5 mm e 3 mm. O número de ciclos a fratura de lima em raio de curvatura de 3mm foi significativamente menor comparada com raio de curvatura de 5mm (HyFlex CM>TruNatomy>NeoEndo flex).

Abdellatif et al. (2024) investigaram limas de Ni-Ti quanto a resistência fadiga cíclica e incidência de fratura em revisões sistemáticas e ensaio clínico sendo que nesta revisão abrangente ligas mais frequentemente registradas foram *M-Wire*, Ni-Ti convencional e *CM-Wire* em artigos, com limas de liga *M-Wire*, e em artigos com limas de Ni-Ti convencionais e 7 artigos, limas de liga *CM-Wire*. Concluíram que evolução tecnológica das ligas de Ni-Ti levou acréscimo de limas endodônticas de desempenho cada vez maior, resistentes à fadiga cíclica durante a prática clínica e com maior resistência a esterilização, tornando o tratamento mais fácil e previsível a longo prazo. As limas endodônticas de NiTi tratados termicamente apresentam maior resistência à fadiga cíclica do que os não tratados e aqueles usados com cinemática recíprocante em relação à rotação contínua.

A necessidade em diminuir o índice de fraturas e aumentar a eficácia de corte do instrumento durante o preparo do canal radicular parece válida mais investigações que procura elucidar a superioridade das propriedades mecânicas de instrumentos rotatórios de níquel-titânio bem como orientar o profissional na escolha do sistema melhor para ser utilizado. Portanto, o propósito desta pesquisa foi analisar *in vitro* a resistência à fadiga cíclica de dois diferentes sistemas rotatórios ProFile Vortex® (Dentsply Tulsa Dental, USA) e ProTaper® (Dentsply Maillefer, Suíça) considerando o número de ciclos, tempo e o tamanho da porção fraturada dos instrumentos.

2. Materiais e Métodos

Foram selecionadas 40 limas rotatórias de níquel-titânio, divididos da seguinte maneira: Grupo A: vinte instrumentos do sistema ProFile® Vortex™ (Dentsply Tulsa Dental; Tulsa-USA) com 25 milímetros de comprimento, diâmetro 25 e conicidade .06. Grupo B: vinte limas F1 do Sistema ProTaper Universal® (DentsplyMaillefer,Ballaigues-Suíça) com 25 milímetros de comprimento (Figura 1).

Figura 1 – Limas ProFile Vortex Taper 25.06 e limas ProTaper Universal F1.



Fonte: Autores.

Para as leituras em microscopia eletrônica de varredura (MEV), as limas foram submetidos a limpeza inicialmente com lavagem em água corrente sendo mecanicamente limpos com solução detergente neutro e escova e após levados para uma cuba ultrassônica (Maxclean 700; Indaiatuba-São Paulo) com sistema de aquecimento por dez minutos utilizando água/detergente enzimático na diluição de 5mL por litro de água. Em seguida, foi realizada a secagem das limas com compressa dupla e as mesmas foram armazenadas em recipientes metálicos designados à identificação de cada lima.

Uma vez realizado o processo de limpeza das limas, realizou-se a leitura em microscopia eletrônica de varredura (SEM-LV JSM 5900 (CNPEM/Campinas - São Paulo – Brasil) a fim de verificar se alguma lima apresentava alteração ou falha na sua fabricação e, nesse caso, seria excluída. Esta análise microscópica foi realizada no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM, Campinas, São Paulo).

A realização dos ciclos de uso consistiu na instrumentação dos blocos de canais simulados por meio das limas dos grupos onde em cada um deles colocou-se cursores de silicone em 20mm de comprimento. Utilizou-se motor elétrico EndoMax Instrumentação Mecanizada (Adiel; Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil) valendo-se de movimento contínuo e velocidade preconizada pelo fabricante, isto é, 500rpm para a lima Vortex e 350rpm para a lima ProTaper torque determinado em 2.0 Newton (Ncm) (Figura 2a). Cada bloco selecionado com canais simulados possuía 75° de curvatura, confeccionados à base de resina fenólica (Baquelite®).

Figura 2 – (a) instrumentos e motor elétrico EndoMax Instrumentação Mecanizada; (b) preparo do canal simulado.



Fonte: Autores.

A instrumentação foi realizada com movimentos de bicada (*pecking motion*), conforme instrução do fabricante, exercendo suave pressão em direção ao limite de trabalho, com retrocesso e nova penetração, totalizando-se dez movimentos para cada instrumento em cada canal simulado. A referida manobra foi repetida nas amostras seguintes, estabelecendo uma lima usada em cinco canais simulados (Figura 2b).

Uma vez realizadas a instrumentação nos canais simulados as limas que estavam acomodados em recipientes metálicos identificando cada grupo tanto aqueles sem uso e com cinco usos foram submetidas a ensaios para avaliar a resistência a fadiga cíclica e o tempo despendido aferido por um cronômetro. Para tal fim, foi utilizado dispositivo (Figura 3a, b, c, d) que permite a livre rotação das limas em canal artificial curvo e ainda o descolamento axial dos mesmos, simulando a condição geométrica limite da instrumentação rotatória na prática clínica, levando em consideração a região de máxima curvatura.

Figura 3 – (a) Motor elétrico utilizado para o acionamento dos instrumentos; (b) dispositivo utilizado para o ensaio dinâmico; (c) fonte de alimentação que contém os dispositivos de regulação de rotação e o contador de pulso; (d) cronômetro digital.



Fonte: Autores.

Posteriormente à visualização no microscópio eletrônico de varredura, as limas que estavam acomodados em recipientes metálicos identificando cada grupo, sofreram os ensaios para avaliar a resistência à fadiga cíclica. Para tal fim, foi utilizado um dispositivo que permite a livre rotação das limas em um canal artificial curvo metálico e ainda o descolamento axial dos mesmos, simulando a condição geométrica limite da instrumentação rotatória na prática clínica, levando em consideração a região de máxima curvatura.

