



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

TAYNÁ LOPES DA SILVA

**RESISTÊNCIA À FADIGA CÍCLICA, NÚMERO DE USOS E
ANÁLISE MORFOLÓGICA/QUÍMICA DOS INSTRUMENTOS
RCS RAINBOW ONE FILE, VDW.ROTATE E PROTAPER
ULTIMATE: ESTUDO IN VITRO**

TAYNÁ LOPES DA SILVA

**RESISTÊNCIA À FADIGA CÍCLICA, NÚMERO DE USOS E
ANÁLISE MORFOLÓGICA/QUÍMICA DOS INSTRUMENTOS RCS
RAINBOW ONE FILE, VDW.ROTATE E PROTAPER ULTIMATE:
ESTUDO IN VITRO**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE, pelo Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE BUCAL.

Área: Endodontia. Linha de pesquisa: Patogenia, imaginologia e terapias em odontologia.

Orientador: Prof. Dr. Amjad Abu Hasna

São José dos Campos

2026

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2026]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Silva, Tayna Lopes Da

Resistência à fadiga cíclica, número de usos e análise morfológica/química dos instrumentos RCS Rainbow One File, VDW.Rotate e ProTaper Ultimate: um estudo in vitro / Tayna Lopes Da Silva. - São José dos Campos : [s.n.], 2026. 60 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2026.

Orientador: Amjad Abu Hasna.

1. Níquel-titânio. 2. Fadiga. 3. Estresse mecânico. I. Hasna, Amjad Abu, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Este estudo in vitro investigou de forma integrada a resistência à fadiga cíclica, a durabilidade após reuso e esterilização, as características morfológicas e a composição química de três sistemas rotatórios de Níquel-Titânio: ProTaper Ultimate, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File. Embora VDW.Rotate e RCS Rainbow One File tenham apresentado maior resistência à fadiga cíclica, todos os sistemas demonstraram degradação estrutural progressiva, com formação de microtrincas, deformações e aumento da suscetibilidade à fratura após múltiplos usos e ciclos de autoclave. Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) revelaram características morfológicas relevantes e indícios de instabilidade química. Esses achados desafiam a suposição de que maior resistência mecânica implica maior segurança clínica, evidenciando que o reuso de instrumentos rotatórios pode introduzir riscos cumulativos significativos. Assim, este estudo fornece evidências críticas para a revisão de protocolos clínicos, destacando a necessidade urgente de estratégias mais rigorosas e seguras que conciliem desempenho, custo e previsibilidade no tratamento endodôntico.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This in vitro study comprehensively assessed cyclic fatigue resistance, post-sterilization reuse, and morphological and chemical alterations of three Nickel-titanium rotary systems: ProTaper Ultimate, VDW.Rotate, and RCS Rainbow One File. Although VDW.Rotate and RCS Rainbow One File exhibited superior cyclic fatigue resistance, all systems showed progressive structural degradation, including microcrack formation, deformation, and increased fracture susceptibility following repeated use and autoclave cycles. Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) analyses revealed significant surface characteristics deterioration and signs of chemical instability. These findings challenge the assumption that enhanced mechanical performance translates into clinical safety, demonstrating that instrument reuse introduces cumulative and potentially underrecognized risks. This study provides critical evidence to inform clinical decision-making and underscores the urgent need to re-evaluate current reuse protocols, balancing performance, cost-efficiency, and patient safety in endodontic practice.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Amjad Abu Hasna

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)
Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos
Campus de São José dos Campos

Prof.^a Dr.^a Rayana Duarte Khoury

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)
Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos
Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Fernando Antônio Siano dos Reis

FAPES Odontologia
São Paulo

São José dos Campos, 08 de julho de 2026

DEDICATÓRIA

Ao meu avô, José Lopes da Silva Filho,

Que, mesmo sem ter tido a oportunidade de estudar, sempre enxergou valor no conhecimento e, com simplicidade e carinho, dizia que minha letra era bonita e que eu deveria ser professora.

Sou fruto do seu esforço, da sua coragem e do seu desejo incansável de oferecer uma vida melhor à sua família e aos seus descendentes. Sua história, marcada por dificuldades, nunca foi um limite, mas sim a base de tudo o que hoje eu conquisto.

Mesmo sem incentivo, nós chegamos longe. Com a sua força e a minha teimosia, “teimosa igual uma mula”, como sempre — nós vencemos.

Hoje, sua trajetória floresce na formação de uma neta Mestra. Onde o senhor não pôde chegar, o seu amor e o seu exemplo me trouxeram.
Com eterna gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lucilia e José Carlos, por cada renúncia silenciosa que construiu este momento. Pelas incontáveis horas extras de trabalho, pelo cansaço que nunca foi desculpa, pela luta diária para que nunca me faltasse o necessário — mesmo quando faltava para vocês. Pelas listas caríssimas que, para muitos, eram apenas materiais, mas que para nós representavam escolhas difíceis, prioridades invertidas e, acima de tudo, amor. Obrigada por nunca terem me deixado acreditar que não havia saída. Porque, mesmo quando tudo parecia impossível, vocês sempre diziam: “nós damos um jeito”. E deram. Nós demos. E é por isso que hoje eu estou aqui.

Ao meu companheiro, Davydson, por ter sido abrigo quando eu quis desistir. Por ter segurado minha mão mesmo quando eu já não tinha forças para continuar, e por ter insistido por mim, especialmente no último processo seletivo, quando eu pensei em parar. Você acreditou em mim quando eu mesma duvidei. Obrigada pelo seu amor, pela sua paciência e por nunca ter soltado minha mão. Essa conquista também é sua. Aos meus amigos, Luan, Maira, Marcela, Gustavo, Tamires - que, mesmo de longe, nunca estiveram ausentes. Obrigada por cada mensagem, cada ligação, cada vídeo, cada palavra de incentivo. Obrigada por compreenderem minhas ausências, por respeitarem meus silêncios, por acolherem minhas tristezas sem julgamento e por celebrarem minhas pequenas vitórias como se fossem suas. Vocês foram, mesmo à distância, parte fundamental desse caminho. Vocês me ajudaram a continuar sonhando quando tudo parecia pesado demais.

Aos membros da banca examinadora, Professora Rayana e Professor Carlos Ferrari, expresso minha sincera gratidão pela disponibilidade, atenção e generosidade em contribuir com a avaliação deste trabalho. À Professora Rayana, agradeço especialmente pela presença inspiradora em minha banca; ter uma mulher jovem, competente e atuante na ciência participando deste momento é extremamente significativo para mim e reforça a importância da representatividade feminina na pesquisa e na docência acadêmica. Ao Professor Carlos Ferrari, registro minha

profunda gratidão pela honra de contar com sua participação, considerando sua relevante trajetória na Endodontia e a admirável construção de seu instituto, consolidado como referência na área. Poder compartilhar este momento acadêmico com profissionais tão inspiradores torna essa etapa ainda mais especial e enriquecedora.

Ao meu orientador, professor Amjad, pela orientação ao longo deste percurso, pela contribuição acadêmica e pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho. Sua participação foi importante para a construção deste estudo e para o meu crescimento na pesquisa científica.

A todos que fizeram parte dessa caminhada, meu mais profundo e sincero obrigada. Nada disso foi construído sozinha. Esta conquista carrega o nome, o esforço e o amor de cada um de vocês.

“Cada um de nós vale o que vale a nossa paixão.” Jorge Amado

RESUMO

Silva TLS. Resistência à fadiga cíclica, número de usos e análise morfológica/química dos instrumentos *RCS Rainbow One File*, *VDW.ROTATE* e *ProTaper Ultimate*: estudo in vitro [dissertação]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2026.

O presente estudo avaliou a resistência à fadiga cíclica, o número de usos após esterilização, as características morfológicas e composição química de três sistemas rotatórios de Níquel-Titânio: ProTaper Ultimate, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File. A fadiga cíclica foi testada em canal artificial padronizado (60° de curvatura, raio de 3 mm, a 37 °C), com cálculo do número de ciclos até a fratura (NCF). O número de usos repetido pós-esterilização foi avaliado em 90 molares humanos, nos quais os instrumentos foram submetidos a três ciclos consecutivos de instrumentação e esterilização em autoclave (134 °C, 15 min). A análise morfológica foi realizada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do instrumento sem uso (baseline) e após o 1º, 2º e 3º ciclos de instrumentação, enquanto a composição química foi avaliada por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS) do instrumento sem uso (baseline). Os dados foram analisados por ANOVA e teste de Tukey ($\alpha \leq 0,05$). O grupo RCS Rainbow One File e VDW.Rotate apresentaram maior resistência à fadiga cíclica em comparação ao ProTaper Ultimate ($P = 0,0006$). O grupo RCS Rainbow One File apresentou diferença estatisticamente significativa no NCF em comparação ao grupo ProTaper Ultimate ($P = 0,0003$). Não teve uma diferença no número total de fraturas após três usos. Análise por MEV exibiu degradação progressiva da superfície, com formação de microfissuras e deformações após usos repetidos. A análise por EDS revelou a presença de elementos residuais, como carbono, alumínio e oxigênio, sugerindo contaminação superficial e possível instabilidade da liga. Concluiu-se que, os grupos RCS Rainbow One File e VDW.Rotate demonstraram resistência à fadiga cíclica superior em comparação ao ProTaper Ultimate. Entretanto, todos os sistemas tornaram-se progressivamente mais suscetíveis à fratura após o uso clínico repetido e a esterilização em autoclave.

Palavras-chave: Níquel-titânio; Fadiga cíclica; Estresse mecânico.

ABSTRACT

Silva TLS. Cyclic fatigue resistance, number of uses, and morphological/chemical analysis of RCS Rainbow One File, VDW.Rotate, and ProTaper Ultimate instruments: an in vitro study [dissertation]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2026.

The present study evaluated the cyclic fatigue resistance, the number of uses after sterilization, the morphological characteristics, and the chemical composition of three Nickel-Titanium rotary systems: ProTaper Ultimate, VDW.Rotate, and RCS Rainbow One File. Cyclic fatigue was tested in a standardized artificial canal (60° curvature, 3 mm radius, at 37 °C), with calculation of the number of cycles to fracture (NCF). The number of repeated uses after sterilization was evaluated in 90 human molars, in which the instruments were subjected to three consecutive cycles of instrumentation and autoclave sterilization (134 °C, 15 min). Morphological analysis was performed by scanning electron microscopy (SEM) of the unused instrument (baseline) and after the 1st, 2nd, and 3rd instrumentation cycles, while the chemical composition was evaluated by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) of the unused instrument (baseline). Data were analyzed using ANOVA and Tukey's test ($\alpha \leq 0.05$). RCS Rainbow One File and VDW.Rotate showed greater cyclic fatigue resistance compared to ProTaper Ultimate ($P = 0.0006$). The RCS Rainbow One File group showed a statistically significant difference in NCF compared to the ProTaper Ultimate group ($P = 0.0003$). There was no difference in the total number of fractures after three uses. SEM analysis exhibited progressive surface degradation, with the formation of microcracks and deformations after repeated uses. EDS analysis revealed the presence of residual elements, such as carbon, aluminum, and oxygen, suggesting surface contamination and possible alloy instability. It was concluded that RCS Rainbow One File and VDW.Rotate demonstrated superior cyclic fatigue resistance compared to ProTaper Ultimate. However, all systems became progressively more prone to fracture following repeated clinical use and autoclave sterilization.

Keywords: Nickel–titanium; Cyclic fatigue; Mechanical stress.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3 PROPOSIÇÃO.....	21
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 Cálculo do tamanho amostral.....	22
4.2 Grupos experimentais	22
4.3 Análise da fadiga cíclica.....	23
4.4 Números de fraturas após múltiplos usos e ciclos de esterilização por autoclave	24
4.4.1 Seleção dos espécimens e considerações éticas.....	24
4.4.2 Critérios de inclusão.....	25
4.4.3 Critérios de inegibilidade	25
4.4.4 Instrumentação e esterilização em autoclave.....	26
4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS).....	28
4.6 Análise estatística.....	29
5 RESULTADOS.....	30
5.1 Resistência à fadiga cíclica.....	30
5.2 Número de usos e esterilização em autoclave	32
5.3 Análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	32
5.3.1 Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)	37
6 DISCUSSÃO.....	39
7 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE	55
ANEXO	56

1 INTRODUÇÃO

A fratura de instrumentos endodônticos está fundamentalmente associada a dois mecanismos principais: a fadiga cíclica e a fratura por torção. A fadiga cíclica ocorre quando o instrumento é submetido repetidamente a ciclos alternados de tração e compressão em um mesmo ponto nas regiões de curvatura, promovendo a nucleação e propagação de microtrincas até a ruptura (Grande et al., 2006; Pruett et al., 1997). Já a fratura por torção acontece quando a ponta ou parte do instrumento fica presa em regiões estreitas ou de menor volume do canal principal enquanto o motor continua aplicando torque, excedendo o limite elástico da liga e resultando em falha súbita (Sattapan et al., 2000; Shen et al., 2013). Assim, a suscetibilidade à fratura permanece um desafio clínico relevante, podendo dificultar a execução do tratamento endodôntico e comprometer o prognóstico (De-Deus et al., 2017; Gao et al., 2012).

Outro fator que pode interferir no desempenho dos instrumentos endodônticos é o processo de esterilização, indispensável à biossegurança clínica. A autoclavagem, que envolve exposição a vapor sob pressão e temperaturas elevadas, pode induzir alterações na liga de níquel-titânio (NiTi), como modificações na camada de óxido superficial e possíveis rearranjos microestruturais, influenciando propriedades mecânicas e características de superfície dos instrumentos (Plotino et al., 2012; Rapisarda et al., 1999; Silvaggio, Bahcall, 1997). Diferentemente desse processo, o tratamento térmico aplicado industrialmente às limas NiTi consiste em ciclos controlados de aquecimento e resfriamento, com parâmetros específicos de temperatura e tempo, com o objetivo de modificar a microestrutura da liga, particularmente a relação entre as fases martensítica e austenítica, e, conseqüentemente, otimizar propriedades como flexibilidade e resistência à fadiga cíclica (Shen et al., 2013; Hieawy et al., 2015). Embora o aquecimento promovido pela autoclavagem não configure esse tipo de tratamento térmico controlado, a repetição dos ciclos

pode favorecer certo alívio de tensões residuais geradas durante o processo de fabricação. Nesse contexto, enquanto alguns autores relatam aumento da rugosidade superficial e redução da eficiência de corte após múltiplos ciclos de esterilização (Valois et al., 2005), outros sugerem que esse processo pode contribuir para maior resistência à fadiga cíclica, possivelmente em decorrência da redistribuição dessas tensões internas (Hieawy et al., 2015).

