

Influencia del diseño de la sección transversal sobre la resistencia a la fatiga cíclica de dos instrumentos endodónticos de Níquel- Titanio en canales artificiales con Curvatura de 60°: Estudio In Vitro¹Dra. Jennifer Gabriela Risco Tigua, Universidad Hemisferios, Quito-Ecuador²Dra. María Soledad Peñaherrera Manosalvas, Universidad Hemisferios, Quito-Ecuador³Dra. Karol Jasmín Carrillo Rengifo, Universidad Hemisferios, Quito-Ecuador**Corresponding Author:** Dra. Jennifer Gabriela Risco Tigua, Universidad Hemisferios, Quito-Ecuador**Citation of this Article:** Dra. Jennifer Gabriela Risco Tigua, ²Dra. María Soledad Peñaherrera Manosalvas Dra. Karol Jasmín Carrillo Rengifo, “Influencia del diseño de la sección transversal sobre la resistencia a la fatiga cíclica de dos instrumentos endodónticos de Níquel-Titanio en canales artificiales con Curvatura de 60°: Estudio In Vitro”, IJDSIR- July – 2025, Volume – 8, Issue – 4, P. No. 236 – 251.**Copyright:** © 2025, Dra. Jennifer Gabriela Risco Tigua, et al. This is an open access journal and article distributed under the terms of the creative common’s attribution non-commercial License. Which allows others to remix, tweak, and build upon the work non-commercially, as long as appropriate credit is given, and the new creations are licensed under the identical terms.**Type of Publication:** Original Research Article**Conflicts of Interest:** Nil**Abstract**

The unexpected fracture of nickel-titanium rotating instruments (NiTi) during endodontic treatments represents a critical complication, especially in curved ducts where cyclic fatigue constitutes one of the main causes of failure. This situation has motivated the search for improvements in the geometric design of the instruments, particularly in the cross-section, to increase their resistance and clinical safety. This research aims to evaluate the influence of the cross-sectional design of two Nickel Titanium endodontic instruments on the resistance to cyclic fatigue using artificial ducts with a curvature of sixty degrees, by measuring the time it takes the instrument to break. A comparative and cross-sectional in vitro investigation was carried out with 40 files categorized into two groups: AF™ F-One ("S" section) and JIZAI (rectangular eccentric section). Each

instrument was subjected to continuous rotation at 500RPM under standardized circumstances until its breakage, with measurements taken for the number of cycles and the duration in seconds. The findings indicated that the JIZAI file exhibited an average of 2238.33 cycles to fracture and an average duration of 268.6 seconds, while the AF™ F-One demonstrated 787.83 cycles and 94.47 seconds. The differences were statistically substantial ($p < 0.001$), demonstrating the best performance of the JIZAI system. This benefit is attributed to its optimized geometric configuration and sophisticated thermal processing, which provide a more effective distribution of internal stresses, identifying that JIZAI demonstrated superior resistance to cyclic fatigue, which makes it a safer and more effective option for instrumentation in curved channels.

Keywords: Cycling fatigue, NiTi, Curved ducts, AF™ F-One, JIZAI

Resumen/Summary

La fractura inesperada de instrumentos rotatorios de níquel-titanio (NiTi) durante tratamientos endodónticos representa una complicación crítica, especialmente en conductos curvos donde la fatiga cíclica constituye una de las principales causas de separación del instrumento. Esta situación ha motivado la búsqueda de mejoras en el diseño geométrico de los instrumentos, particularmente en la sección transversal, para aumentar su resistencia y seguridad clínica. Esta investigación buscó evaluar la influencia del diseño de la sección transversal de dos instrumentos endodónticos de Níquel Titanio sobre la resistencia a la fatiga cíclica utilizando conductos artificiales con una curvatura de sesenta grados, mediante la medición del tiempo que tarde el instrumento en romperse. Se realizó una investigación in vitro comparativa y transversal con 40 limas categorizadas en dos grupos: AF™ F-One (sección "S" con lados planos) y JIZAI (sección excéntrica rectangular con superficie radial). Cada instrumento se sometió a rotación continua a 500 RPM y 2N/cm en circunstancias estandarizadas hasta su rotura, con mediciones tomadas para el número de ciclos y la duración en segundos. Los hallazgos indicaron que la lima JIZAI exhibió un promedio de 2238.33 ciclos hasta la fractura y una duración promedio de 268.6 segundos, mientras que el AF™ F-One demostró 787.83 ciclos y 94.47 segundos. Las diferencias fueron estadísticamente sustanciales ($p < 0,001$), demostrando el mejor desempeño del sistema JIZAI. Este beneficio se atribuye a su configuración geométrica optimizada y su sofisticado tratamiento térmico, que proporcionan una distribución más efectiva de las tensiones internas, identificando que JIZAI demostró una resistencia superior a la fatiga cíclica, lo que la convierte en una opción más