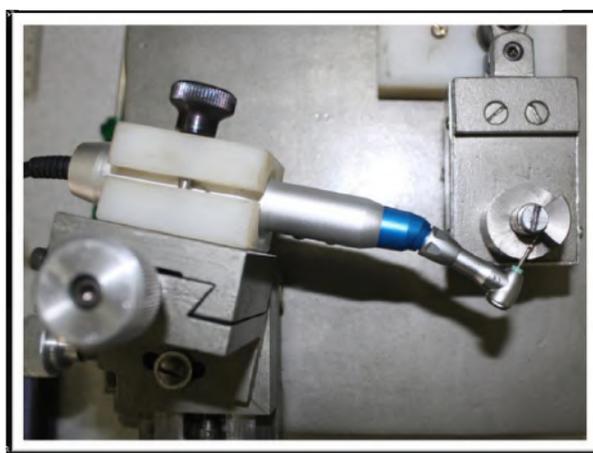
O dispositivo foi desenvolvido no Laboratório de Usinagem – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté. O desenho deste dispositivo assemelhou-se ao aparelho utilizado em outros estudos (Gavini 2006) que também realizou em seus experimentos sem a influência do operador.

O dispositivo consistiu em uma base de ferro de 20X20X7cm (Figura 3b), apoiada em quatro pés de borracha para evitar vibrações durante o ensaio. No interior desta base, localiza-se o motor que proporciona movimento axial do canal artificial. Sobre ela, foram posicionados suportes para fixação do contra ângulo e do canal artificial. A fonte de alimentação que contém os

dispositivos de regulagem de rotação e o contador de pulso foram acoplados e posicionados próximos a base de teste (Figura 3c).

Esse experimento foi realizado no Laboratório de Materiais e Nanotecnologia - Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté - São Paulo. Durante a realização do ensaio dinâmico o contra ângulo permaneceu em uma posição fixa, presa por braçadeiras aparafusadas na base de ferro. O suporte que sustentava o contra ângulo possuía um mecanismo regulável, tanto no sentido vertical, quanto horizontal o que permitia sua movimentação em três eixos X-Y-Z e movimento angular. Após as limas serem acoplados a este contra ângulo, regulava-se a altura do suporte de maneira que a lima era inserida no canal artificial numa trajetória retilínea, sem tensões, permitindo sua livre rotação no sentido horário (Figura 4).

Figura 4 - Contra ângulo posicionado no dispositivo de bancada.



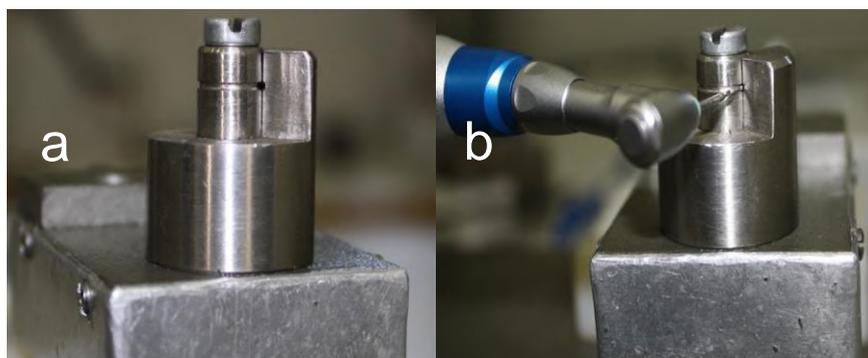
Fonte: Autores.

O movimento axial do instrumento foi o deslocamento do canal artificial, por meio de um sistema excêntrico acoplado a dois transladores de mesma direção e um motor DC de 24V. A velocidade de deslocamento axial do canal artificial foi ajustada por meio de uma fonte regulável. Assim, quando o painel desta fonte regulável marcava o nº 5 o canal artificial deslocava-se em direção ao instrumento a ser testado, 140 por minuto, que por sua vez, registrava no contador de pulso, 140 ciclos. Isto é o mesmo que dizer que os instrumentos entravam e saíam do canal artificial 140 vezes por minuto.

Este dispositivo, elaborado especialmente para esta pesquisa regulava a frequência e a amplitude do movimento da lima dentro do canal simulado. Independente da velocidade de deslocamento do canal artificial, as limas deslocavam-se numa amplitude de 1,5mm para dentro do canal artificial e 1,5mm em direção contrária.

O canal artificial foi confeccionado a partir de uma peça de aço inoxidável (Al Sudani et al. 2012), temperada e usinada na forma de um arco cuja curvatura se ajustou a um cilindro guia, de 25mm de comprimento e feito do mesmo material, com um ângulo de curvatura de 45° e raio de 5mm. Tanto o arco quanto o cilindro guia possuíam um sulco de 1mm de profundidade, localizado à 5mm de sua extremidade superior de maneira a coincidir com a altura em que estava posicionado o contra ângulo. Este sulco serviu como um trajeto guia para a lima, que permaneceu curvado e com liberdade para girar entre o cilindro e o arco externo (Figura 5a e b).

Figura 5 - (a) Conjunto arco mais cilindro guia compondo o canal artificial (b) adaptação da parte ativa do instrumento no sulco correspondente ao canal artificial.



Fonte: Autores.

O posicionamento dos instrumentos no canal artificial, de forma a definir o ponto de curvatura máxima em torno de 4mm da ponta, foi realizado considerando a região da lima submetida às condições mais severas de deformação cíclica durante o preparo de canais radiculares curvos (Spanaki-Voreadi et al. 2006). Durante os ensaios, as limas foram posicionadas, de tal forma, que houve um pequeno transpasse (cerca de 1mm) da ponta das limas para além do término das paredes do canal artificial, permitindo a visualização de suas extremidades (Gavini 2006), fato este que facilitou a marcação do momento preciso da fratura. Assim, no exato momento em que o motor elétrico era acionado, era também acionado o motor responsável pelo deslocamento do canal artificial que iniciava seu movimento axial permitindo que a lima, em rotação contínua, penetrasse e saísse do canal simulado até que a fratura fosse percebida por meio de inspeção visual. Desta forma, o tempo decorrido entre o acionamento do motor e a constatação visual da fratura foi registrado em um cronômetro digital. O número de ciclos até a fratura foi registrado pelo contador de pulso, resultado este confirmado, multiplicando-se a velocidade de rotação pelo tempo gasto até a fratura.