A introdução dos instrumentos confeccionados em ligas de NiTi representa um marco tecnológico inovador na Endodontia, redefinindo os fundamentos do preparo biomecânico (PBM) ao proporcionar maior eficiência, previsibilidade e preservação da anatomia original dos canais radiculares (Lopes et al., 2021; Walia et al., 1988). Essas vantagens decorrem das propriedades únicas da liga, composta aproximadamente por 56% de níquel (Ni) e 44% de titânio (Ti), cuja superelasticidade e memória de forma permitem a recuperação da conformação original mesmo após deformações severas (Zupanc et al., 2018).

As ligas de NiTi podem assumir três fases cristalográficas principais: austenítica, martensítica e uma fase de transição intermediária (fase R), cujas proporções dependem da composição e dos tratamentos térmicos aplicados (Zupanc et al., 2018; Hieawy et al., 2015). Cada uma delas confere propriedades mecânicas específicas que influenciam diretamente o desempenho clínico dos instrumentos (Zupanc et al., 2018).

A fase austenítica, predominante em temperaturas acima da temperatura de final de transformação austenítica (A_f), geralmente próximas à temperatura corporal, apresenta estrutura cristalina cúbica do tipo B2, caracterizada por maior rigidez e comportamento superelástico. Esse comportamento decorre da transformação martensítica induzida por estresse, que permite a recuperação quase completa da deformação após a remoção da carga. Tais propriedades favorecem a eficiência de corte, porém com menor flexibilidade quando comparados à fase martensítica (Zupanc et al., 2018).

Já a fase martensítica, com estrutura monoclinica ($B19'$), estável em

temperaturas mais baixas ou sob estresse mecânico, é mais maleável e ideal para canais com curvaturas acentuadas. Essa fase se deforma principalmente por mecanismos de maclação (twinning), o que permite maior capacidade de acomodação de deformações sem geração imediata de tensões internas elevadas. Consequentemente, instrumentos com maior fração martensítica exibem maior flexibilidade e melhor adaptação a canais radiculares com curvaturas acentuadas, além de maior resistência à fadiga cíclica (Zupanc et al., 2018).

A fase R representa uma transição intermediária entre ambas, com estrutura romboédrica, ocorrendo sob condições específicas de temperatura e tratamento térmico, caracterizada por maior capacidade de acomodação de tensões, frequentemente associada ao aumento da resistência à fadiga e à deformação elástica dos instrumentos NiTi (Hieawy et al., 2015).

Com base nessas transformações de fase, diferentes tratamentos térmicos têm sido empregados industrialmente com o objetivo de modular o comportamento das ligas de NiTi utilizadas na fabricação de instrumentos endodônticos. Esses tratamentos envolvem ciclos específicos de aquecimento e resfriamento capazes de alterar as temperaturas de transformação (como A_f) e a estabilidade relativa das fases martensítica, austenítica e R, resultando em mudanças significativas nas propriedades mecânicas da liga, especialmente no que se refere à flexibilidade e resistência à fadiga cíclica (Shen et al., 2013; Hieawy et al., 2015; Zupanc et al., 2018). Estudos mais recentes têm demonstrado que o tratamento térmico promove o aumento da temperatura de transformação e favorece maior presença de fase martensítica em condições clínicas, contribuindo para maior capacidade de deformação e resistência à fratura dos instrumentos (Hieawy et al., 2015; Zupanc et al., 2018).

A partir dessas modificações, foram desenvolvidas ligas termicamente tratadas, como M-Wire, CM-wire e sistemas com tratamentos adicionais (por exemplo, Gold e Blue), que apresentam comportamento mecânico superior em comparação às ligas convencionais predominantemente austeníticas. Essas melhorias incluem maior resistência à fadiga cíclica, maior

flexibilidade e melhor desempenho em canais curvos, fatores diretamente relacionados à estabilidade microestrutural induzida pelo tratamento térmico (Shen et al., 2013; Gao et al., 2012; Lopes et al., 2021).

Além disso, a cinemática do instrumento, a composição da liga metálica, a curvatura do canal, a temperatura de trabalho, a velocidade e o torque utilizados, bem como aspectos do processo de fabricação, como o design da seção transversal e os tratamentos térmicos aplicados são fatores que influenciam o desempenho mecânico e a durabilidade dos instrumentos de NiTi (Alcalde et al., 2020; Zupanc et al., 2018). A compreensão desses fatores é essencial para garantir a segurança clínica e minimizar o risco de fratura dos instrumentos (Grande et al., 2006).

Atualmente, há grande diversidade de sistemas rotatórios com diferentes geometrias, seções transversais e tratamentos térmicos, desenvolvidos para otimizar a eficiência de corte e reduzir o risco de fratura (Alcalde et al., 2020; Zupanc et al., 2018). O sistema VDW.Rotate apresenta seção transversal em “S”, design descentralizado e tratamento térmico específico, características que conferem elevada flexibilidade e resistência à fadiga cíclica (Mancini et al., 2021). Já o ProTaper Ultimate combina um design otimizado com liga tratada termicamente, o que lhe garante maior resistência à fratura e eficiência de corte em canais curvos (De-Deus et al., 2017).

Nos últimos anos, a busca por sistemas automatizados mais acessíveis tem impulsionado o desenvolvimento de novas alternativas no mercado endodôntico. Essa tendência reflete a necessidade de equilibrar custo-benefício sem comprometer o desempenho clínico dos instrumentos (Alcalde et al., 2020). Nesse contexto, os chamados sistemas réplicas têm sido introduzidos no mercado com o objetivo de oferecer menor custo associado à manutenção de propriedades mecânicas adequadas. Entre eles, destaca-se o RCS Rainbow One File, fabricado pela RAMO Medical, um sistema rotatório termicamente tratado com seção transversal em “S”. Estudos recentes utilizando análise multimétodo demonstraram que o instrumento apresenta comportamento metalúrgico compatível com ligas

martensíticas, além de adequada flexibilidade, resistência à fadiga cíclica e capacidade de modelagem em canais curvos, sugerindo desempenho mecânico comparável ao de sistemas termicamente tratados já consolidados na literatura (Mancini et al., 2021; Silva et al., 2024).

Embora os sistemas réplicas apresentem potencial clínico relevante, diferenças nos processos de fabricação tornam necessária a avaliação científica de seu comportamento mecânico e resistência à fadiga (De-Deus et al., 2017; Zupanc et al., 2018). Diante disso, é fundamental que testes comparativos sejam conduzidos para avaliar a resistência à fadiga cíclica e o comportamento após múltiplos usos e ciclos de esterilização, a fim de garantir a segurança e a eficácia desses instrumentos. Considerando a escassez de estudos sobre as réplicas, especialmente o sistema RCS Rainbow One File, torna-se essencial investigar sua performance em relação a sistemas tradicionais, como o ProTaper Ultimate e o VDW.Rotate, contribuindo para o uso clínico seguro e baseado em evidências (Hieawy et al., 2015).

2 REVISÃO DE LITERATURA

A introdução da liga de níquel-titânio (NiTi) na endodontia representou um dos avanços mais significativos no desenvolvimento de instrumentos utilizados no preparo biomecânico dos canais radiculares. A aplicação dessa liga na fabricação de instrumentos endodônticos foi inicialmente descrita por Walia no final da década de 1980, quando demonstrou que instrumentos confeccionados em liga de NiTi apresentavam propriedades superiores em relação aos instrumentos tradicionais de aço inoxidável. Isso ocorre principalmente devido à elevada flexibilidade e ao comportamento superelástico da liga, que permitem melhor adaptação às curvaturas dos canais radiculares e reduzem a ocorrência de transporte apical e outras alterações indesejáveis da anatomia original do canal radicular (Walia et al., 1988; Peters, 2004; Haapasalo, Shen, 2013; Gavini et al., 2018; Zanza et al., 2021).

A partir dessa introdução inicial, observou-se uma rápida evolução no desenvolvimento dos instrumentos endodônticos de NiTi. Ao longo das últimas décadas, diferentes modificações foram incorporadas, incluindo alterações no design geométrico dos instrumentos, avanços nos tratamentos térmicos da liga, melhorias nos processos de acabamento superficial e o desenvolvimento de diferentes cinemáticas de instrumentação. Com base nessas inovações tecnológicas, diversos autores passaram a classificar os instrumentos rotatórios de NiTi em gerações, representando as principais etapas evolutivas desses sistemas (Peters, 2004; Plotino et al., 2009; Arias, Peters, 2022; Liang & Yue, 2022; Gavini et al., 2018).

A primeira geração de instrumentos rotatórios de NiTi surgiu no final da década de 1980 e início da década de 1990, sendo caracterizada pelo uso sequencial de instrumentos com conicidade constante e design relativamente simples, operados em rotação contínua. Esses sistemas foram desenvolvidos com o objetivo de substituir os instrumentos manuais de aço inoxidável, proporcionando maior eficiência no preparo dos canais radiculares e melhor

adaptação às curvaturas anatômicas, como observado em sistemas pioneiros como o ProFile (Peters, 2004; Haapasalo, Shen, 2013; Gavini et al., 2018).

A segunda geração de instrumentos foi introduzida ao longo da década de 1990 e início dos anos 2000, sendo marcada por avanços no design geométrico das limas. Nessa fase, foram desenvolvidos instrumentos com maior eficiência de corte, incluindo geometrias mais ativas, diferentes seções transversais e variações de conicidade ao longo do instrumento. Essas modificações aumentaram a eficiência da instrumentação e a previsibilidade da modelagem dos canais radiculares, como exemplificado por sistemas como o ProTaper Universal (Peters, 2004; Plotino et al., 2009; Gavini et al., 2018).

A terceira geração de instrumentos de NiTi foi caracterizada principalmente pela introdução de modificações metalúrgicas na liga. Tecnologias como M-Wire e o desenvolvimento da fase R passaram a ser utilizadas no processo de fabricação dos instrumentos, permitindo alterações na microestrutura da liga NiTi. Essas modificações resultaram em instrumentos com maior flexibilidade e maior resistência à fadiga cíclica, contribuindo para reduzir a ocorrência de fraturas durante a instrumentação, como observado em sistemas como o ProFile Vortex (Ye, Gao, 2012; Gao et al., 2012; Plotino et al., 2009; Zanza et al., 2021).

A quarta geração de instrumentos rotatórios surgiu no final da década de 2000 e início da década de 2010 e foi marcada pela introdução de novas cinemáticas de instrumentação. Nesse período, foram desenvolvidos sistemas que utilizam movimentos recíprocos em substituição ou em associação à rotação contínua tradicional. Além disso, surgiram sistemas baseados no conceito de instrumento único (single-file), que possibilitam simplificar a sequência de instrumentação e reduzir o número de instrumentos utilizados durante o preparo do canal radicular, como exemplificado pelo sistema Reciproc (Kim et al., 2012; Arias, Peters, 2022; Gavini et al., 2018).

Mais recentemente, a quinta geração de instrumentos de NiTi incorporou avanços adicionais relacionados ao controle da memória da liga e ao aprimoramento dos tratamentos termomecânicos. Instrumentos produzidos com

ligas denominadas controlled memory (CM) apresentam maior predominância da fase martensítica, resultando em maior flexibilidade e maior resistência à fratura por fadiga. Além disso, novos designs geométricos, como seções transversais deslocadas (off-center), foram introduzidos com o objetivo de reduzir o contato do instrumento com as paredes do canal e melhorar a eficiência de corte durante a instrumentação, como observado em sistemas como o ProTaper Next (Gavini et al., 2018; Arias, Peters, 2022; Liang, Yue, 2022; Zanza et al., 2021).

Paralelamente às modificações no design dos instrumentos, avanços nos processos de fabricação também contribuíram significativamente para a evolução desses sistemas. Técnicas de acabamento superficial, como o eletropolimento, passaram a ser empregadas com o objetivo de reduzir irregularidades e defeitos microscópicos presentes na superfície dos instrumentos. A redução desses defeitos pode diminuir pontos de concentração de tensões e aumentar a resistência à fadiga, tornando o comportamento mecânico dos instrumentos mais previsível durante o uso clínico (Plotino et al., 2009; Zanza et al., 2021).

De modo geral, a evolução dos instrumentos de NiTi ao longo das diferentes gerações demonstra uma mudança progressiva no foco do desenvolvimento desses sistemas. Inicialmente, os avanços estavam concentrados principalmente no design geométrico e na eficiência de corte. Com o avanço da tecnologia, passaram a ser priorizadas modificações metalúrgicas e novas cinemáticas de instrumentação, buscando equilibrar eficiência na modelagem dos canais radiculares e segurança mecânica dos instrumentos (Haapasalo, Shen, 2013; Arias, Peters, 2022; Zanza et al., 2021).

Do ponto de vista clínico, a introdução dos instrumentos de NiTi proporcionou melhorias importantes no preparo dos canais radiculares, especialmente em canais curvos ou com anatomias complexas. Estudos demonstram que esses instrumentos permitem maior preservação da anatomia original do canal, menor ocorrência de transporte radicular e maior eficiência na instrumentação quando comparados aos instrumentos manuais de aço inoxidável (Gavini et al., 2018; Peters, 2004; Zanza et al., 2021).

O ProTaper Ultimate combina geometria variável e liga tratada termicamente, apresentando alta resistência à fadiga e eficiência de corte (De-Deus et al., 2022).

O VDW.Rotate, fabricado em liga Blue Wire e com secção transversal em “S”, apresenta elevada flexibilidade e eficiente dissipação de tensões (Mancini et al., 2021; Elnaghy, Elsaka, 2022). Sua combinação de núcleo reduzido e ângulo de corte equilibrado resulta em maior resistência à fadiga cíclica. A relação entre geometria da lima e desempenho mecânico tem recebido atenção crescente, especialmente porque o formato da secção transversal determina a distribuição interna de tensões durante a rotação (Gambarini et al., 2020, 2021).

O tratamento térmico e as modificações metalúrgicas têm sido amplamente estudados, demonstrando aumento significativo da resistência à fadiga e melhoria da flexibilidade dos instrumentos, especialmente em ligas com maior fração martensítica e transformação de fase controlada (Zanza et al., 2021; Valente et al., 2025).