segura y efectiva para la instrumentación en conductos curvos.

Palabras claves: Fatiga cíclica, NiTi, Conductos curvos, AF™ F-One, JIZAI.

Introduction

Las aleaciones de níquel-titanio (NiTi) han marcado una gran diferencia en endodoncia en comparación con las de acero inoxidable porque tienen memoria de forma, son superelásticas y flexibles. Estas características facilitan la conformación del sistema de conductos radiculares, especialmente en anatomías curvas o complicadas, lo que reduce la posibilidad de cometer errores durante la instrumentación (Missier y George, 2021). Sin embargo, la rotura inesperada de estas limas sigue siendo un gran problema en la práctica clínica, ya que podría dificultar el acceso al tercio apical, lo que hace que la desinfección y la terapia sean menos efectivas (Pillay et al., Fracture of endodontic instruments—Part 1: Literature review on factors that influence instrument breakage, 2020). La fatiga cíclica es una de las principales causas de fracturas, misma que ocurre cuando el instrumento se somete a repetidas presiones de compresión y tracción mientras trabaja en conductos curvos, lo que acumula tensión hasta que se rompe. La forma del instrumento, especialmente la sección transversal, tiene un gran efecto sobre la resistencia a la fatiga cíclica. Los instrumentos con una masa central más pequeña, como aquellos con una sección en forma de S o un diseño excéntrico, tienden a distribuir mejor las tensiones internas, lo que los hace más resistentes a ciclos repetidos (Barbosa et al., 2020).

Los tratamientos termo mecánicos como M-Wire, R-Phase o CM-Wire han mejorado las propiedades metalúrgicas favoreciendo una transición de fase más estable y un mayor número de ciclos hasta la falla (Agrawal et al., 2024). La evaluación de estos parámetros

no solo tiene relevancia científica, sino también implicaciones clínicas directas, pues conocer el diseño geométrico afecta la durabilidad del instrumento, lo que implica en la optimización de su elección. Por ello el presente estudio se enfoca en comparar la resistencia a la fatiga cíclica de dos sistemas de limas rotatorias de NiTi con diferentes diseños de sección transversal, empleando canales artificiales curvos como modelo experimental.

Problem de investigation

La instrumentación del sistema de conductos radiculares es una parte muy importante del tratamiento endodóntico. La introducción de limas rotatorias de níquel-titanio (NiTi) ha sido un gran avance, ya que son superelásticas, tienen memoria de forma y son muy flexibles. Pero uno de los problemas que sigue existiendo es que las limas se rompen inesperadamente por varios factores. Esto hace que sea imposible desinfectar completamente el canal, lo que significa que la terapia endodóntica probablemente no tendrá éxito.

La fatiga cíclica es uno de los factores más importantes que causan fracturas, esto sucede cuando la lima rota de forma continua dentro de un canal curvo, generando ciclos repetitivos de compresión y tracción que inducen microfisuras y, eventualmente, la ruptura del metal (Pillay et al., Fracture of endodontic instruments—Part 1: Literature review on factors that influence instrument breakage, 2020). Esta falla puede ocurrir sin ninguna evidencia de deformación de antemano, lo que dificulta su visualización y significa que debemos analizar qué la hace fuerte.