Os dados relativos foram tabulados e submetidos à análise estatística por meio do programa BioEstat 5.0 mostrando média aritmética dos dados, desvio padrão, coeficiente de variação, teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos dados e inferência estatística utilizando nível de significância de 5%. Teste paramétrico “t” de Student para comparação de duas amostras independentes foi aplicado, já que os dados foram normalmente distribuídos, assim como o teste não paramétrico de Mann-Whitney, para comparar aquelas amostras onde os dados não foram normalmente distribuídos.

3. Resultados

A Tabela 1 nota-se que quando se comparam as duas limas sem uso sendo que a ProfileVortex® apresentou número maior de ciclos até a fratura demonstrando maior resistência em relação a lima ProTaper® com significado estatístico ($p < 0,05$).

Tabela 1 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov do número de ciclos a fratura entre limas Profile Vortex® e ProTaper® sem uso e teste “t” Student.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (n=10)	195	±60,7	31,12	0,122 $p > 0,05$
PROTAPER® (n=10)	94	±34,3	36,48	0,177 $p > 0,05$
		$t = 4,58$	$Pvalor = 0,00001$	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Por outro lado, a Tabela 2 mostra comparação entre as limas ProfileVortex® e ProTaper® no quinto uso. Da mesma forma, número maior de ciclos até a fratura foram necessários para as limas ProfileVortex® em relação as limas ProTaper® com significado estatístico ($p < 0,05$).

Tabela 2 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov do número de ciclos a fratura entre as limas ProfileVortex® e ProTaper® no quinto uso e teste “t” Student.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (N=10)	157,8	$\pm 36,2$	22,94	0,168 Pvalor>0,05
PROTAPER® (N=10)	82,5	$\pm 31,0$	37,57	0,193 Pvalor>0,05
	t = 4,94		Pvalor = 0,00001	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Com relação ao tempo em segundos despendido até a ocorrência da fratura denota-se nas Tabelas 3 e 4 que as limas Profile Vortex® comparada com as limas ProTaper® sem uso e no quinto uso apresentaram maior tempo para a ocorrência de fratura no confronto com significado estatístico ($p < 0,05$).

Tabela 3 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov do tempo em segundos a fratura entre as limas Profile Vortex® e ProTaper® sem uso e teste “t” Student.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (N=10)	82,7	$\pm 26,2$	31,68	0,116 p>0,05
PROTAPER® (N=10)	39,8	$\pm 14,4$	36,18	0,183 p>0,05
	t = 4,54		Pvalor = 0,00001	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Tabela 4 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov do tempo em segundos a fratura entre as limas Profile Vortex® e ProTaper® no quinto uso e teste “t” Student.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (N=10)	68,9	$\pm 18,4$	26,70	0,203 p>0,05
PROTAPER® (N=10)	35,8	$\pm 12,9$	36,03	0,186 p>0,05
	t = 4,66		Pvalor=0,00001	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

As Tabelas 5 e 6 apresenta comprimento da parte ativa do instrumento que se fraturou durante o ensaio entre as duas marcas sem uso e no quinto uso. Em média, o comprimento da porção fraturada dos instrumentos Profile Vortex® que não foram usados bem como no quinto uso foi maior do que a média dos instrumentos ProTaper® sem uso e no quinto uso com significado estatístico ($p < 0,05$).

Tabela 5 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov da porção da lima fraturada em milímetros entre limas Profile Vortex® e ProTaper® sem uso e teste “t” Student.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (N=10)	4,80	±1,03	21,45	0,181 p>0,05
PROTAPER® (N=10)	3,80	±0,632	16,63	0,324 p>0,05
		t = 2,61	Pvalor= 0,021	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

Tabela 6 – Média (\bar{x}), Desvio Padrão (σ), Coeficiente de Variação (CV) e teste de Kolmogorov-Smirnov da porção da lima fraturada em milímetros entre limas Profile Vortex® e ProTaper® no quinto uso e teste de Mann-Whitney.

GRUPO	FRATURA			
	(\bar{x})	σ (mg)	CV (%)	K-S
VORTEX® (N=10)	5,70	±0,483	8,47	0,433 p<0,05
PROTAPER® (N=10)	4,30	±1,16	26,97	0,302 p<0,05
		z=2,7969	Pvalor= 0,0042	

Significante, número de ciclos a fratura entre as limas são diferentes ao nível de 5%. Fonte: Autores.

4. Discussão

A fratura flexural, chamada de fratura por fadiga cíclica, é o tipo predominante de fratura que ocorre nas limas rotatórias de Ni-Ti (Wei et al. 2007) sendo que os resultados revelam prevalência maior desse tipo de fratura quando comparada com o tipo de fratura torsional destacando a fratura flexural durante a preparo de canais curvos com instrumentos rotatórios de NiTi.

Foi demonstrado que Johnson et al. (2008) lançaram liga a partir do Ni-Ti modificado, também conhecido como *M-wire* que foi incluída no mercado e criada pela aplicação de tratamentos térmicos à liga de NiTi produzindo as limas ProFile Vortex. Isto demonstra que o uso desta nova liga elevou significativamente resistência à fadiga da lima rotatória conservando mesmos atributos de torção das limas usadas. Ademais, esse sistema Profile Vortex (Dentsply Tulsa Dental, Tulsa, OK), com novo *design* com ângulos helicoidais específicos propondo a esta geometria maior eficácia de corte.

Contrariamente Gambarini et al. (2008) encontraram resultados díspares dos autores supracitados no tocante a resistência a fadiga cíclica de limas fabricadas com liga *M-Wire*, ligas produzidas por métodos de torção e por métodos tradicionais de usinagem mostrando que as limas avaliadas indicaram resistência semelhantes valendo-se de aparelho específico que examinou a resistência à fadiga cíclica das limas por meio de ciclos que este realiza até a fratura.

Conquanto os autores acima encontraram resultados similares Kell et al. (2009) por sua vez, analisando limas GT® série X (Dentsply/Tulsa Dental) fabricada com liga *M-Wire* em função de possíveis vantagens dos diferentes métodos de fabricação deste instrumento e dos tradicionais da série GT® do mesmo fabricante deduziram que a despeito de poucas investigações a esse respeito estes novos instrumentos com liga *M-Wire* exibiram maior resistência à torção.