O RCS Rainbow One File apresenta geometria semelhante ao VDW Rotate, incluindo secção transversal em “S”, conicidade variável e tratamento térmico do tipo CM, características associadas à maior flexibilidade e resistência à fadiga cíclica. Além disso, análises multimétodo demonstraram comportamento metalúrgico compatível com instrumentos martensíticos, bem como propriedades mecânicas e capacidade de modelagem favoráveis em canais curvos (Silva et al., 2024). Estudos tomográficos também têm demonstrado que sistemas termicamente tratados com elevada flexibilidade tendem a apresentar menor transporte do canal e melhor capacidade de centralização durante o preparo biomecânico, favorecendo a preservação da anatomia original dos canais radiculares (Soliman et al., 2025). Contudo, apesar dos avanços recentes, ainda são limitadas as evidências relacionadas à composição química e ao desempenho clínico do sistema RCS Rainbow One File.

Além disso, técnicas de caracterização morfológica e química, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia por dispersão (EDS), tornaram-se fundamentais para identificar alterações

superficiais, desgaste e mecanismos de fratura, permitindo análise detalhada do comportamento dos instrumentos sob condições clínicas e laboratoriais (Plotino et al., 2009; Gambarini et al., 2021; Ertuğrul et al., 2024).

Assim, a literatura estabelece um contexto sólido sobre a evolução das ligas e sistemas rotatórios, ao mesmo tempo em que evidencia a lacuna científica no estudo de réplicas. Avaliações comparativas, especialmente utilizando abordagens multimétodo e análise mecânica avançada, são essenciais para orientar decisões clínicas seguras e previsíveis (Zanza et al., 2021; Martins et al., 2023)

3 PROPOSIÇÃO

O objetivo deste estudo foi avaliar os sistemas rotatórios em NiTi ProTaper, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File com relação:

- A resistência à fadiga cíclica em canal artificial
- Número de fraturas após múltiplos usos e ciclos de esterilização;
- As características morfológicas superficiais observadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- A composição química/elemental avaliadas pela Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS).

Como hipótese nula, não terá diferença estatisticamente significativa entre ProTaper, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File quanto à resistência à fadiga, número de fraturas após múltiplos ciclos de uso e esterilização, alterações morfológicas ou composição química (EDS).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Cálculo do tamanho amostral

Considerando a média e o desvio padrão dos grupos experimentais de um estudo anterior¹¹, utilizou-se o site <https://www.sealedenvelope.com>, adotando nível de significância $\alpha = 5\%$, poder estatístico $(1 - \beta) = 80\%$, desvio padrão = 143,7 e limite de equivalência = 210. Verificou-se que o tamanho amostral necessário por grupo foi de $n = 10$.

4.2 Grupos experimentais

Os instrumentos foram categorizados em três grupos distintos:

- ProTaper Ultimate (#25 /.08; Dentsply Sirona, Ballaigues, Suíça), velocidade de rotação: 400 rpm, torque: 4 Ncm;
- VDW. Rotate (#25 /.06; VDW GmbH, Munique, Alemanha), velocidade de rotação: 350 rpm, torque: 2,3 Ncm; e
- RCS Rainbow One File (#25 /.06; RAMO medical, província de Jiangsu, China) velocidade de rotação: 450 rpm, torque: 2 Ncm.

Para cada sistema de limas rotatórias (ProTaper Ultimate, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File), dez instrumentos novos foram alocados para o teste de fadiga cíclica ($n=10$ por grupo). Outro conjunto separado de dez instrumentos adicionais por sistema ($n=10$) foi utilizado para os ciclos de instrumentação e esterilização do canal radicular. Dentre esses, dois instrumentos de cada grupo

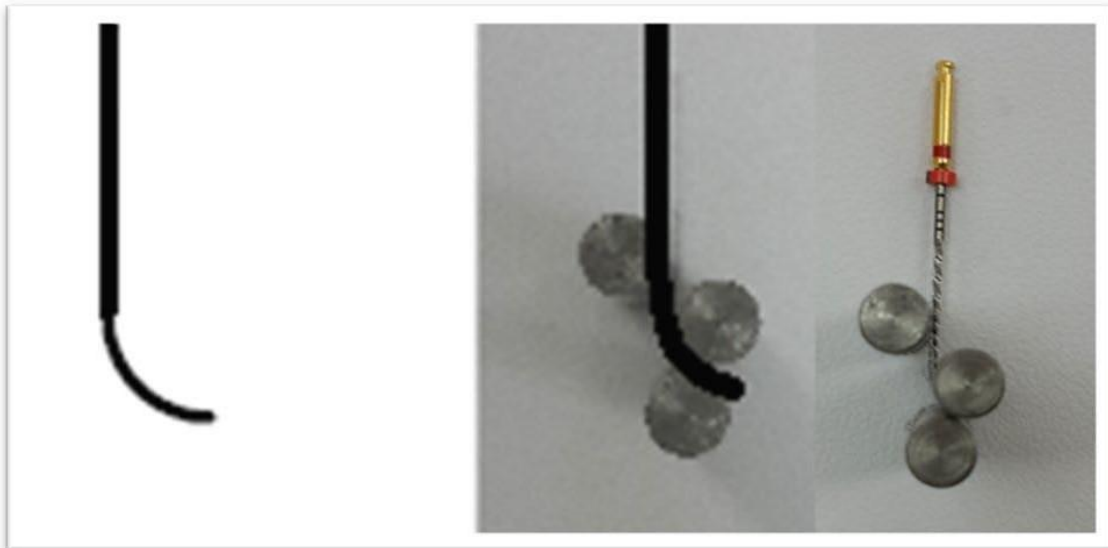
foram selecionados para análises de MEV após cada uso laboratorial e ciclo de autoclave; e, análise em EDS antes do primeiro uso destes instrumentos.

4.3 Análise da fadiga cíclica

O teste foi realizado utilizando um canal radicular artificial previamente simulado com uma curvatura padronizada (ângulo de curvatura de 60°, raio de curvatura de 3 mm e 4,5 mm da ponta do instrumento). Para replicar a curvatura do canal radicular, foi utilizada uma base de plástico de policarbonato personalizada com três pinos ajustáveis de aço inoxidável dispostos para criar um caminho de curvatura reproduzível. Esses pinos tinham 6 mm de diâmetro, 4 cm de comprimento e um entalhe em forma de V com 0,5 mm de largura. Essa configuração mimetizou a curvatura do canal e estava de acordo com estudos anteriores (Camargo et al., 2020; Dos Reis et al., 2023; Ragozzini et al., 2024). Conforme ilustrado na Figura 1, os instrumentos foram acoplados a um motor endodôntico VDW Silver (VDW GmbH, Munique, Alemanha), operando em movimento rotatório contínuo, com parâmetros específicos para cada sistema: ProTaper Ultimate (400 rpm, 4 N·cm), VDW Rotate (350 rpm, 2,3 N·cm) e RCS Rainbow Files (450 rpm, 2 N·cm). Neste teste, foram utilizados 10 instrumentos (n = 10). Um cronômetro foi acionado para medir o tempo até a fratura enquanto o instrumento girava submerso em água deionizada mantida a uma temperatura de $37 \pm 0,5$ °C. O motor e o cronômetro foram parados no instante em que foi visualizado a fratura do instrumento fraturou. O tempo foi medido em segundos. Além disso, o número de ciclos até a falha (NCF) de cada instrumento foi calculado pela seguinte fórmula:

$$NCF = \frac{(Tempo\ de\ fratura\ (s) \times Velocidade\ (rpm))}{60\ s}$$

Figura 1. Ilustração esquemática da configuração experimental da análise de resistência à fadiga cíclica



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Números de fraturas após múltiplos usos e ciclos de esterilização por autoclave

4.4.1 Seleção dos espécimens e considerações éticas

Um total de noventa molares humanos com indicação cirúrgica foram extraídos e preservados no Biobanco do Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Este estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa da UNESP, sob o número de protocolo (CAAE: 7.160.303). Todos os procedimentos experimentais foram conduzidos em estrita conformidade com as diretrizes e regulamentações estabelecidas pelo Conselho Nacional de Saúde (CNS, Resolução 466/12) e pela Declaração de Helsinque. O consentimento livre e esclarecido foi obtido de todos os indivíduos ou de seus responsáveis legais

para a doação dos dentes extraídos utilizados nesta pesquisa, sendo todas as amostras anonimizadas para proteger a confidencialidade dos doadores. Os dentes selecionados foram molares superiores e inferiores.

4.4.2 Critérios de inclusão

- Molares superiores e inferiores de pacientes adultos (18-60 anos de idade).
- Comprimento dos dentes variando de 20 a 23 mm.
- Molares hígidos, sem calcificação ou tratamento endodôntico prévio.
- Os molares com formação radicular e apical completos, adequadamente hidratados.
- Canais com curvatura moderada e padronizada, variando entre 30° e 40°, e raio de curvatura de 5 mm, confirmados pelo método de Schneider em radiografias digitais.

4.4.3 Critérios de inegibilidade

- Molares superiores e inferiores de pacientes adultos (com mais de 60 anos de idade).
 - O comprimento do dente é inferior a 20 mm ou superior a 23 mm.
 - Molares calcificados ou com tratamento endodôntico prévio.
 - Canais com curvatura acentuada (>40°), dilacerações apicais abruptas ou raio de curvatura <3 mm.
- Molares não hidratados ou com ápice incompleto.

4.4.4 Instrumentação e esterilização em autoclave

A abertura coronária dos molares foi realizada por um único operador experiente (endodontista com mais de 5 anos de experiência) utilizando uma broca esférica diamantada nº 1014 (FG 1014; KG Sorensen, Cotia, SP, Brasil), acoplada a uma peça-de-mão de alta rotação sob refrigeração constante, seguido da remoção do teto da câmara pulpar e alisamento e acabamento da cavidade de acesso com uma broca Endo Z (Angelus, Lodrina, PR, Brasil). Em seguida, os canais foram explorados utilizando limas K de aço inoxidável nº 10 (VDW GmbH, Munique, Alemanha), com o comprimento de trabalho determinado em 1 mm aquém do forame apical. Para essa etapa, foram utilizados dez instrumentos distintos daqueles empregados na análise de fadiga cíclica.

Previamente à instrumentação, dois instrumentos representativos de cada sistema foram submetidos à análise morfológica MEV (baseline ou 1ª leitura) e à análise química por espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Logo em seguida, os instrumentos foram acoplados a um motor endodôntico VDW Silver, ajustado para operar com movimento rotatório respeitando a velocidade e o torque indicados pelo fabricante de cada instrumento testado e descritos anteriormente na subseção dos grupos experimentais. Neste estudo, foi utilizado apenas um instrumento representativo de cada marca (28.08 ou 25.06), não abrangendo o uso do sistema completo proposto pelos fabricantes. Assim, nenhum outro instrumento foi empregado, e esse procedimento foi idêntico em todos os grupos.

A instrumentação foi realizada seguindo a técnica de três terços, dividindo o canal radicular em três terços (cervical, médio e apical) com movimentos curtos de entrada e saída, utilizando irrigação com 5 ml de hipoclorito de sódio a 2,5% para cada terço, totalizando 15 mL por canal. Este protocolo padronizado foi aplicado a todos os canais radiculares.

Após a instrumentação, os instrumentos foram submetidos à limpeza

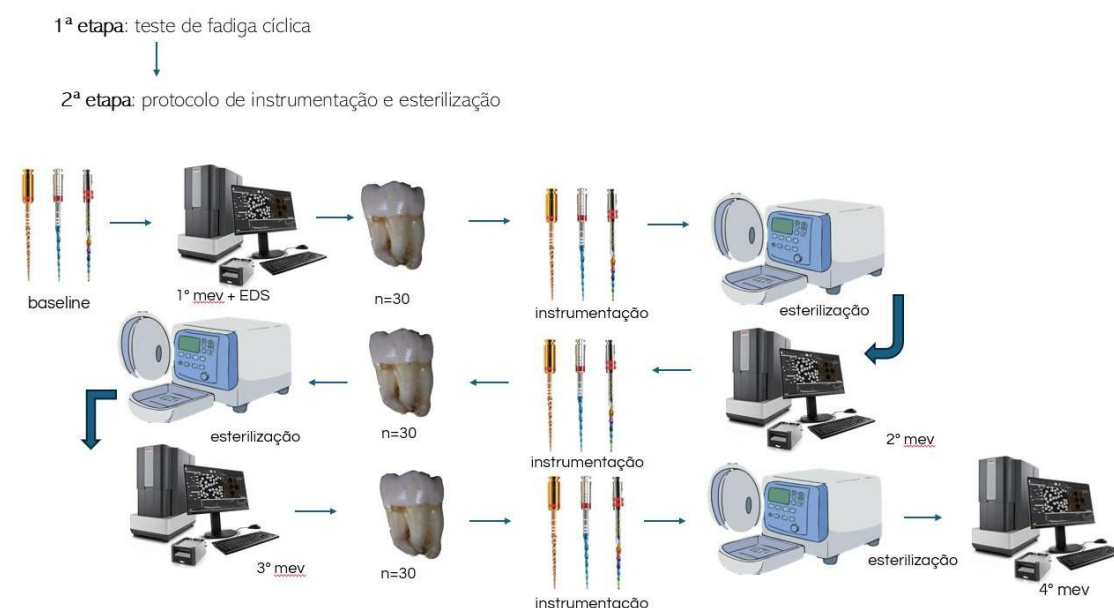
em banho ultrassônico com detergente enzimático, seguidos de lavagem, secagem e esterilização em autoclave a 134 °C, sob pressão de 30 psi, por 15 minutos. Posteriormente, foi realizada nova análise morfológica por MEV (2ª leitura).

Os instrumentos foram então reutilizados em um novo ciclo de instrumentação, seguido pelos mesmos procedimentos de limpeza, esterilização e análise por MEV (3ª leitura). Esse processo foi repetido mais uma vez, totalizando três ciclos de instrumentação, esterilização e análise (4ª leitura).

O número de canais radiculares instrumentados variou entre os dentes incluídos, visto que os molares possuem de 3 a 4 canais. No total, cada instrumento foi utilizado para preparar de 9 a 12 canais, dependendo dos molares incluídos, de forma aleatória.

A fratura do instrumento foi definida como qualquer separação visível que ocorresse durante o preparo ativo, confirmada visualmente e registrada com o número do dente correspondente.