Uno de los factores más influyentes en la resistencia a la fatiga cíclica es el diseño geométrico de la sección transversal del instrumento. Las limas con diseño de doble S o secciones excéntricas son más resistentes que las de secciones básicas triangulares o rectangulares porque las tensiones mecánicas se distribuyen de manera

más uniforme en el núcleo metálico (Faus et al., 2021). Además, se ha encontrado que un volumen de metal central más bajo hace que el material sea más resistente a la fatiga, ya que lo hace menos rígido y disminuye la capacidad de corte (Di Nardo et al., 2020).

El análisis de elementos finitos también ha demostrado que los cambios en el diseño de la sección transversal, como las secciones convexas o asimétricas, tienen un gran efecto en lo bien que el instrumento puede manejar ciclos de carga repetidos en canales curvos, especialmente cuando se combinan con cosas como la velocidad de rotación o el par aplicado (Hadriyanto, 2021). A pesar de estos hallazgos, existen lagunas respecto a la comparación directa entre instrumentos con secciones geométricas distintas, sometidos a condiciones estandarizadas de curvatura severa, como es el caso de canales artificiales con curvatura de 60°. Esta situación plantea una interrogante clínicamente relevante: ¿Cómo influye el diseño de la sección transversal de dos instrumentos endodónticos de NiTi en su resistencia a la fatiga cíclica al ser utilizados en conductos artificiales con curvatura de 60°?

Objetivos

Objetivo general

1. Evaluar la influencia del diseño de la sección transversal de dos instrumentos endodónticos de Níquel Titanio sobre la resistencia a la fatiga cíclica utilizando conductos artificiales con una curvatura de sesenta grados, mediante la medición del tiempo que tarda el instrumento en romperse.

2. Objetivos Específicos

- Comparar la resistencia a la fatiga cíclica de dos instrumentos endodónticos de Níquel Titanio con diferentes diseños de sección transversal.

- Medir el tiempo que tarda cada instrumento en romperse al ser utilizado en conductos artificiales con una curvatura de sesenta grados

Justificación

La instrumentación del sistema de conductos radiculares es un paso muy importante en la endodoncia moderna. En este caso, los instrumentos de aleaciones de níquel-titanio (NiTi) han demostrado ofrecer muchos beneficios mecánicos, como ser más flexibles y capaces de negociar mejor curvas complicadas del conducto radicular. Esto ha cambiado la forma en que trabajan los odontólogos. Sin embargo, la ruptura inesperada de estas herramientas debido a la fatiga cíclica es un problema que sigue apareciendo y podría hacer que el tratamiento de endodoncia sea menos exitoso. Este problema ha llevado a la creación de nuevas tecnologías y diseños geométricos, como cambios en la sección transversal de las limas, que se están convirtiendo en una técnica potencial para fortalecer el instrumento.

Es importante investigar el diseño de la sección transversal ya que tiene un efecto directo sobre cómo se comporta el instrumento cuando se somete a fatiga cíclica. Estudios recientes han encontrado que los instrumentos en forma de doble S, como el Mtwo, son más resistentes a la rotura que las porciones simétricas triangulares o rectangulares (Faus et al., 2021). Este hallazgo es especialmente importante para los endodoncistas, ya que es menos probable que los instrumentos se rompan durante la instrumentación, lo que hace que sea más probable que el tratamiento tenga una mayor tasa de éxito.

Desde un punto de vista tecnológico, este estudio también es importante ya que ayuda a mejorar el diseño de las herramientas de endodoncia. Los modelos de análisis de elementos finitos han revelado que las características geométricas, incluida la sección transversal y el volumen

central del metal, afectan la forma en que se distribuyen las tensiones internas cuando el instrumento se usa en canales curvos. Esto tiene un impacto directo en la duración del instrumento (Di Russo et al., 2023). Este conocimiento es importante tanto para los fabricantes, que desean diseñar instrumentos más seguros y efectivos, como para los endodoncistas, que necesitan elegir la lima correcta en función de la anatomía del conducto y el tipo de intervención.