A esta altura importa considerar que o número de uso prolongado da lima Ni-Ti é preocupante sugerindo que seu descarte não ultrapasse recomendação do fabricante, já que, a instrumentação rotatória com velocidade alta produz deformações nas espiras das limas e múltiplos usos constituem fator preocupante e de vigilância no que respeita ao seu descarte.

Por se tratar de alta velocidade, no entanto, sugere que se deve ter muito cuidado, visto que, Gao et al. (2010) ultimamente defenderam aumento de velocidade de trabalho das limas Profile Vortex baseado na hipótese de que eficiência de corte mais alta compensaria essas desvantagens. Portanto, a resistência à fadiga cíclica destas limas rotatórias é determinada pelo desenho geométrico, condição da superfície e microestrutura o que, aliás, conforme apontam Zupanc et al. (2018) que uso de liga martensítica resulta em limas mais flexíveis, com maior resistência à fadiga cíclica.

Aliás, Gao et al. (2010) a respeito da microestrutura, as limas com liga *M-Wire*, mostraram tempo superior quanto ao início da formação de trincas em comparação com as limas convencionais. Isto pode ser explicado pela melhor capacidade de reorientação das variantes martensíticas, devido à menor simetria da estrutura cristalina monoclinica da martensita do que a estrutura cristalina cúbica de austenita. Juntamente com o mecanismo de transição da fase austenita-martensita (fase-R), a reorientação das variantes martensíticas é favorável e proporciona melhor acomodação durante a deformação flexural em fadiga durante a rotação e de forma eficaz reduz a acumulação de defeitos microestruturais, tais como irregularidades de superfície ou núcleos vazios, que servem como propagadores de trinca. Além disso, uma microestrutura híbrida com certa proporção de martensita também é mais suscetível de ter resistência à propagação de trincas do que uma microestrutura totalmente austenítica.

Não obstante, a lima Profile Vortex sem uso possui maior resistência à fadiga cíclica do que o lima ProTaper sem uso fato este testado nesta presente investigação mesmo quando as duas limas foram comparadas em 5 vezes de uso (Tabela 2).

Além do mais, Peters e Peters (2011) confirmaram que a lima Profile Vortex inserida em velocidade de rotação superior a 500rpm comparando com a velocidade de 300rpm e que esta lima girando em maior velocidade no interior do canal não deve exigir maiores cuidados visto que o tratamento térmico conferido a lima ao mesmo tempo que a torna mais flexível também confere maior durabilidade acontecimento este corroborado por Grande et al. (2023). Tal situação no entendimento de Gao et al. (2010) apontam que este tratamento térmico da liga aumenta a resistência prolongada à fadiga das limas Vortex e beneficia em altas velocidades fato este ratificado por Bardsley (2011) ao afirmarem que a força de velocidade das limas Vortex durante a instrumentação em maior velocidade gera menos torque e força comparadas com o grupo de menor velocidade. Autores como Gao et al. (2012) e Bouska et al. (2012) usam velocidade de 500rpm enquanto Al Sudani et al. (2012) empregam 300rpm o que muda os resultados do número de ciclos a fratura.

Quando se fala a respeito da lima Profile Vortex Bardsley (2011) associa a alta resistência à fadiga cíclica graças ao tratamento térmico *M-Wire* aplicado na superfície desta lima, o que de fato o fio *M-Wire* possuidoras de propriedades físicas e mecânicas propiciam maior flexibilidade e resistência à fadiga em comparação a fios processados de forma convencional (Pereira et al. 2012) resistentes à torção e microdureza da liga *M-Wire* NiTi superior em comparação com o aço inoxidável quanto a aplicação em limas rotatórias enquanto a lima Profile Vortex Blue possui maior resistência à fadiga e flexibilidade na checagem com lima Vortex ProFile *M-Wire* (Gao et al. 2012) e diferenças em consequência aos diferentes processos de fabricação ou pelas diferenças geométricas (Bouska et al. 2012).

De fato, Bouska et al. (2012) encontrou resultado estatístico significativo entre as limas graças a diferentes técnicas de fabricação ou diferenças geométricas. As limas ProFile Vortex, Twisted File e GTX exibiram maior resistência à fadiga cíclica comparadas com limas EndoSequence e ProFile.

Neste particular, Pereira et al. (2015) assinalam que limas com *designs* similares e diferentes tratamentos térmicos mostraram distinta performance senão vejamos: elevada flexibilidade da lima TYPHOON, apresentou torque máximo na fratura sendo a lima ProFile Vortex com a maior resistência à torção depois Vortex Blue, TYPHOON e ProTaper Universal. TYPHOON mostrou escores médios de torque dinâmico maiores sendo menores para ProFile Vortex ($1,62 \pm 0,79$ Ncm) e sem significado estatístico entre os grupos ProTaper Universal com TYPHOON e Vortex Blue e este último com ProFile Vortex. Maiores forças médias registradas foram com as limas ProTaper Universal ($7,02 \pm 2,36$ N) e as menores com TYPHOON ($1,22 \pm 0,40$ N) enquanto as limas TYPHOON foram mais flexíveis do que as outras limas. Por sua vez, as limas ProFile Vortex apresentaram

maior resistência a torção enquanto a lima TYPHOON, apesar de ser mais flexível, apresentou momentos torcionais semelhantes as demais limas.

A este respeito, anunciam Al-Sudani et al. (2012) que o instrumento se fratura ao girar no interior do canal constituindo o estresse por flexão e torção, responsável pela quebra por fadiga cíclica e que quanto mais complexa a anatomia do canal, mais desfavoráveis são os efeitos na resistência das limas à fadiga.

Quanto ao processo de fabricação ressalta Lopes (2013) que, no ensaio de torção as limas ProFile Vortex suportaram maiores valores de força máxima e torque máximo antes da fratura, seguidos pelos RaCe e Twisted File. Por outro lado, no ensaio de flexão rotatória, as limas Twisted File apontaram desempenho bem superior em função do tempo e o número de ciclos necessário a fratura do que os outros instrumentos testados.

Procurou-se nesta pesquisa avaliar a inter-relação número de usos e a resistência dos instrumentos com relação ao estresse flexural observando o grau de curvatura do canal o qual foi preparado e a incidência de fratura destes dois tipos de instrumentos que passaram por diferentes processos de fabricação. Assim sendo, avaliou-se em dois tipos de limas de NiTi (lima F1 do Sistema ProTaper Universal® e, outra, Profile Vortex® #25 .06) a resistência à fadiga cíclica antes e após cinco usos destes mesmos instrumentos.