Figura 2 Representação esquemática do desenho experimental, incluindo teste de fadiga cíclica, ciclos sucessivos de instrumentação e esterilização, e análises morfológicas (MEV) e química (EDS)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)

Dois instrumentos de cada marca foram examinados utilizando um MEV (*Phenom ParticleX Steel Desktop SEM Thermo Fisher Scientific Inc., Phenom-World, Eindhoven, Holanda*) após cada ciclo de instrumentação-esterilização para realizar uma análise morfológica. Os instrumentos foram avaliados com atenção especial à presença de fraturas ou fissuras superficiais. Antes da obtenção das imagens, os instrumentos foram montados em suportes metálicos, limpos com álcool absoluto por 3 minutos e secos ao ar para eliminar contaminantes superficiais. Os instrumentos foram examinados com uma ampliação de 500×. As características da superfície foram reanalisadas após cada ciclo para monitorar as alterações estruturais ao longo do tempo.

Para minimizar o viés de avaliação, as imagens de MEV foram avaliadas independentemente por dois examinadores calibrados, que

desconheciam o grupo do instrumento e o número de utilizações. Antes da análise, ambos os examinadores passaram por uma sessão de calibração utilizando um conjunto de imagens representativas não incluídas na amostra do estudo. As avaliações qualitativas focaram na presença e gravidade de defeitos superficiais. Divergências foram resolvidas por consenso.

Posteriormente, a análise da composição química foi realizada utilizando o detector EDS integrado do MEV de mesa Phenom ParticleX Steel (Thermo Fisher Scientific Inc., Phenom-World, Eindhoven, Holanda) para determinar a composição elementar dos instrumentos endodônticos. Após a obtenção das imagens por MEV, os mesmos instrumentos sem uso foram submetidos à análise EDS em modo de alto vácuo antes do uso inicial. Os espectros foram adquiridos de áreas representativas da superfície de cada instrumento. O detector EDS coletou raios X característicos emitidos pela amostra durante a interação do feixe elétrons, permitindo a análise qualitativa e semiquantitativa dos elementos presentes. O foco foi a identificação dos principais componentes da liga, como níquel (Ni) e titânio (Ti), bem como quaisquer elementos adicionais que pudessem indicar modificações superficiais ou impurezas.

4.6 Análise estatística

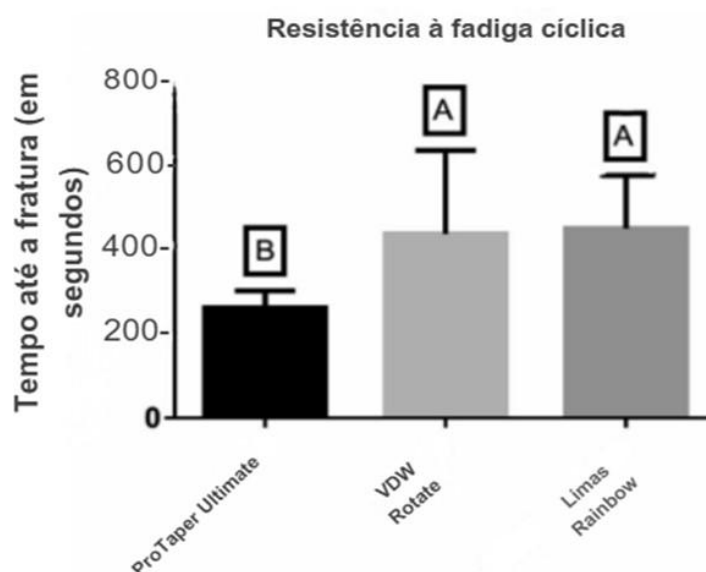
Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Para as variáveis com distribuição normal, utilizou-se análise de variância *One Way ANOVA* e seguida da análise post-hoc de Tukey. Para os dados que não apresentaram distribuição normal, aplicaram-se os testes de Kruskal-Wallis, seguidos do pós-teste de Dunn para comparações múltiplas. O nível de significância foi definido em $\alpha \leq 0,05$. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o GraphPad Prism. Os achados de MEV e EDS foram interpretados descritivamente, sem análise estatística.

5 RESULTADO

5.1 Resistência à fadiga cíclica

A média $\pm$ desvio padrão do tempo até a fratura dos três instrumentos testados é encontrada na figura 3. Foi constatado que a resistência à fadiga cíclica dos grupos VDW.Rotate e RCS Rainbow One File apresentou uma diferença estatisticamente significativa em comparação com o grupo ProTaper Ultimate ($P = 0,0006$). As limas VDW.Rotate e RCS Rainbow One File apresentaram maior tempo até a fratura do que o grupo ProTaper Ultimate. Além disso, não houve diferença estatisticamente significativa entre os dois grupos.

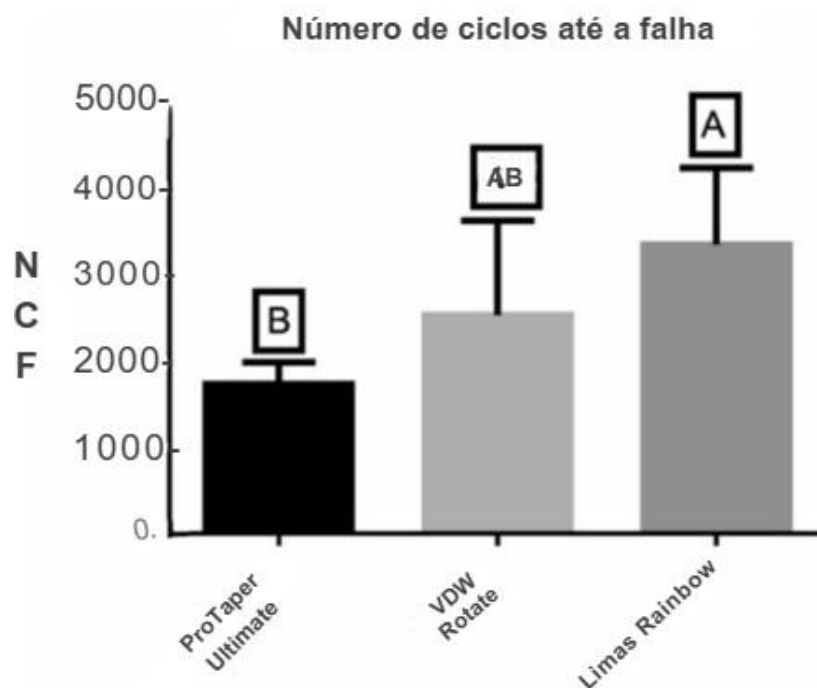
Figura 3. Média e desvio padrão da resistência à fadiga cíclica dos grupos testados. Legenda: Letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos testados.



Fonte: Elaborado pelo autor

A média $\pm$ desvio padrão do número de ciclos até a fratura (NCF) dos três instrumentos testados está apresentada na Figura 4. Observou-se que o grupo RCS Rainbow One File apresentou maior número de ciclos até a falha quando comparado ao grupo ProTaper Ultimate, sendo essa diferença estatisticamente significativa ($P = 0,0003$). O grupo VDW.Rotate apresentou valores intermediários de NCF, sem diferença estatisticamente significativa dos demais grupos. Esses resultados indicam que o sistema RCS Rainbow One File apresentou maior resistência à fadiga cíclica quando avaliado pelo NCF, enquanto o sistema ProTaper Ultimate apresentou os menores valores entre os grupos testados.

Figura 4. Média e desvio padrão do número de ciclos até a falha dos grupos testados. Legenda: Letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos testados



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Número de usos e esterilização em autoclave

Observou-se que não ocorreram fraturas durante o primeiro uso em nenhum dos sistemas. No entanto, no segundo uso, duas limas dos grupos ProTaper Ultimate e VDW.Rotate e uma lima do grupo RCS Rainbow One File fraturaram durante a instrumentação. Além disso, durante o terceiro uso, um total de três limas RCS Rainbow One File e duas limas ProTaper Ultimate e VDW.Rotate fraturaram durante a instrumentação. Todos os sistemas totalizaram quatro fraturas ao final do experimento (Tabela 1).

Tabela 1. Número de fraturas dos grupos testados após o 1º, 2º e 3º usos

Uso	Protaper Ultimate	VDW.Rotate	RCS Rainbow One File
1º uso		-	-
2º uso	2	2	1
3º uso	2	2	3
TOTAL	4	4	4

Fonte: Elaborado pelo autor

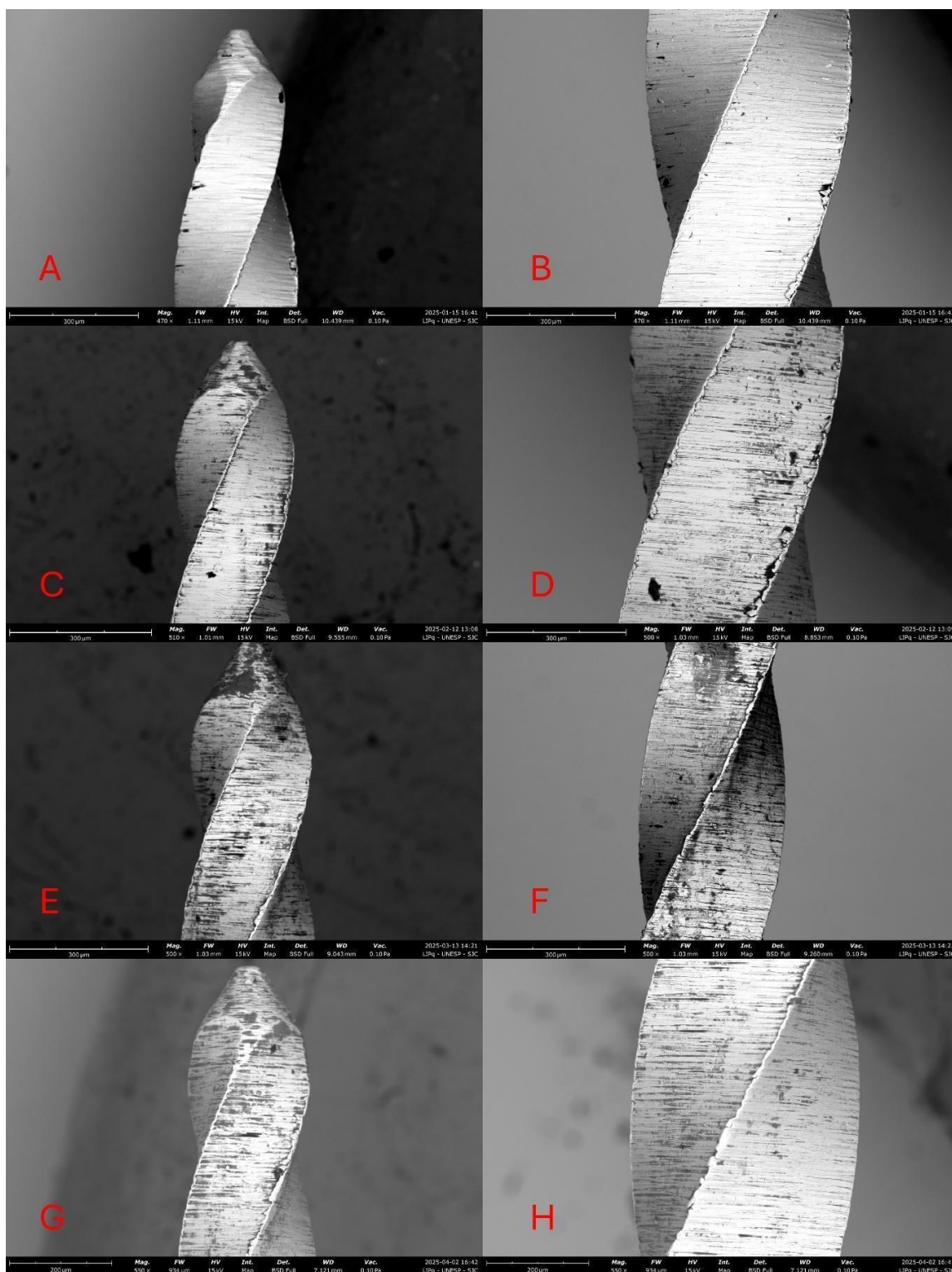
5.3 Análise morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens das limas sem uso (baseline) mostram uma ponta triangular não cortante e uma parte funcional com quatro arestas de corte na lima ProTaper Ultimate (Figura 5 A e B). No geral, a lima apresenta acabamento superficial moderado, evidenciado por manchas escuras dispersas ao longo das arestas de corte irregulares (Figura 5 A e B). Essas regiões escuras tornaram-se mais pronunciadas após o primeiro (Figura 5 C e D), segundo (Figura 5 E e F) e terceiro uso (Figura 5 G e H), sugerindo a presença de microfissuras. Pequenas fissuras também foram observadas ao longo das arestas de corte após o terceiro uso (Figura 5 H)

Para a lima VDW.Rotate, as imagens das limas não utilizadas mostram uma ponta triangular não cortante e uma parte funcional com duas arestas de corte, com acabamento superior ao encontrado na lima ProTaper Ultimate (Figura 6 A e B). Após o primeiro uso, a ponta e as arestas de corte da lima sofreram deformações, conforme observado nas figuras 6 C e D. Microfissuras e distorções da aresta de corte podem ser observadas após o primeiro, segundo (Figuras 6 E e F) e terceiro uso (Figuras 6 G e H).