Además, el progreso de esta investigación satisface la demanda de estandarización de métodos. Es difícil comparar diferentes sistemas porque muchas investigaciones previas han analizado qué tan bien resisten la fatiga en diversas situaciones. Este estudio utiliza un canal artificial con una curvatura estándar de 60° para proporcionar un marco experimental que se puede repetir y es útil en la clínica. Este método ayudará a proporcionar evidencia sólida que se puede utilizar para elaborar guías clínicas basadas en hechos. En el ámbito educativo, los hallazgos de este estudio también se pueden utilizar para enseñar endodoncia, concienciando a los estudiantes de la importancia de conocer el diseño de los instrumentos que serán utilizados en la práctica clínica y animándolos a elegir sabiamente los sistemas mecanizados.

Marco teórico

Fundamentos de la endodoncia

Principios de la terapia endodóntica

La endodoncia es una rama de la odontología que se enfoca en prevenir, diagnosticar y tratar enfermedades de la pulpa dental y los tejidos alrededor de las raíces de los dientes. La idea principal detrás de la terapia endodóntica es eliminar el tejido pulpar necrótico o inflamado, luego desinfectar, dar forma y sellar herméticamente el sistema de conductos radiculares. Esto mantiene el diente

funcionando y evita que se extraiga demasiado pronto (Versiani et al., 2019).

Una endodoncia exitosa depende de múltiples factores, entre ellos el conocimiento detallado de la anatomía interna del diente, el control de las infecciones bacterianas y utilizartécnicas y materiales que aseguren que el sistema de conductos esté sellado en tres dimensiones. La planificación y ejecución del tratamiento endodóntico ha mejorado mucho gracias a unamejor precisión diagnóstica y al uso de imágenes como la tomografía computarizada de hazcónico (CBCT) (Barbosa et al., 2020).

Anatomía y complejidad de los canales radiculares

El sistema de conductos radiculares tiene muchas formas y tamaños diferentes, lo que puede afectar directamente qué tan bien funciona el tratamiento. Puede haber uno o más conductos en cada diente, y estos conductos pueden tener ramas, curvas u otras formas que no son necesariamente visibles en las radiografías ordinarias. Debido a esta variedad en la anatomía, los dentistas necesitan saber mucho sobre la morfología dental y cómo los dientes pueden diferir entre sí, especialmente los molares, premolares y dientes multirradiculares (DiNardo et al., 2020).

En los primeros molares mandibulares, la raíz mesial normalmente posee dos conductos en más del 95% de los casos, mientras que la raíz distal puede tener de uno a tres conductos. Las formas complejas como istmos, curvaturas en el tercio apical, canales accesorios y raíces adicionales (como la raíz entomolaris o paramolaris) son más comunes de lo que la gente solía pensar. Pueden pasar desapercibidos si no se cuenta con la experiencia clínica y de diagnóstico por imágenes adecuadas (Faus et al., 2021).

Desafíos clínicos en conductos curvos

El tratamiento de conductos con curvaturas severas o dobles es uno de los retos más significativos en el campo de la endodoncia. El riesgo de complicaciones, incluida la formación de escalones (ledging), el transporte de conductos, las perforaciones y, lo que es más importante, la fractura del instrumento de endodoncia debido a la fatiga cíclica, aumenta con la presencia de curvas radiculares en cualquier plano (mesiodistal o bucolingual) (Kharkar et al., 2024).

El método de Schneider, que evalúa el radio y el ángulo de la curva para clasificar su gravedad, se ha empleado para cuantificar el grado de curvatura. Se considera que los conductos con radios inferiores a 5 mm y ángulos superiores a 30° tienen un alto riesgo de complicaciones mecánicas. En estos escenarios son necesarios instrumentos flexibles, rotación adaptativa, memoria controlada y una secuencia de instrumentación meticulosamente diseñada (Parikh et al., 2024).