Conquanto a velocidade de rotação foi diferente entre as limas fato que justifica significado estatístico destas limas em relação à resistência exercida pela lima Profile Vortex que atuou em uma velocidade maior do que a lima Protaper, completando mais ciclos dentro do canal simulado, o que revela maior desgaste de material.

De outro modo, tratando de teste de fadiga cíclica Braga et al. (2014) valendo-se de equipamento de teste de fadiga, confirmaram que valores médios do número de ciclos até a fratura foram 150% maiores para as limas Typhoon comparado com limas ProFile Vortex e 390% maiores para as limas HyFlex em comparação com as limas EndoWave ratificando que, a tecnologia *M-Wire* de memória controlada elevam a resistência à fadiga.

Ao confrontar os resultados apontados na Tabela 1 entre as limas Profile Vortex e ProTaper sem uso no que respeita ao número de ciclos à fratura, constatou-se que em média foram necessários 195 ciclos até a ocorrência de fratura das limas Profile Vortex contra 94 ciclos até ocorrer à fratura das limas ProTaper, com significado estatístico ($P_{valor} < 0,05$). Na Tabela 2 a mesma constatação só que ao comparar as limas ProfileVortex® e ProTaper® no quinto uso foram necessários menos ciclos a fratura, porém, maior número de ciclos até a fratura foram necessários para as limas ProfileVortex® (157,8) em relação as limas ProTaper® (82,5) com significado estatístico ($p < 0,05$).

Portanto, a resistência a fadiga cíclica superior da lima Profile Vortex é atribuída à sua microestrutura, comprometida pela composição química e pela técnica de fabricação, originando assim, a liga de NiTi *M-Wire*.

Ao compreender que as principais causas da quebra de limas são a fadiga cíclica e o estresse por torção, o especialista em endodontia pode prevê clinicamente que antes do uso das limas rotatórias deve-se usar limas manuais, criando um acesso em linha reta ao canal e pré-alargando a porção coronária antes mesmo de atingir a região apical. Além disso, durante uso das limas no canal radicular importa durante toda esta etapa empregar preferencialmente substância química como irrigante a exemplo de hipoclorito de sódio a fim de facilitar o corte e, assim, evitar fraturas.

Mais ainda o uso indiscriminado da lima pode influenciar o número de vezes que um único instrumento pode ser utilizado com segurança no canal radicular. É claro que o instrumento novo e, portanto, sem uso é extremamente seguro. Agora dependendo da marca e tipo do instrumento uma indicação de uso por parte do fabricante é essencial que o dentista corresponda a indicação considerando ainda a experiência do operador que é de suma importância em todos os aspectos e etapas dos procedimentos endodônticos.

A metodologia empregada neste estudo foi à mesma utilizada por Gavini (2006) permitindo a rotação livre do instrumento e a padronização da curvatura do canal simulado, assim como do ensaio, que é totalmente dinâmico por reproduzir

o movimento de *pecking*. O canal artificial foi confeccionado a partir de uma peça de aço inoxidável temperada e usinada na forma de um arco cuja curvatura se ajustou a um cilindro guia, de 25mm de comprimento e feito do mesmo material, com um ângulo de curvatura de 45° e raio de 5mm. A escolha do torque de 2,0Ncm teve como fundamento a orientação recomendada pelos fabricantes indicando ser esse valor o mais seguro durante a modelagem dos canais.

Justifica-se a escolha do instrumento ProTaper F1 em decorrência de sua conicidade de 0.55 a 5mm da ponta (D5), ser a mesma que o instrumento #25.06 da ProFile Vortex. Ao conferir os resultados observados na Tabela 3 entre as limas Profile Vortex e ProTaper sem uso no que respeita ao tempo em segundos até a ocorrência da fratura, verificou-se que na média o tempo foi maior para limas Profile Vortex (82,7 segundos) em relação ao instrumento ProTaper (39,8 segundos) com significado estatístico ($P < 0,05$). Do mesmo modo, a média do tempo em segundos até a ocorrência da fratura após cinco usos, assinalado pela Tabela 4, foi maior para lima Profile Vortex quando se compara com a lima ProTaper, igualmente com significado estatístico ($P < 0,05$).

Isto significa que do ponto de vista prático, o tempo até a fratura foi maior no instrumento Profile Vortex do que da lima ProTaper, ambos utilizados por cinco vezes no canal simulado, o que denota maior resistência à fratura de uma lima sobre a outra. Agora, quando se compara estes valores obtidos com aqueles da Tabela 3, observa-se que a média de tempo em segundos necessária à fratura dos dois instrumentos foi maior quando estes não foram utilizados, ou seja, 82,7 segundos para a lima Profile Vortex em zero uso contra 68,9 segundos em cinco usos, enquanto que as limas ProTaper exibiram médias de tempo não tão discrepantes em zero uso (39,8) contra cinco usos (35,8).

Os resultados desta investigação são justificados com os estudos direcionados a liga de NiTi *M-Wire* explicitados acima. A ocorrência do significado estatístico com ligas diferentes rotacionadas em diferentes velocidades, 500rpm aplicada à Profile Vortex e 350rpm à ProTaper, sugere que o *M-Wire* prolonga a resistência à fadiga dos instrumentos Profile Vortex, permitindo que estes sejam operados em uma velocidade maior gerando menos torque e força.

Notou-se que a ponta do instrumento é a região que sofre maior estresse mecânico, uma vez que, neste presente trabalho as fraturas ocorreram em média a 5mm da ponta do instrumento e que o comprimento da porção fraturada das limas Profile Vortex foi maior do que os instrumentos ProTaper, considerando os grupos sem uso e após cinco usos, havendo significado estatístico ($P < 0,05$), conforme mostrado nas Tabelas 5 e 6.

Nesta presente pesquisa, a lima a despeito de ter sido usada 5 vezes no canal simulado, no teste de fadiga julga-se que a lima ProFile Vortex persistiu mais tempo até sua fratura o que significa que comparativamente ProTaper ela é mais resistente no que se refere ao número de usos além do tempo necessário a fratura (Tabelas 2 e 4). No tange o preparo desta lima em realizar quem sabe mais do que 3 canais radiculares o que sugere menor despesa no tratamento. Graças ao processo termodinâmico das limas acima referidas levaram a obtenção de maior resistência a fratura além de tempo mais prolongado de uso.