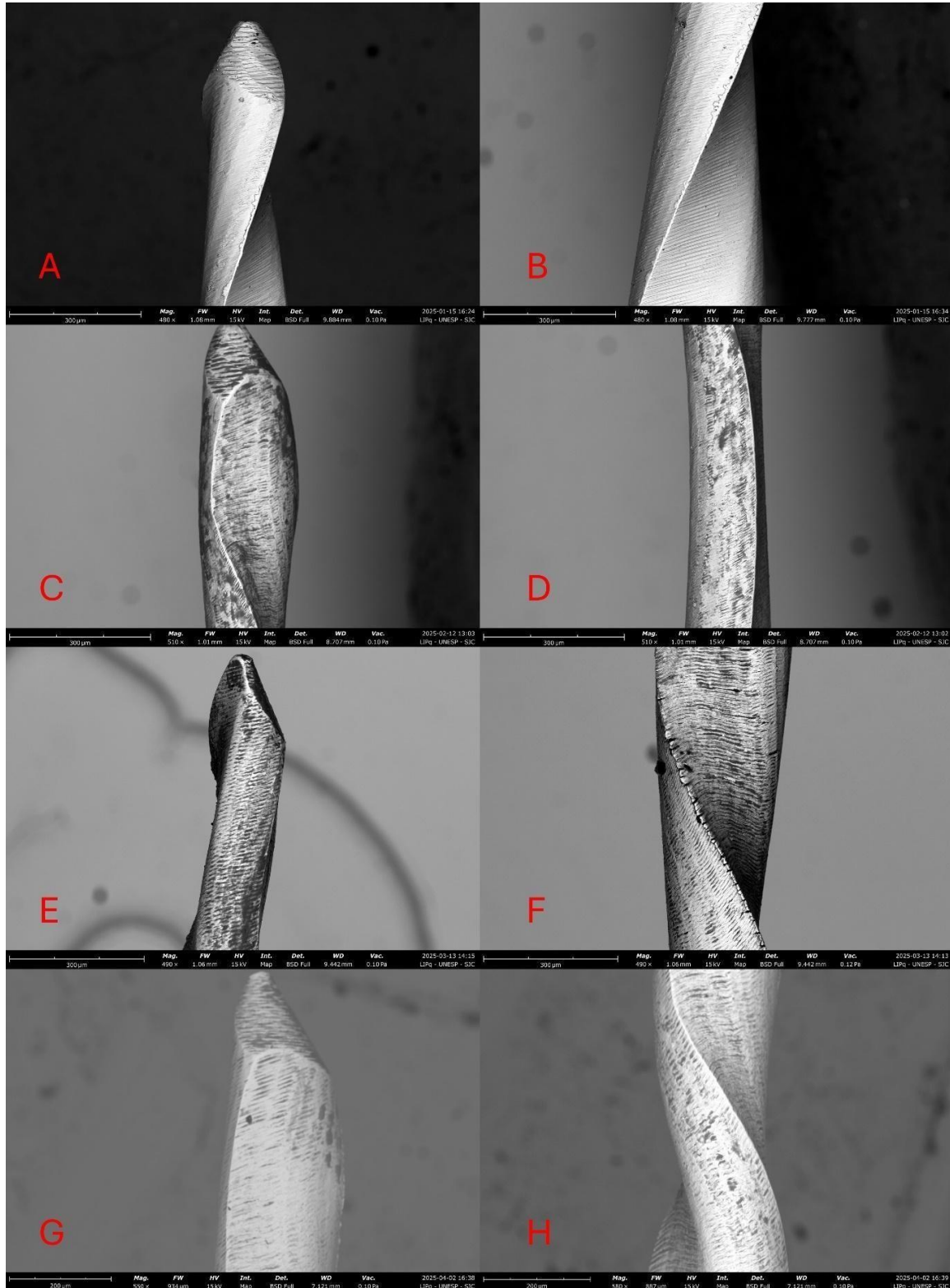
Ao avaliar as limas RCS Rainbow One File, observou-se que as limas não utilizadas apresentam uma ponta triangular não cortante relativamente menor, em comparação com os grupos ProTaper Ultimate e VDW.Rotate, e duas arestas de corte (Figuras 7 A e B). Após o primeiro uso, a lima começou a perder a aresta de corte (Figuras 7 C e D), o que se tornou mais evidente após o segundo uso, com o aparecimento de algumas linhas escuras indicando microfissuras (Figuras 7 E e F). Após o terceiro uso, uma fissura longitudinal pode ser observada na ponta da lima e uma microfissura na aresta de corte da lima (Figuras 7 G e H).

Figura 5. Microimagens ilustrativas por MEV de lima ProTaper Ultimate. Legenda: A e B (instrumento não utilizado); C e D (após o 1º uso); E e F (após o 2º uso); e G e H (após o 3º uso).



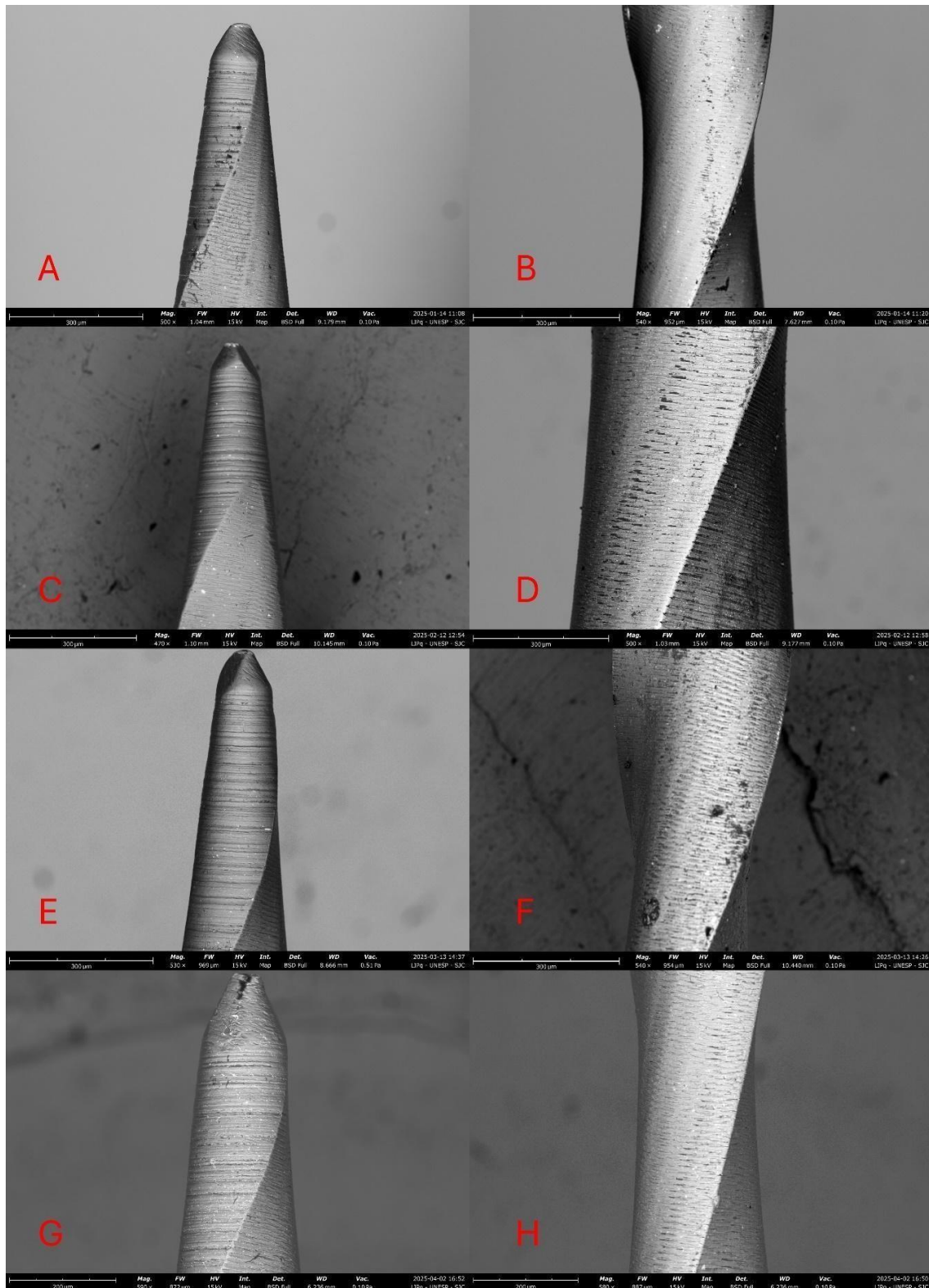
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6. Microimagens ilustrativas por MEV de VDW.Rotate. Legenda: A e B (instrumento não utilizado); C e D (após o 1º uso); E e F (após o 2º uso); e G e H (após o 3º uso).



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7. Microimagens ilustrativas por MEV de RCS Rainbow One File. Legenda: A e B (instrumento não utilizado); C e D (após o 1º uso); E e F (após o 2º uso); e G e H (após o 3º uso).

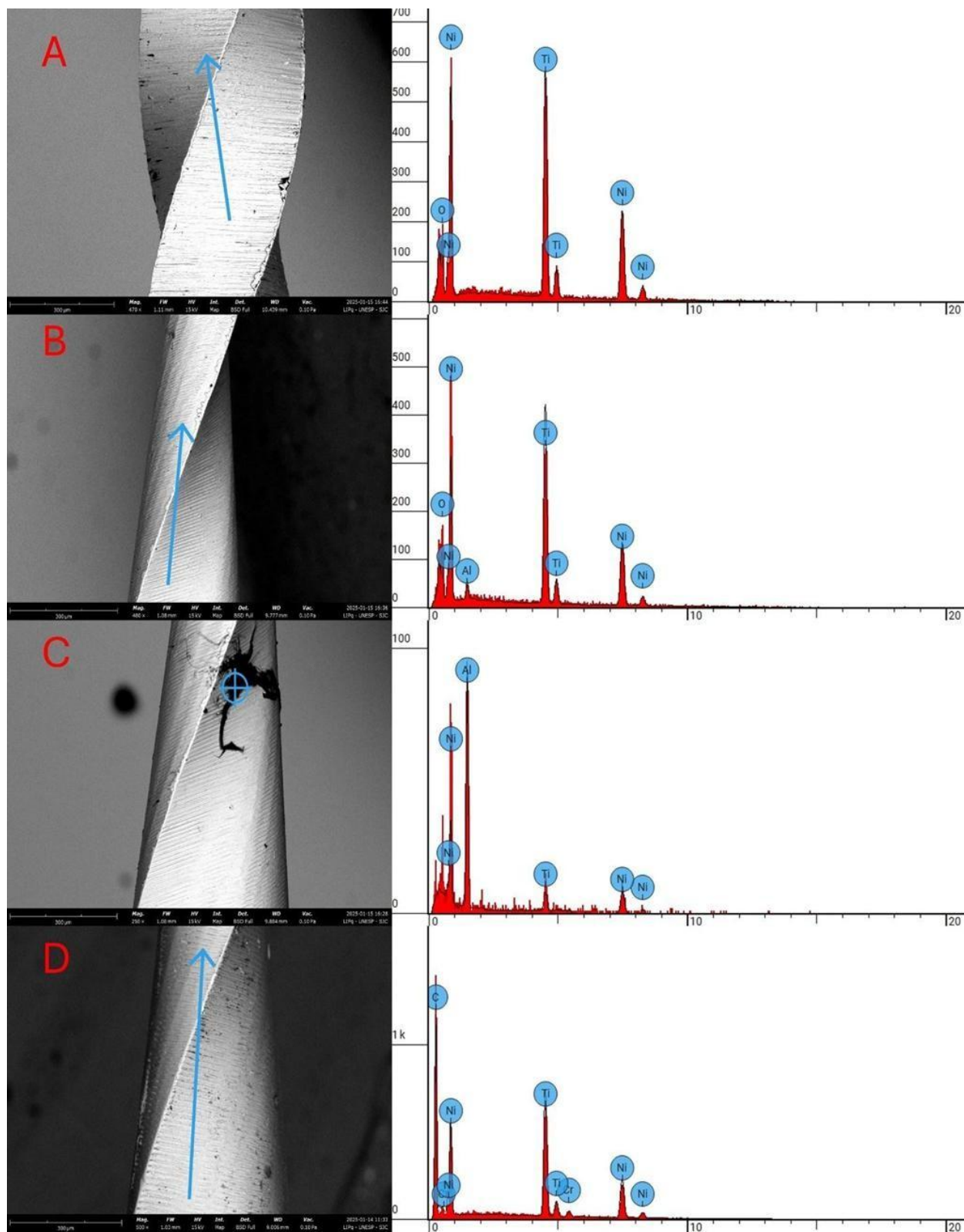


Fonte: Elaborado pelo autor

5.3.1 Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)

Diferenças notáveis foram observadas na composição da superfície dos instrumentos testados. No grupo ProTaper Ultimate, os dados mostraram a preservação da composição característica da liga NiTi nas análises de linha (O: 9,4%, Ti: 38,9% e Ni: 51,7%) (Figura 8A). No entanto, pontos específicos exibiram altos níveis de carbono (acima de 50%) e oxigênio, sugerindo acúmulo de resíduos ou sinais iniciais de corrosão. De forma diferente, no sistema VDW.Rotate, os dados mostraram (O: 10,68%, Al: 1,89%, Ti: 41,65% e Ni: 45,75%) (Figura 8B). As regiões escuras do VDW.Rotate revelaram também um nível relativamente elevado de alumínio (Al: 50,9%) (Figura 8C). Por fim, nas limas RCS Rainbow One File, os dados apresentados foram C: 34,7%, Ti: 30,7%, Cr: 2,1% e Ni: 32,5% (Figura 8D).

Figura 8. Dados de Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS) dos instrumentos testados. Legenda: A (ProTaper Ultimate), B e C (VDW.Rotate) e D (RCS Rainbow One File).



Fonte: Elaborado pelo autor

6 DISCUSSÃO

A fratura de instrumentos endodônticos de níquel-titânio (NiTi) continua sendo uma das complicações mais relevantes durante o preparo biomecânico dos canais radiculares. Esse evento pode ocorrer principalmente por dois mecanismos: fratura torcional e fratura por fadiga cíclica. A fadiga cíclica ocorre quando o instrumento é submetido a ciclos repetidos de compressão e tração durante a rotação em canais curvos, levando à formação progressiva de microtrincas que culminam na fratura do instrumento (Shen et al., 2013; Plotino et al., 2018). Do ponto de vista clínico, compreender o comportamento mecânico dos instrumentos rotatórios é essencial para reduzir o risco de fraturas durante o tratamento endodôntico. Embora a ocorrência de fratura de instrumentos seja relativamente baixa na prática clínica, esse evento pode comprometer significativamente o prognóstico do tratamento, especialmente quando o fragmento fraturado impede a adequada desinfecção e instrumentação do sistema de canais radiculares. Nesse sentido, a escolha de instrumentos com maior resistência à fadiga cíclica pode representar uma estratégia importante para aumentar a segurança do procedimento endodôntico, particularmente em casos envolvendo canais com curvaturas acentuadas. Além disso, a adoção de protocolos clínicos adequados, incluindo uso controlado dos instrumentos, irrigação abundante e inspeção frequente das limas durante o procedimento, pode contribuir para minimizar o risco de fratura durante a instrumentação. Diante disso, o desenvolvimento de novas ligas metálicas, tratamentos térmicos e modificações geométricas tem sido amplamente investigado com o objetivo de aumentar a flexibilidade e a resistência à fadiga dos instrumentos endodônticos.