Associando os resultados desse estudo com os achados de outros trabalhos aqui revisados, é importante ressaltar que o bom senso deve prevalecer ao interpretar os resultados de qualquer estudo *in vitro*, pois sabemos que durante o uso clínico, é impossível controlar, com segurança, o número de ciclos de uma lima no interior do canal radicular. Da mesma forma, nem sempre é possível determinar a intensidade de tensões aplicadas a lima na região de máxima curvatura do canal. Porém, a prevenção da fratura por fadiga de limas rotatórias de NiTi pode ser alcançada adotando-se procedimentos simples, tais como, evitar que os instrumentos, principalmente de maiores calibres, permaneçam por tempo prolongado girando em canais curvos. Como foi visto nesta presente investigação, esta situação pode ser amenizada adotando-se limas que passaram por novos métodos de fabricação, com a finalidade de aumentar a flexibilidade e por seguinte resistência à fratura, aplicado em um movimento mais rápido de penetração e retirado durante o preparo dos canais radiculares curvos.

Há na verdade amplo interesse dos fabricantes em superar tal barreira o que inclui confiabilidade do instrumento no dia-a-dia (Silva et al. 2020). O processo termomecânico da liga de NiTi libera tensões internas e os defeitos da estrutura cristalina

são diminuídos, dando aos átomos energia térmica suficiente para se reorganizarem, assim aumentando a resistência (Topçuoğlu et al. 2020).

A lima ProTaper Gold com geometria similar a ProTaper Universal, entretanto, devido a processo termodinâmico da liga desta lima confere maior resistência e flexibilidade. Então ligas de NiTi com tratamento térmico são mais flexíveis, apresentando ângulo de deflexão maior e maior resistência a fadiga cíclica comparadas as ligas de NiTi convencional (Zupanc et al. 2018). Essas boas qualidades devem à composição de fase modificada contendo quantidades variáveis de R-phase e martensita (Shim et al. 2017; Zupanc et al. 2018). Igualmente são as limas ProTaper Next® feita de liga de NiTi recentemente lançadas usadas no tratamento de canal radicular produzidas em função das limitações das limas convencionais. São limas de uso único e já esterilizados (ProTaper Next® PT-BR Dentsply Sirona 2024). Além disso, as limas Neoendo Flex passam por processo de tratamento térmico conferindo flexibilidade diminuem risco de erros de procedimento indesejáveis, como fratura, perfuração e transporte (Orikam Healthcare India Pvt. Ltd. 2024).

Aliás Zupanc et al. (2018) apontam que tratamentos térmicos e mecânicos na superfície das ligas foram idealizados para melhorar propriedades das limas de NiTi. As ligas de NiTi tratadas termomecanicamente são mais flexíveis, superior resistência à fadiga cíclica e maior ângulo de deflexão na fratura comparadas ao NiTi convencional. O uso de liga martensítica resulta em limas mais flexíveis, com maior resistência à fadiga cíclica em comparação com a liga austenítica. Neste particular, limas produzidas com fio *M-Wire* a exemplo da ProfFile Vortex®, ProFile GT Series X®, ProTaper Next®, Reciproc®, WaveOne®; limas produzidas em fase-R temos: Twisted File®, Twisted File Adaptive® e K3XF®; e limas feitas com ligas *CM-Wire* tais como: Hyflex CM®, THYPOON Infiniti Flex®, NiTi files®, V-Taper 2H®, Hyflex EDM®.

Muito embora, Chhabra et al. (2023) utilizaram limas ProTaper Next® em movimento recíproco assim como as limas Neoendo Flex em 25 canais de dentes uniradiculares. Quem sabe, a liga *M-Wire* usadas em dentes uniradiculares e a instrumentação em canal anatômico mais fácil e, por conseguinte, esta liga apresentar propriedades físicas e mecânicas que propiciam mais flexibilidade e resistência à fadiga. Os resultados apontam que o movimento recíproco foi melhor que o movimento contínuo com menor incidência de fratura das limas.

Ao realizar investigação com lima One Curve Assaf et al. (2024) detectou resistência maior desta lima em relação a lima E3 Azure e tal achado segundo fabricante demonstra que a lima One Curve representa liga de NiTi obtida por tratamento térmico *C-Wire* cujas limas modificadas por este tratamento apresentam grande flexibilidade e ausência de memória elástica, permitindo pré-curvamento das limas quando do preparo de canais curvos (Gambarini et al. 2008). É um processo patenteado, desenvolvido e implementado exclusivamente pela Micro-Mega para o One Curve uma lima rotatória de uso único que permite penetrar em todo comprimento do canal com uma única lima diretamente no ápice (MicroMega One Curve, the Endo DNA 2024). À sua vez, a lima NiTi Endostar E3 Azure constitui sistema inovador com Tecnologia Azure HT, um processo de fabricação de tratamento térmico com intuito de criar limas muito flexíveis e resistentes à fratura em casos clínicos complexos. O formato desta lima NiTi S com duas bordas cortantes garante corte eficiente, transporte de detritos pelo canal e diminui o tempo de preparação com ponta inativa permitindo preparo seguro, sem risco de falso canal e perfurações. Podem ser esterilizados e usados muitas vezes, desde que, se faça inspeção visual antes do próximo uso permaneça intacto, não torto, deformado, não mostra sinais de desgaste da lâmina e pode ser firmemente preso à peça de mão (Endo Star E3AzurHT Techneology, 2024).

Outra lima utilizada por Diaconu et al. (2024) são as limas ProTaper Ultimate de elevada confiabilidade e atuação com tratamento térmico específico das limas apresentando diâmetros e conicidades variáveis. O tratamento térmico sem dúvida melhora expressivamente a flexibilidade, aumenta a resistência à fadiga cíclica e otimiza o desempenho exibindo *M-Wire*, *Gold-Wire* e *Blue-Wire* (Dentsply Sirona 2022).

À sua vez, as ligas ProTaper Gold, exibe tratamento térmico oferece alta flexibilidade, mais resistentes à fadiga cíclica, força, efeito memória, secção transversal triangular convexa e conicidade progressiva melhorando capacidade de corte. Na sua produção passa por tratamento térmico exibe comportamento de diferentes fases cristalinas dos materiais com maior flexibilidade e resistência à fadiga cíclica (Dalcastagner 2022). As limas M3 UDG (M3) possuem alta resistência à flexão graças ao processo de resistência térmica. Por outro lado, limas ProTaper Ultimate apresentam resistência à fadiga cíclica superior as limas ProTaper Gold e M3 UDG (M3) independentemente da cinemática de movimento empregado. As limas ProTaper Ultimate apresentam secção transversal diferente das limas ProTaper Gold (triangular) e M3 (triangular), no entanto, com acabamento de superfície semelhante. Sob essas condições o movimento reciprocante avaliado acrescentou consideravelmente a resistência à fadiga cíclica de todos as limas rotatórias testados em comparação com rotação contínua inclusive o desempenho foi superior das limas ProTaper Ultimate em relação as limas ProTaper Gold e M3 UDG (M3) em termos de tempo até a fratura e número de ciclos até a fratura empregando rotação contínua e rotação recíproca segundo Diaconu et al. (2024).

Hamid et al. (2024) As limas HyFlex são produzidas utilizando um processo único no qual a fase cristalográfica transita de austenita para martensita em temperatura ambiente, contrastando com as limas NiTi tradicionais, tornando-as extremamente flexíveis e resistentes à fratura podendo ser pré-encurvadas como a lima TruNatomy. NeoEndo Flex que sofrem processo de tratamento térmico dando atributos únicos de flexibilidade, porém, o número de ciclos a fratura de lima em raio de curvatura de 3mm foi significativamente menor comparada com raio de curvatura de 5mm sendo em ordem crescente as limas HyFlex>TruNatomy> NeoEndo Flex.

Abdellatif et al. (2024) confirmaram mais uma vez que as limas de NiTi tratados termicamente exibem resistência à fadiga cíclica superior aquelas limas não tratadas, sobretudo, as limas usadas com cinemática reciprocante quanto à rotação contínua em concordância com Chhabra et al. (2023).

Nos últimos 10 anos, melhorias significativas no *design*, controle das propriedades da matéria-prima e de processos de fabricação foram alcançados e, exemplo disso, é o tratamento termomecânico que é aplicado ao fio de NiTi convencional. Isto levou ao desenvolvimento do M-Wire (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, EUA) que é utilizado nos instrumentos ProFile Vortex e GTX (Dentsply Tulsa Dental Specialties) e dos fios de memória controlada, na qual os instrumentos endodônticos são submetidos a um processo térmico especial após serem usinados a partir de fios de NiTi convencionais para aumentar sua resistência à fadiga.

Acredita-se que esta prática de conhecer o quanto suporta o instrumento rotatório no interior do canal radicular considerando o número de ciclos e tempo a sua fratura é de grande utilidade clínica, pois, possibilita ao clínico analisar, atentar e fazer um juízo crítico no seu planejamento diário considerando o quanto ele pode fazer uso destes instrumentos e não correr riscos de fratura no interior do canal radicular. O consenso e noção dos atributos mecânicos das limas endodônticas de NiTi integradas as qualidades metalúrgicas é a maior vantagem para os especialistas entenderem o desempenho da instrumentação do canal radicular e deste modo auxiliar no processo de tomada de decisão em relação a escolha da lima mais adequada para o caso clínico.

5. Conclusões e Sugestões

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que os instrumentos ProFile Vortex® completaram maior número de ciclos e levaram mais tempo para fraturar comparados aos instrumentos ProTaper®; A porção do instrumento fraturado em milímetros foi maior para as limas Profile Vortex®.

Sugere-se que novas investigações sejam realizadas com amostras de canais simulados a base de resina fenólica com instrumentos novos que estão sendo introduzidos no mercado com vistas a analisar a resistência a torção e flexão e número de usos.

Agradecimentos

Este artigo fez parte de pesquisa baseado na Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade de Taubaté como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Odontologia área de concentração Endodontia. Agradecemos o Sr. Lamarino Vendramini, técnico do Laboratório de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté que se dedicou na construção do dispositivo utilizado nessa pesquisa. Somos gratos pela paciência, respeito à pesquisa e disposição.