O presente estudo avaliou comparativamente três sistemas rotatórios contemporâneos: ProTaper Ultimate, VDW.Rotate e RCS Rainbow One File, quanto à resistência à fadiga cíclica, ao comportamento após múltiplos ciclos de uso e esterilização, às características morfológicas observadas por MEV após múltiplos usos, e a composição química por meio EDS. De modo geral, os resultados demonstraram diferenças significativas entre os sistemas avaliados, especialmente em relação à resistência à fadiga cíclica e às alterações estruturais

observadas após ciclos sucessivos de uso.

Todos os procedimentos deste estudo foram realizados por uma única operadora, uma endodontista experiente, a fim de garantir consistência e minimizar a variabilidade. Embora essa abordagem fortaleça a validade interna dos resultados, introduz também a possibilidade de dependência da operadora. Portanto, a reprodutibilidade desses achados pode variar quando realizada por diferentes operadores, e estudos adicionais envolvendo múltiplos operadores são necessários para confirmar a generalização dos resultados.

A metodologia empregada para o teste de fadiga cíclica utilizou um canal artificial padronizado com curvatura de 60° e raio de 3 mm, conforme ilustrado na Figura 1. Esse modelo experimental é amplamente utilizado em estudos laboratoriais por permitir a padronização das condições de curvatura e reduzir a variabilidade inerente à anatomia dos canais radiculares naturais (Dos Reis et al., 2023; Ragazzini et al., 2024). Além disso, a realização dos testes em temperatura próxima à corporal (37 °C) contribui para reproduzir de forma mais fiel as condições clínicas, uma vez que as propriedades mecânicas das ligas NiTi podem variar significativamente em função da temperatura (de Vasconcelos et al., 2016).

Com relação a resistência à fadiga cíclica, os sistemas VDW.Rotate e RCS Rainbow One File apresentaram maior resistência à fadiga quando comparados ao ProTaper Ultimate. Esses achados podem ser explicados principalmente pelas diferenças nas propriedades metalúrgicas da liga NiTi e pelas características geométricas dos instrumentos. Portanto, a hipótese nula deve ser parcialmente rejeitada. Esses achados reforçam a literatura atual, que enfatiza o papel da fase martensítica no aumento da resistência à fadiga cíclica, atribuindo a essa fase maior flexibilidade e capacidade de absorver tensões repetitivas. No entanto, reconhecemos que a predominância de fase não pode ser determinada exclusivamente por meio de testes de fadiga cíclica. Outros fatores, incluindo a conicidade (taper), a geometria da seção transversal e a temperatura de transformação (A_s), também provavelmente contribuem para as diferenças observadas. Dessa forma, o desempenho superior dos sistemas VDW.Rotate e RCS Rainbow One File em condições intracanal simuladas provavelmente reflete a influência combinada das propriedades metalúrgicas e do design dos instrumentos, e não apenas do conteúdo martensítico (Abdellatif et al., 2024; de

Vasconcelos et al., 2016).

Na literatura, o ProTaper Ultimate apresenta maior resistência à fadiga cíclica em comparação à sua geração anterior, como o ProTaper Gold, tanto em rotação contínua quanto em movimento reciprocante direto (Diaconu et al., 2024), além de menor resistência à torção e maior flexibilidade (Martins et al., 2023). Adicionalmente, os instrumentos VDW.Rotate demonstraram a maior resistência à fadiga cíclica quando comparados a sistemas rotatórios como TruNatomy e 2Shape, quando avaliados em canais artificiais sob condições de temperatura corporal (Gündoğar et al., 2020). No presente estudo, a resistência à fadiga cíclica foi avaliada utilizando um modelo de canal artificial com curvatura padronizada (ângulo de 60°, raio de 3 mm e 4,5 mm a partir da ponta do instrumento), conforme estudos anteriores (Ribeiro Camargo et al., 2020; Dos Reis et al., 2023; Ragozzini et al., 2024). Observou-se que os sistemas VDW.Rotate e RCS Rainbow One File apresentaram resistência à fadiga significativamente maior do que o ProTaper Ultimate ($P = 0,0006$), sem diferença significativa entre VDW.Rotate e RCS Rainbow One File.

Apesar da limitada quantidade de estudos disponíveis sobre o RCS Rainbow One File, os achados do presente estudo corroboram os resultados descritos por Silva et al. (2024), que observaram comportamento martensítico, elevada flexibilidade e propriedades mecânicas favoráveis nesse sistema rotatório termicamente tratado. O maior número de ciclos até a fratura observado para o RCS Rainbow One File sugere maior resistência à fadiga cíclica em comparação aos demais sistemas avaliados, possivelmente em decorrência de suas características metalúrgicas e termomecânicas. Além disso, estudos utilizando tomografia computadorizada de feixe cônico demonstraram que instrumentos NiTi termicamente tratados e mais flexíveis apresentam menor transporte do canal radicular e melhor capacidade de centralização durante o preparo biomecânico (Soliman et al., 2025). Essas características podem contribuir tanto para a preservação da anatomia original do canal quanto para maior resistência à fadiga cíclica em curvaturas severas.

Ainda assim, o número de usos e a esterilização em autoclave permanecem temas debatidos quando se trata de instrumentos endodônticos. A maioria dos fabricantes recomenda o uso único desses instrumentos; no entanto,

profissionais e pacientes de países de baixa e média-baixa renda enfrentam o custo relativamente elevado desses dispositivos, o que frequentemente leva à sua reutilização. Em estudos anteriores (Dos Reis et al., 2023; Ragozzini et al., 2024), observou-se que dez diferentes sistemas, originais e similares (replica-like), podem fraturar já na segunda utilização, após um ciclo de esterilização em autoclave. No presente estudo, resultados semelhantes foram encontrados, uma vez que os três sistemas testados fraturaram após o segundo uso. Esse achado pode ser atribuído a fatores como a fadiga cíclica, exacerbada pela flexão repetida em canais curvos, ou ao estresse torcional, particularmente quando a ponta do instrumento permanece imobilizada enquanto o corpo continua a girar (Yared, 2008; Pongione et al., 2012), além do próprio processo de esterilização em autoclave, já que ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento podem alterar a estrutura cristalina do NiTi, reduzindo a flexibilidade e a resistência à fadiga cíclica, tornando a lima mais suscetível à fratura (Yiğit; Çetinkaya, 2024; El Abed et al., 2023).

O número de usos dos instrumentos de NiTi tem sido amplamente discutido na literatura, uma vez que o comportamento mecânico desses instrumentos pode ser significativamente influenciado pelo acúmulo de tensões decorrentes de ciclos repetidos de flexão e torção. Durante a instrumentação de canais curvos, os instrumentos rotatórios são continuamente submetidos a forças alternadas de compressão e tração, promovendo fadiga estrutural progressiva da liga metálica. Com o aumento do número de ciclos de uso, ocorre um processo gradual de nucleação e propagação de microtrincas na estrutura cristalina do NiTi, reduzindo a resistência do instrumento à fadiga cíclica e aumentando a probabilidade de fratura inesperada durante o uso clínico (Plotino et al., 2018; De-Deus et al., 2017). Além disso, tem sido demonstrado que a reutilização de instrumentos rotatórios pode favorecer o acúmulo progressivo de defeitos estruturais microscópicos, especialmente quando os instrumentos são submetidos a múltiplos ciclos de uso clínico (Armagan; Haznedaroglu, 2021; Serefoglu et al., 2020).

Outro fator relevante que deve ser considerado é o impacto dos ciclos repetidos de esterilização em autoclave sobre as propriedades estruturais e mecânicas dos instrumentos de NiTi. Embora a esterilização seja um procedimento essencial para garantir a biossegurança durante o tratamento

endodôntico, alguns estudos sugerem que ciclos repetidos de aquecimento e resfriamento podem promover alterações microestruturais na liga metálica, especialmente em instrumentos submetidos a tratamentos térmicos específicos durante sua fabricação (Stošić et al., 2023; Ba-Hattab et al., 2022).

Nesse contexto, diversos estudos experimentais demonstraram que o aumento do número de usos está diretamente associado ao aumento de defeitos superficiais observados por MEV. Microtrincas, desgaste das arestas de corte, deformações plásticas e alterações topográficas da superfície têm sido frequentemente relatados após múltiplos ciclos de instrumentação. Essas alterações são particularmente relevantes porque irregularidades microscópicas atuam como concentradores de tensão, facilitando a iniciação e propagação de fraturas por fadiga cíclica. Assim, mesmo pequenas alterações estruturais acumuladas ao longo de sucessivos usos podem comprometer significativamente a integridade mecânica do instrumento (Armagan; Haznedaroglu, 2021; Zupanc et al., 2018).

A combinação da MEV com a EDS tem se mostrado uma abordagem poderosa na análise de instrumentos endodônticos. A MEV fornece imagens de alta resolução da morfologia superficial, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos possíveis mecanismos envolvidos no desgaste superficial e na fratura dos instrumentos rotatórios, além disso, permitindo a identificação de irregularidades, trincas e desgaste, enquanto o EDS oferece dados qualitativos e semiquantitativos da composição química (Ertuğrul; Orhan, 2019; Scimeca et al., 2018; Alsofi et al., 2021).

A avaliação morfológica comparativa dos três sistemas rotatórios endodônticos demonstrou que todos os instrumentos apresentaram ponta triangular não cortante, sendo que os RCS Rainbow One File exibiram uma ponta relativamente menor em comparação com o ProTaper Ultimate e o VDW.Rotate. Adicionalmente, a parte ativa do ProTaper Ultimate apresentou quatro arestas de corte, enquanto os sistemas VDW.Rotate e RCS Rainbow One File exibiram duas arestas de corte cada, em conformidade com o design proposto por seus respectivos fabricantes. Entretanto, foram observados padrões distintos de degradação superficial e instabilidade estrutural com o uso repetido.

Inicialmente, as limas ProTaper Ultimate apresentaram pequenas

irregularidades superficiais, como pontos escuros dispersos e arestas de corte irregulares, já presentes mesmo na condição sem uso. Esses defeitos superficiais se agravaram progressivamente com o uso, com aumento da presença de regiões escuras, sugerindo desenvolvimento de microtrincas e acúmulo de detritos. No terceiro uso, pequenas trincas ao longo das arestas de corte tornaram-se evidentes, indicando fadiga estrutural gradual. De acordo com a literatura, irregularidades microscópicas presentes na superfície das limas de NiTi podem atuar como regiões de concentração de estresse, favorecendo a nucleação e propagação de microtrincas quando os instrumentos são submetidos a ciclos repetitivos de compressão e tração durante a instrumentação de canais curvos. Esse fenômeno constitui o principal mecanismo responsável pela fratura por fadiga cíclica em instrumentos rotatórios de NiTi.

Em contraste, apesar da melhor condição inicial das limas VDW.Rotate, deformações já foram observadas após o primeiro uso, acompanhadas pelo surgimento de microtrincas e distorção da aresta de corte. Esses defeitos progrediram ao longo do segundo e terceiro usos, sugerindo que, embora as limas VDW.Rotate apresentassem qualidade superficial inicial superior à do ProTaper Ultimate, mostraram-se mais suscetíveis à deformação mecânica precoce sob estresse.

Nos instrumentos RCS Rainbow One File, a perda da aresta de corte foi visível já após o primeiro uso, e microtrincas tornaram-se aparentes a partir do segundo uso. No terceiro uso, observou-se uma trinca longitudinal na ponta, além de microtrincas adicionais ao longo da parte ativa. Esse comportamento distinto pode estar relacionado a diferenças nas propriedades do material, nos processos de fabricação, nos tratamentos térmicos e na pureza da liga (Gavini et al., 2018; Mohammadi et al., 2014). Além disso, Martins et al. (2023) destacam a importância da estabilidade dimensional para a longevidade dos instrumentos. Nesse contexto, as imagens obtidas reforçam essa observação ao evidenciar superfícies mais homogêneas, com menor número de irregularidades, o que reduz pontos de concentração de tensões e, conseqüentemente, o risco de fraturas. Ainda assim, o aumento observado nas irregularidades superficiais pode ser interpretado como uma tendência específica das condições experimentais deste estudo, e não como um desfecho definitivo aplicável a todos os cenários, evitando, assim,

generalizações excessivas.

Além disso, vale ressaltar que todos os instrumentos apresentaram sinais de deformação já após o primeiro uso; entretanto, a localização inicial dessas alterações é relevante. No ProTaper Ultimate, a deformação foi observada na hélice (flute) da lima, onde foram identificadas microtrincas; por outro lado, no VDW.Rotate, a deformação ocorreu predominantemente na aresta de corte. Por sua vez, nos instrumentos RCS Rainbow One File, a deterioração esteve principalmente restrita à parte que trabalha na região apical do canal, onde houve perda da aresta de corte. Notavelmente, essa região corresponde à ponta não cortante do instrumento, que não é projetada para atuar ativamente na remoção de dentina (Arias, Peters, 2022), enquanto as arestas de corte ao longo do corpo da lima permaneceram amplamente íntegras mesmo após múltiplos usos.

Essa preservação seletiva da porção ativa constitui um aspecto positivo, pois sugere que o RCS Rainbow One File mantém sua eficiência de modelagem ao longo de usos sucessivos, ao mesmo tempo em que reduz a agressividade apical. Ainda assim, considerando o número limitado de amostras avaliadas em MEV, esses achados devem ser interpretados como preliminares, sendo necessários estudos adicionais para confirmar esses padrões. Do ponto de vista clínico, esse comportamento pode contribuir para a redução do risco de transporte apical e formação de degraus, preservando a trajetória original do canal e potencialmente melhorando os desfechos do tratamento em canais curvos ou estreitos (Drukteinis et al., 2020).

Além das características geométricas, o sistema RCS Rainbow One File apresenta tratamento térmico associado a uma superfície multicolorida decorrente do processo de oxidação controlada da liga NiTi durante a fabricação. Silva et al. (2024), por meio de análise multimétodo, observaram que o instrumento apresenta comportamento metalúrgico compatível com ligas martensíticas e propriedades mecânicas favoráveis, incluindo elevada flexibilidade e adequada resistência à fadiga cíclica. Segundo os autores, as alterações superficiais observadas estão relacionadas ao processamento termomecânico do instrumento, embora o desempenho mecânico pareça estar mais associado às transformações metalúrgicas induzidas pelo tratamento térmico do que exclusivamente à coloração superficial.

A EDS forneceu dados fundamentais para a avaliação da integridade química e da possível contaminação dos instrumentos analisados. A detecção de diferentes níveis de carbono, alumínio e oxigênio nos três sistemas testados indica a possível presença de contaminação superficial, associada tanto aos processos de fabricação quanto à degradação térmica. Esse achado está de acordo com estudos que demonstram o impacto direto da composição química na resistência à fadiga cíclica e no desempenho clínico dos instrumentos (Diaconu et al., 2024; Ribeiro Camargo et al., 2020; Bulem et al., 2013). Evidências mostram que variações nos elementos residuais e na pureza do material, identificáveis por meio do EDS, influenciam significativamente a durabilidade dos instrumentos, especialmente após a exposição a agentes irrigantes e a processos de esterilização em autoclave, promovendo oxidação e enfraquecimento da estrutura metálica (Ye; Gao, 2012; Pereira et al., 2015).

A presença predominante desses dois elementos confirma que os instrumentos avaliados mantêm a composição básica da liga NiTi amplamente descrita na literatura. Entretanto, pequenas variações nas proporções de níquel e titânio podem ocorrer em função de modificações metalúrgicas introduzidas durante os processos de fabricação ou tratamentos térmicos aplicados pelos fabricantes. Essas variações podem influenciar diretamente propriedades importantes da liga, como temperatura de transformação de fase, resistência à fadiga cíclica e comportamento mecânico durante a instrumentação endodôntica (Zhou; Peng; Zheng, 2013).

Além disso, tem demonstrado que a análise por EDS frequentemente revela, além de níquel e titânio, a presença de outros elementos químicos em pequenas quantidades na superfície dos instrumentos endodônticos. Entre os elementos mais frequentemente identificados estão carbono, oxigênio, silício, ferro, cromo e alumínio, os quais podem estar relacionados tanto ao processo de fabricação quanto a contaminações superficiais decorrentes do processamento industrial ou do contato com o ambiente clínico (Scimeca et al., 2018).

Em um estudo recente que avaliou a composição elementar de diferentes sistemas rotatórios por meio de MEV-EDS, foi observado que carbono e oxigênio estavam frequentemente presentes nas superfícies dos instrumentos, além de traços de elementos como ferro, cromo, magnésio e silício. Os autores atribuíram

esses achados principalmente à formação de camadas de óxido na superfície do NiTi e à presença de resíduos provenientes do processo de fabricação ou polimento do instrumento (Scimeca et al., 2018).

Atenção especial deve ser dada à observação de uma concentração elevada de alumínio nas limas VDW.Rotate, com valores que atingiram 50,9%, excedendo significativamente o limite esperado para ligas de NiTi, que é de aproximadamente 5%. De acordo com padrões metalúrgicos estabelecidos, as ligas convencionais de NiTi utilizadas em Endodontia são compostas por cerca de 55% de níquel e 45% de titânio, com o alumínio restrito a menos de 5%. Embora pequenas quantidades desse elemento possam melhorar propriedades mecânicas, concentrações excessivas podem levar a alterações microestruturais indesejáveis, comprometendo o desempenho global da liga (Zhou; Peng; Zheng, 2013; Hamid et al., 2024). Além disso, a ultrapassagem desse limite reduz as temperaturas de transformação, ou seja, as temperaturas nas quais o material muda de fase tornam-se mais baixas (Zanza et al., 2022).

A formação da fase NiTi₂ pode ocorrer quando alumínio e cromo são adicionados em concentrações superiores a 5%. Essa fase é prejudicial à ductilidade, levando a uma redução acentuada da capacidade do material de se deformar sob estresse sem fraturar. A diminuição da ductilidade limita a aplicabilidade do material em situações que exigem flexibilidade e resistência. Essa preocupação está em consonância com estudos que reforçam a necessidade de padronização metalúrgica e da avaliação de elementos residuais, como Cr e Al, a fim de garantir um desempenho clínico seguro dos instrumentos (Zanza et al., 2022; Faus-Matoses et al., 2022).

Dessa forma, os resultados obtidos na presente análise química corroboram os achados descritos na literatura, confirmando a predominância dos elementos constituintes da liga NiTi nos instrumentos avaliados. Entretanto, a identificação de possíveis variações na composição superficial ou a presença de elementos adicionais reforça a importância de considerar fatores relacionados ao processo de fabricação, ao uso clínico e à exposição a agentes químicos durante o tratamento endodôntico. Esses fatores podem influenciar não apenas a composição química detectada na superfície dos instrumentos, mas também seu desempenho mecânico e sua resistência à fratura durante a instrumentação

endodôntica.

As principais limitações deste estudo incluem sua natureza *in vitro*, que não reproduz integralmente a complexidade clínica da instrumentação, e a comparação entre instrumentos de sistemas distintos, cujas diferenças simultâneas de liga, tratamento térmico, geometria e características dimensionais impedem atribuir os resultados a um único fator. Além disso, como a avaliação da reutilização foi associada aos ciclos de esterilização, não foi possível distinguir isoladamente os efeitos do uso mecânico e da autoclavagem. As análises por MEV e EDS também se limitaram principalmente à caracterização superficial, não permitindo determinar isoladamente as fases cristalográficas ou estabelecer relações causais diretas entre alterações químicas, morfológicas e fratura. Assim, os resultados devem ser interpretados considerando as características específicas dos instrumentos avaliados e a interação entre metalurgia, geometria, condições de uso e alterações acumuladas durante a reutilização, sem atribuir a maior resistência à fadiga ou as modificações observadas a um único fator.

Do ponto de vista clínico, os resultados do presente estudo reforçam a importância da inspeção cuidadosa dos instrumentos rotatórios antes e após o uso.. Apesar dessas limitações, os resultados obtidos fornecem informações relevantes sobre o comportamento mecânico, morfológico e químico de sistemas rotatórios atuais.

7 CONCLUSÃO

- Os achados deste estudo demonstram que os sistemas RCS Rainbow One File e VDW.Rotate apresentam maior resistência à fadiga cíclica em comparação ao ProTaper Ultimate, indicando potencial vantagem em condições clínicas envolvendo canais curvos.
- Contudo, todos os sistemas mostraram redução significativa da integridade mecânica após múltiplos ciclos de uso e esterilização, evidenciando o caráter cumulativo dos danos estruturais e o consequente aumento do risco de fratura.
- As análises por MEV confirmaram deterioração superficial progressiva, com formação de microtrincas e deformações, enquanto a EDS revelou a presença de elementos residuais, sugerindo alterações químicas superficiais associadas ao uso e ao processamento.
- Em conjunto, esses resultados reforçam que a longevidade dos instrumentos de NiTi é limitada por fatores mecânicos e operacionais, destacando a necessidade de seleção criteriosa dos sistemas e restrição da reutilização como estratégias fundamentais para maximizar a segurança clínica.

REFERÊNCIAS

- Abdellatif D, Iandolo A, Scorziello M, Sangiovanni G, Pisano M. Cyclic fatigue of different Ni-Ti endodontic rotary file alloys: a comprehensive review. *Bioengineering (Basel)*. 2024;11(5):499. doi:10.3390/bioengineering11050499.
- Alcalde MP, Duarte MAH, Bramante CM, Vasconcelos BC, Tanomaru-Filho M, Guerreiro-Tanomaru JM. Cyclic fatigue and torsional strength of nickel-titanium instruments. *Int Endod J*. 2020;53(9):1221-7. doi:10.1111/iej.13333.
- Alsofi L, Rajkhan W, Al-Habib M, Ashe H, Alnowailaty Y, Balto K. Characterization of the differential efficacy of austenitic vs martensitic NiTi rotary files in non-surgical root canal retreatment: a micro-CT analysis. *Front Biosci (Landmark Ed)*. 2021;26:465–74.
- Armagan S, Haznedaroglu F. Scanning electron microscopy analysis of conventional and controlled-memory nickel titanium files before and after multi-uses in root canals. *Microsc Res Tech*. 2021;84:1321–7.
- Arias A, Peters OA. Present status and future directions: nickel–titanium instruments. de Vasconcelos RA, Murphy S, Carvalho CAT, Govindjee RG, Govindjee S, Peters OA. Evidence for reduced fatigue resistance of contemporary rotary instruments exposed to body temperature. *J Endod*. 2016;42(5):782-7. doi:10.1016/j.joen.2016.01.025. *J Endod*. 2022;48(8):1025-36. doi:10.1016/j.joen.2022.05.001.
- Ba-Hattab R, Almohareb RA, Alkhalaf R, Binnjefan S, Sulayem M, Barakat RM. The impact of multiple autoclave cycles on the surface roughness of thermally treated nickel-titanium endodontic files. *Adv Mater Sci Eng*. 2022;2022:1–7.
- Bulem ÜK, Kececi AD, Guldaz HE. Experimental evaluation of cyclic fatigue resistance of four different nickel-titanium instruments after immersion in sodium hypochlorite and/or sterilization. *J Appl Oral Sci*. 2013;21:505–10.
- Chan WS, Gulati K, Peters OA. Advancing nitinol: from heat treatment to surface functionalization for nickel-titanium (NiTi) instruments in endodontics. *Bioact Mater*. 2023;22:91–111.
- De-Deus G, Silva EJNL, Vieira VTL, Belladonna FG, Elias CN, Plotino G. Blue thermomechanical treatment improves fatigue resistance of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod*. 2017;43(3):462-6. doi:10.1016/j.joen.2016.11.016.
- De-Deus G, Silva EJNL, Vieira VTL, et al. Blue thermomechanical treatment improves fatigue resistance. *J Endod*. 2022;48(1):79-85.

doi:10.1016/j.joen.2021.10.001.

Diaconu CT, Diaconu AE, Tuculina MJ, Mihai LL, Gheorghită M, Gheorghită LM, et al. Assessment of the cyclic fatigue performance of the novel ProTaper Ultimate file system used in different kinematics: an in vitro study. *J Funct Biomater*. 2024;15(4):85.

Dos Reis FAS, Abu Hasna A, Ragozzini G, de Moura FB, Campos TMB, de Martin AS, et al. Assessing the cyclic fatigue resistance and sterilization effects on replica-like endodontic instruments compared to reciproc blue. *Sci Rep*. 2023;13:22956.

Drukteinis S, Peciuliene V, Bendinskaite R, Brukiene V, Maneliene R, Nedzinskiene E. Shaping ability, cyclic fatigue resistance and fractographic analysis of hybrid and reciprocating nickel titanium endodontic instruments. *Metals*. 2020;10:172.

Elnaghy AM, Elsaka SE. Mechanical properties of contemporary NiTi instruments. *Int Endod J*. 2022;55(2):150-60. doi:10.1111/iej.13625.

El Abed R, Al Raeesi D, Alshehhi A, Alkhatib Z, Khamis AH, Jamal M, et al. Effect from autoclave sterilization and usage on the fracture resistance of heat-treated nickel-titanium rotary files. *Materials (Basel)*. 2023;16(6):2261.

Ertuğrul İF, Orhan EO. Cyclic fatigue and energy-dispersive X-ray spectroscopy examination of the novel ROTATE instrument. *Microsc Res Tech*. 2019;82:2042–8.

Faus-Matoses V, Pérez García R, Faus-Llácer V, Faus-Matoses I, Alonso Ezpeleta Ó, Albaladejo Martínez A, et al. Comparative study of the SEM evaluation, EDX assessment, morphometric analysis, and cyclic fatigue resistance of three novel brands of NiTi alloy endodontic files. *Int J Environ Res Public Health*. 2022.

Gambarini G, Plotino G, Sannino G, et al. Influence of cross-sectional design on fatigue resistance. *J Endod*. 2020;46(3):400-6. doi:10.1016/j.joen.2019.11.013.

Gambarini G, Testarelli L, Plotino G. Fatigue resistance of NiTi instruments: review. *J Endod*. 2021;47(3):409-19. doi:10.1016/j.joen.2020.11.019.

Gao Y, Gutmann JL, Wilkinson K, Maxwell R, Ammon D. Evaluation of the impact of raw materials on the fatigue and mechanical properties of ProFile Vortex rotary instruments. *J Endod*. 2012;38(3):398-401. doi:10.1016/j.joen.2011.11.004.

Gavini G, Santos M, Caldeira CL, et al. Nickel–titanium instruments in endodontics: state of the art. *J Endod*. 2018;44(10):1507-15. doi:10.1016/j.joen.2018.06.017.

Grande NM, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Malagnino VA, Somma F. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of rotary nickel-titanium instruments. *J Endod*. 2006;32(3):262-5. doi:10.1016/j.joen.2005.10.052.

Gündoğar M, Uslu G, Özyürek T, Plotino G. Comparison of the cyclic fatigue resistance of VDW.Rotate, TruNatomy, 2Shape, and HyFlex CM nickel-titanium rotary files at body temperature. *Restor Dent Endod*. 2020;45:e37.

Haapasalo M, Shen Y. Evolution of nickel–titanium instruments: from past to future. *Endod Topics*. 2013;29(1):3-17. doi:10.1111/etp.12049.

Hamid T, Kumar A, Malik A, Anjum S, Zahoor N. Phase transformation and metallurgical characterization of heat-treated nickel-titanium rotary instruments using differential scanning calorimetry, X-ray diffraction, and energy dispersive spectrometry. *J Conserv Dent Endod*. 2024;27:1152–7.

Hieawy A, Haapasalo M, Zhou H, Wang Z, Shen Y. Phase transformation behavior and resistance to bending and cyclic fatigue of ProTaper Universal and ProTaper Gold instruments. *J Endod*. 2015;41(4):491-5. doi:10.1016/j.joen.2014.11.018.

Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W. Cyclic fatigue and torsional resistance of reciprocating instruments. *J Endod*. 2012;38(4):541-4. doi:10.1016/j.joen.2011.12.014.

Liang Y, Yue L. Evolution and development: engine-driven endodontic rotary nickel-titanium instruments. *Int J Oral Sci*. 2022;14:12. doi:10.1038/s41368-021-00154-0.

Lopes HP, Elias CN, Vieira VTL, Siqueira JF Jr, Mangelli M, Lopes WS. Influence of heat treatment on the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *Int Endod J*. 2021;54(5):744-52. doi:10.1111/iej.13463.