Referências

- Abdellatif, D., Iandolo, A., Scorziello, M., Sangiovanni, G. & Pisano, M. (2024). Cyclic fatigue of different Ni-Ti endodontic rotary file alloys: A comprehensive review. *Bioengineering (Basel)*, 16;11(5), 499.
- Al-Sudani, D., Grande, N. M., Plotino, G., Pompa, G., Di Carlo, S., Testarelli, L., & Gambarini, G. (2012). Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments in a double (S-shape) simulated curvature. *J Endod*, 38(7), 987-989.
- Assaf, D., El Seoud, M. A., Kataia, M. & Saber S. (2024). Impact of angle of file access and location of canal curvature on the dynamic cyclic fatigue of nickel titanium rotary instruments. *Eur Endod J*, 9(2), 133-138.
- Bardsley, S. (2011). The Effect of Three Rotational Speed Settings on Torque and apical Force with Vortex Rotary Instruments In Vitro. *J Endod*, 37(6), 860–864.
- Bouska, J., Justman, B., Williamson, A., DeLong, C. & Qian, F. (2012). Resistance to Cyclic Fatigue Failure of a New Endodontic Rotary File. *J Endod*, 38(5), 667–669.
- Braga, L. C. M., Faria Silva, A. C., Buono, V. T. L. & Bahia M. G. A. (2014). Impact of heat treatments on the fatigue resistance of different rotary nickel-titanium instruments. *J Endod*, 40(9), 1494-7.
- Chhabra, A., Ramya, K. P., Prathap, B. S. & Yadav, P. (2023). Life span of Neoendo Flex and ProTaper Next rotary files with reciprocating motion in single-rooted teeth. *J Conserv Dent*, 26(4), 420-423.
- Dalcastagner, A. (2022). Várias gerações de sistema ProTaper®- Revisão narrativa. [Dissertação Mestrado]. Porto: Universidade Fernando Pessoa: Faculdade de Ciências da Saúde.
- Dentsply Sirona. (2022, May). Protaper Ultimate File System. <https://www.endoruddle.com/PTUltimate>.
- Diaconu, C. T., Diaconu, A. E., Tuculina, M. J., Mihai, L. L., Gheorghită, M., Gheorghită, L. M., Mărășescu, P., Gliga, A. & Diaconu, O. A. (2024). Assessment of the cyclic fatigue performance of the novel Protaper Ultimate File System used in different kinematics: An in vitro study. *J Funct Biomater*, 28;15(4), 85.
- Endo Star E3AzurHT Technology, 2024. https://www.endostar.eu/wp-content/uploads/2022/02/IFU-Endostar-E3-Azure_EN_v3_2.2022.pdf
- Gambarini, G., Gerosa, R., De Luca, M., Garala, M. & Testarelli, L. (2008). Mechanical properties of a new and improved nickel-titanium alloy for endodontic use: an evaluation of file flexibility. *Oral Sur, Oral Med, Oral Pathol, Oral Radiol and Endod*, .;05(6), 798-800.
- Gao, Y., Gutmann, J. L., Wilkinson, K., Mawell, R. & Ammon, D. (2012). Evaluation of the Impact of Raw Materials on the Fatigue and Mechanical Properties of ProFile Vortex Rotary Instruments. *J Endod*, 38(3), 398–401.
- Gao, Y., Shotton, V., Wilkinson, K., Phillips, G. & Johnson, W. B. (2010). Effects of Raw Material and Rotational Speed on the Cyclic Fatigue of ProFile Vortex Rotary Instruments. *J Endod*, 36(7), 1205–1209.
- Gavini, G. (2006). Resistência à fadiga cíclica de instrumentos rotatórios de NiTi submetidos à implantação de íons nitrogênio. [Tese de Doutorado]. São Paulo: Universidade de São Paulo: Faculdade de Odontologia.
- Grande, N. M., Castagnola, R., Minciacci, I., Marigo, L. & Plotino, G. (2023). A review of the latest developments in rotary NiTi technology and root canal preparation. *Aust Dent J*, 68 Suppl 1:S24-S38.
- Hamid, T., Malik, A., Kumar, A. & Anjum, S. (2024). Comparative evaluation of cyclic fatigue resistance of thermomechanically treated NiTi rotary instruments in simulated curved canals with two different radii of curvature: An in vitro study. *J Conserv Dent Endod*, 27(4), 393-399.
- Johnson, E., Lloyd, A. & Kuttler, S. (2008). Comparison between a novel nickel-titanium alloy and 508 nitinol on the cyclic fatigue life of ProFile 25/.04 rotary instruments. *J Endod*, 34(11), 1406–9.

Kell, T., Azarpazboob, A., Peters, O. A., El-Mowafy O., Tompson, B. & Basrani, B. (2009). Torsional profiles of new and used 20/.06 GT series X and GT rotary endodontic instruments. *J Endod*, 35(9), 1278-1281.

Lopes, W. S. P. (2013). Comparação da flexibilidade, resistência à fratura por flexão rotativa e por torção dos instrumentos de níquel titânio Race, Twisted File e Profile Vortex. Tese [Tese de doutorado]. Rio de Janeiro: Universidade Estácio de Sá, Faculdade de Odontologia.

MicroMega One Curve, the Endo DNA 2024. <https://micro-mega.com/shaping/one-curve/?lang=en>

Orikam Healthcare India Pvt. Ltd. 2024. <https://orikamhealthcare.com/product/neoendo-flex-glide-files/>

Pereira, É. S., Viana, A. C., Buono, V. T. L., Peters, O. A. & Bahia, M. G. A. (2015). Behavior of nickel-titanium instruments manufactured with different thermal treatments. *J Endod*, 41(1), 67-71.

Pereira, E. S. J., Peixoto, I. F. C., Viana, A. C. D., Oliveira, I. I., Gonzalez, B. M., Buono, V. T. L. & Bahia, M. G. A. (2012). Physical and mechanical properties of a thermomechanical treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *Int Endod J*, 45(5), 469-474.

Peters, A. O. & Peters, C. I. (2011). Cleaning and saaping of the root canal system. In: Hargeaves, K.M. & Cohen, S. eds. *Pathways of the Pulp*. 10th ed. St. Louis, MO: Mosby Elsevier, 288-348.

ProTaper Next® PT-BR Dentsply Sirona 2024. <https://bulario.dentsplysirona.com.br/P/Lima-PTNext.pdf>

Shim, K. S., Oh, S., Kum, K., Kim, Y. C., Jee, K. K. & Chang, S. W. (2017). Mechanical and Metallurgical Properties of Various Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Biomed Res Int*, 4528601.

Silva, E. J. N. L., Martins, J. N. R., Lima, C. O., Vieira, V. T. L., Braz Fernandes, F. M., De-Deus, G. & Versiani, M. A. (2020). Mechanical Tests, Metallurgical Characterization, and Shaping Ability of Nickel-Titanium Rotary Instruments: A Multimethod Research. *J Endod*, 46(10), 1485-1494.

Spanaki-Voreadi, A. P., Kerezousdis, N. P. & Zinelis, S. (2008). Failure mechanism of ProTaper Niti rotary instruments during clinical use: fractographic analysis. *Int Endod J*, 39(1), 171-8.

Topçuoğlu, H. S., Topçuoğlu, G., Kafdağ, Ö. & Balkaya H. (2020). Effect of two different temperatures on resistance to cyclic fatigue of one Curve, EdgeFile, HyFlex CM and ProTaper next files. *Aust Endod J*, 46(1), 68-72.

Varela-Patiño P., Ibañez-Párraga A., Rivas-Mundiña, B., Cantatore, G., Otero, X. L. & Martin-Biedma, B. (2010). Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life. *J Endod*, 36(1), 157-9.

Wei, X. Ling., J., Jiang, J., Huang, X. & Liu, L. (2007). Modes of failure of ProTaper nickel-titanium rotary instruments after clinical use. *J Endod*, 33(3), 276-79.

Zupanc, J., Vahdat-Pajouh, N. & Schäfer, E. (2018). New thermomechanically treated NiTi alloys - a review. *Int Endod J*, 51(10), 1088-1103.