Mancini L, Plotino G, Grande NM, Cotti E, Testarelli L, Gambarini G. Cyclic fatigue resistance of VDW.Rotate nickel-titanium instruments. *Int Endod J*. 2021;54(5):844-51. doi:10.1111/iej.13472.

Mancini L, Plotino G, Grande NM, et al. Cyclic fatigue resistance of NiTi instruments.

J Endod. 2021;47(6):1017-23. doi:10.1016/j.joen.2021.02.006.

Martins JNR, Silva EJNL, Marques D, Ajuz N, Rito Pereira M, Pereira da Costa R, et al. Characterization of the file-specific heat-treated ProTaper Ultimate rotary system. *Int Endod J.* 2023;56:530–42.

Mohammadi Z, Soltani R, Shalavi S, Asgary S. A review of the various surface treatments of NiTi instruments. *Iran Endod J.* 2014;9(4):235-40.

Pereira ESJ, Viana ACD, Buono VTL, Peters OA, de Bahia MG. Behavior of nickel-titanium instruments manufactured with different thermal treatments. *J Endod.* 2015;41:67–71.

Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod.* 2004;30(8):559-67. doi:10.1097/00004770-200408000-00002.

Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2009;35(11):1469-76. doi:10.1016/j.joen.2009.06.015.

Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. Influence of autoclave sterilization on the cutting efficiency of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2012;38(11):1544-7. doi:10.1016/j.joen.2012.07.012.

. Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G, Castagnola R, Rossetti A, et al. Cyclic fatigue of reciproc and reciproc blue nickel-titanium reciprocating files at different environmental temperatures. *J Endod.* 2018;44:1549–52.

Pongione G, Pompa G, Milana V, Di Carlo S, Giansiracusa A, Nicolini E, De Angelis F. Flexibility and resistance to cyclic fatigue of endodontic instruments made with different nickel-titanium alloys: a comparative test. *Ann Stomatol (Roma).* 2012;3(3-4):119-22.

Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 1997;23(2):77-85. doi:10.1016/S0099-2399(97)80260-6.

Ragozzini G, Abu Hasna A, Dos Reis FAS, de Moura FB, Campos TMB, Bueno CES, et al. Effect of autoclave sterilization on the number of uses and resistance to cyclic fatigue of WaveOne gold and four replica-like endodontic instruments. *Int J Dent.* 2024;2024:6628146.

Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Condorelli GG, Torrisi L. Wear of nickel-titanium endodontic instruments evaluated by scanning electron microscopy: effect of sterilization. *J Endod.* 1999;25(10):686-90. doi:10.1016/S0099-2399(99)80322-9.

Ribeiro Camargo CH, Bittencourt TS, Hasna AA, Palo RM, Talge Carvalho CA, Valera MC. Cyclic fatigue, torsional failure, and flexural resistance of rotary and reciprocating instruments. *J Conserv Dent*. 2020;23(4):364–9.

Sattapan B, Palamara JEA, Messer HH. Torque during canal instrumentation using rotary nickel-titanium files. *J Endod*. 2000;26(3):156-60. doi:10.1097/00004770-200003000-00007.

Scimeca M, Bischetti S, Lamsira HK, Bonfiglio R, Bonanno E. Energy dispersive X-ray (EDX) microanalysis: a powerful tool in biomedical research and diagnosis. *Eur J Histochem*. 2018;62:2841.

Serefoglu B, Miçooğulları Kurt S, Kaval ME, Güneri P, Kandemir Demirci G, Çalışkan MK. Cyclic fatigue resistance of multiused Reciproc Blue instruments during retreatment procedure. *J Endod*. 2020;46:277–82.

Shen Y, Zhou HM, Zheng YF, Peng B, Haapasalo M. Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod*. 2013;39(2):163-72. doi:10.1016/j.joen.2012.11.005.

Soliman AA, Sherif RA, Abdallah AM, Mobarak AM. Bidirectional evaluation of canal transportation, centering ability and curvature changes of three NiTi rotary systems using cone beam computed tomography (invitro study). *BMC Oral Health*. 2025 Dec 17;25(1):1936. doi: 10.1186/s12903-025-07414-z. PMID: 41408209; PMCID: PMC12742195.

Silvaggio J, Bahcall JK. A comparison of nickel-titanium and stainless steel files after repeated sterilization cycles. *J Endod*. 1997;23(8):499-502. doi:10.1016/S0099-2399(97)80309-0.

Silva EJNL, Martins JNR, Ajuz N, Vieira VTL, Pinto R, Marques D, Braz Fernandes FM, Versiani MA. Multimethod Analysis of a Novel Multi-coloured Heat-treated Nickel-Titanium Rotary System: Design, Metallurgy, Mechanical Properties, and Shaping Ability. *J Endod*. 2024 Nov;50(11):1622-1633. doi: 10.1016/j.joen.2024.07.011. Epub 2024 Jul 30. PMID: 39089614.

Stošić N, Popović J, Anđelković Apostolović M, Mitić A, Nikolić M, Barac R, et al. Effects of autoclave sterilization on cyclic fatigue resistance in 5 types of rotary endodontic instruments: an in vitro study. *Med Sci Monit*. 2023;29:e939694.

Valois CRA, Silva LP, Azevedo RB. Effects of 3 sterilization cycles on the surface of rotary nickel-titanium instruments. *J Endod*. 2005;31(7):553-5. doi:10.1097/01.don.0000157993.95390.90.

Walia HM, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod*. 1988;14(7):346-51.

doi:10.1016/S0099-2399(88)80196-1.

Yared GM. Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *Int Endod J*. 2008;41(4):339-44. doi:10.1111/j.1365-2591.2007.01351.x.

Ye J, Gao Y. Metallurgical characterization of M-wire nickel-titanium shape memory alloy. *J Endod*. 2012;38(1):105-9. doi:10.1016/j.joen.2011.09.026.

Yiğit Eİ, Çetinkaya İ. Effect of temperature on the cyclic fatigue resistance and phase transformation behavior of three different NiTi endodontic instruments. *Cureus*. 2024;16(1):e52916. doi:10.7759/cureus.52916.

Zanza A, Seracchiani M, Reda R, Miccoli G, Testarelli L, Di Nardo D. Metallurgical tests in endodontics: a narrative review. *Bioeng (Basel)*. 2022;9(1):30.

Zhou H, Peng B, Zheng YF. An overview of the mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *Endod Topics*. 2013;29:42–54.

Zupanc J, Vahdat-Pajouh N, Schäfer E. New thermomechanically treated NiTi alloys: a review. *Int Endod J*. 2018;51(10):1088-103. doi:10.1111/iej.12924.

APÊNDICE A - Título

da Silva et al. *BMC Oral Health* (2025) 25:1789
<https://doi.org/10.1186/s12903-025-07164-y>

BMC Oral Health

RESEARCH

Open Access



Cyclic fatigue resistance, number of uses, and morphological/chemical analysis of RCS Rainbow Files, VDW Rotate and ProTaper Ultimate: in vitro study

Tayná Lopes da Silva¹, Patrícia Carla Lopes¹, Mírian Galvão Bueno de Rezende² and Amjad Abu Hasna^{1*}

Abstract

Background This in vitro study aimed to evaluate the cyclic fatigue resistance and number of uses post-sterilization of three rotary systems: ProTaper Ultimate, VDW Rotate, and RCS Rainbow Files. The study also sought to assess surface topography and chemical composition using scanning electron microscopy (SEM), and Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS).

Methods The cyclic fatigue resistance was evaluated using simulated artificial canal. The number of uses post-sterilization was evaluated using ninety extracted human upper and lower molars selected under strict inclusion criteria. Standardized root canal instrumentation was performed, followed by Scanning Electron Microscopy (SEM) at four moments including: unused instrument (baseline), after the 1st, 2nd and 3rd uses, and Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS) analysis only for unused instruments. The data were subjected to a normality test, followed by one-way ANOVA and Tukey's post-hoc analysis, with a significance level set at $\alpha \leq 0.05$.

Results It was found that RCS Rainbow One Files and VDW Rotate exhibited significantly greater cyclic fatigue resistance compared to ProTaper Ultimate ($P=0.0006$). Despite this, all systems exhibited increased surface deterioration and susceptibility to fracture after repeated uses and autoclave sterilization, without significant difference in total fractures number among the groups; SEM analysis revealed progressive surface deterioration, microcrack formation, and deformation after each use, particularly after the second and third uses; and EDS analysis indicated the presence of residual elements such as carbon, aluminum, and oxygen, suggesting contamination and potential material instability.

Conclusion RCS Rainbow One Files and VDW Rotate demonstrated superior cyclic fatigue resistance compared to ProTaper Ultimate; however, all systems became increasingly prone to fracture following repeated clinical use and autoclave sterilization, without significant differences in total fractures. These findings reinforce the need for cautious use of NiTi rotary instruments, as repeated use may compromise safety and treatment outcomes.

Keywords Cyclic fatigue resistance, Root canal preparation, Sterilization, Stress, Mechanical

*Correspondence:
Amjad Abu Hasna
d.d.s.amjad@gmail.com

¹Department of Restorative Dentistry, Endodontics Division, Institute of Science and Technology, São Paulo State University (UNESP), Av. Eng.

Francisco José Longo Avenue 777, São José dos Campos,
São José dos Campos, SP CEP 12245-000, Brazil

²Faculty of Dentistry, Federal University of Alfenas, Alfenas, Brazil



© The Author(s) 2025. **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, which permits any non-commercial use, sharing, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if you modified the licensed material. You do not have permission under this licence to share adapted material derived from this article or parts of it. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

ANEXO A - Título

INSTITUTO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - CAMPUS DE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS -
UNESP



PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: Avaliação in-vitro de número de usos e fadiga cíclica dos instrumentos endodônticos ProTaper Ultimate, Rotate e Ramo Files

Pesquisador: TAYNA LOPES DA SILVA

Área Temática:

Versão: 1

CAAE: 83499624.4.0000.0077

Instituição Proponente: Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos - UNESP

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 7.160.303

Apresentação do Projeto:

Em texto informado pela pesquisadora, segue a apresentação do projeto:

"O presente estudo tem por objetivo avaliar, por meio de ensaios mecânicos, as seguintes resistências dos metais de NiTi: fadiga cíclica e fadiga por esterilização dos instrumentos. Serão realizados ensaios in-vitro em dentes extraídos. Serão selecionados um N de 90 molares extraídos, que serão instrumentados por instrumentos NiTi rotatórios ProTaper Ultimate (como grupo controle) Rotate e Ramo Files. Dez instrumentos de cada marca serão usados no teste de fadiga cíclica e dez em fadiga por esterilização. Os dados serão submetidos aos testes de normalidade. Logo em seguida serão submetidos aos testes anova-one way e Tukey caso se enquadram em distribuição normal com nível de significância (0,05)."

Objetivo da Pesquisa:

Conforme texto extraído da pesquisadora: "O objetivo deste estudo será avaliar, por meio de ensaios mecânicos, fadiga cíclica e número de usos de instrumentos, após esterilização por autoclave dos instrumentos:(ProTaper Ultimate, Rotate e Ramo Files)."

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Em texto informado pela pesquisadora, seguem os riscos e benefícios deste protocolo de pesquisa:

RISCOS: "Quebra dos dentes, perda dos dentes e descuidos na manipulação. Pode haver riscos

Endereço: Av.Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028

Bairro: Jardim São Dimas

CEP: 12.245-000

UF: SP

Município: SAO JOSE DOS CAMPOS

Telefone: (12)3947-9078

E-mail: ceph.ict@unesp.br

**INSTITUTO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - CAMPUS DE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS -
UNESP**



Continuação do Parecer: 7.160.303

de contaminação do pesquisador ou danificação da amostra no manejo do material. Por esta razão será utilizado equipamento individual de proteção para realização da pesquisa."

BENEFÍCIOS: "Abordar novos materiais e recursos odontológicos na área de Endodontia"

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

O estudo é relevante pois poderá promover evidências que comprovem a resistência dos materiais de NiTi, à fadiga, quer seja ela clínica ou por ciclos de esterilização dos instrumentos, contribuindo para minimizar falácias sobre utilização de instrumentais endodônticos. A metodologia proposta será realizada em tempo hábil e de acordo com o cronograma proposto.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

A folha de rosto e o documento para a liberação do TCLE foram apresentados.

Recomendações:

Vide item de "conclusões ou pendências e lista de inadequações".

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

Considerando a análise de todos os documentos apresentados pela pesquisadora, e não havendo impedimento ético, considera-se viável a execução do protocolo.

Considerações Finais a critério do CEP:

O (a) pesquisador(a) irá receber e-mail da Secretaria do CEPH-ICT-CAMPUS DE SJCAMPOS-UNESP, para envio de relatórios parciais/final, para não incorrer na penalidade de não o fazendo, em não ter novas submissões avaliada pelo Comitê de Ética, até que sane a pendência de envio do relatório, na forma de notificação através do sistema da Plataforma Brasil. Obs:- No site <https://www.ict.unesp.br/> > Sobre o ICT > Comissões e Comitês - Comitê de Ética Envolvendo Seres Humanos, encontrará o formulário para envio do Relatório parcial/final.

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Outros	termo_de_disponibilidade_biobanco.pdf	03/10/2024 14:49:34	Denise Nicodemo	Aceito
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2426965.pdf	26/09/2024 13:25:17		Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_tayna.pdf	26/09/2024 13:19:59	TAYNA LOPES DA SILVA	Aceito

Endereço: Av.Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028
Bairro: Jardim São Dimas CEP: 12.245-000
UF: SP Município: SAO JOSE DOS CAMPOS
Telefone: (12)3947-9078 E-mail: ceph.ict@unesp.br

INSTITUTO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA - CAMPUS DE
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS -
UNESP



Continuação do Parecer: 7.160.303

Folha de Rosto	folha_de_rosto.pdf	26/09/2024 13:10:44	TAYNA LOPES DA SILVA	Aceito
----------------	--------------------	------------------------	-------------------------	--------

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita Apreciação da CONEP:

Não

SAO JOSE DOS CAMPOS, 15 de Outubro de 2024

Assinado por:
Denise Nicodemo
(Coordenador(a))

Endereço: Av. Engº Francisco José Longo 777 - Ramal 9028

Bairro: Jardim São Dimas **CEP:** 12.245-000

UF: SP **Município:** SAO JOSE DOS CAMPOS

Telefone: (12)3947-9078

E-mail: ceph.ict@unesp.br