Además, la resistencia del instrumento a la fatiga cíclica depende del número de ciclos en el punto de máxima tensión (NCF), la velocidad de rotación, la presión aplicada, la irrigación y, por supuesto, el diseño de la sección transversal del instrumento. También se aconseja emplear estrategias como la activación ultrasónica de irrigantes, la instrumentación con sistemas de rotación continua o recíproca y la utilización de imágenes tridimensionales previas en este tipo de anatomía compleja para prevenir errores iatrogénicos y mejorar el pronóstico del tratamiento (Xu et al., 2022).

Instrumentos Endodónticos de Níquel-Titanio (NiTi)

Historia y evolución de los instrumentos NiTi

La introducción de instrumentos de níquel-titanio (NiTi) en endodoncia fue un hito significativo en el campo de la odontología Moderna. Estos instrumentos han alterado significativamente la preparación de conductos

radiculares desde su introducción en la década de 1980, debido a su resistencia a la fatiga cíclica, memoria de forma y flexibilidad (Bhagwatkar et al., 2023). El objetivo principal de la evolución del instrumento NiTi ha sido mejorar su rendimiento mecánico y mitigar el riesgo de fractura, que es una complicación crítica durante el tratamiento endodóntico (Pillay et al., Fracture of endodontic instruments – Part 1: Literature review on factors that influence instrument breakage, 2020).

Al principio, los instrumentos NiTi eran rígidos y susceptibles a fracturas, particularmente en canales curvos. Sin embargo, la aplicación de tratamientos térmicos ha permitido potenciar sus propiedades mecánicas, potenciando así su resistencia a la fatiga y ductilidad (Chan et al., 2022). Estos desarrollos han llevado a una mayor seguridad y eficacia en el proceso de instrumentación radicular. Además, se han implementado tratamientos superficiales, como el electropulido, para mejorar la corrosión y la resistencia al desgaste (Aranguren et al., 2024).

El diseño geométrico de los instrumentos también ha sufrido una transformación. Se han creado nuevos sistemas con ángulos helicoidales variables, secciones transversales y sistemas de movimiento (rotación continua y recíproca), que han mejorado la capacidad de corte y disminuido la probabilidad de transporte del canal (Grande et al., 2023). Estudios comparativos han demostrado que los instrumentos tratados térmicamente, como Reciproc Blueo TruNatomy, exhiben una mayor resistencia a la fractura que sus predecesores (Aranguren et al., 2024).

La evaluación del desempeño clínico de estos instrumentos ha progresado a métodos más dinámicos, como la medición en tiempo real del par de operación, que permite una comprensión más completa de los esfuerzos de torsión y flexión que ocurren durante

la instrumentación. Además, se están analizando los cambios estructurales en los instrumentos tras su uso clínico mediante técnicas como la espectroscopía óptica-magnética (Grande et al., 2023).

Propiedades fisicoquímicas del NiTi El níquel-titanio (NiTi), también conocido como nitinol, es una aleación intermetálica que ha revolucionado el campo de la endodoncia debido a sus extraordinarias propiedades fisicoquímicas. Es un material ideal para la producción de instrumentos rotativos de endodoncia debido a su notable resistencia a la corrosión, biocompatibilidad, memoria de forma y superplasticidad, que se encuentran entre las características más pertinentes (Chan et al., 2022). NiTi posee una de las propiedades mecánicas más notables: la superplasticidad. Este fenómeno es particularmente ventajoso en conductos radiculares curvos y estrechos, ya que permite que el material se deforme significativamente bajo carga y recupere su forma original al liberar la tensión. El comportamiento termoplástico de la aleación se caracteriza por una transformación reversible entre las fases austenítica y martensítica, que es la causa de esta propiedad (Grande et al., 2023).

NiTi exhibe una alta resistencia a la corrosión debido a la formación espontánea de una capa pasivante de óxido de titanio (TiO_2) en su superficie, de acuerdo con sus propiedades químicas. Esta capa protege al instrumento del ambiente ácido y húmedo del conducto radicular, evitando así su deterioro durante el uso clínico (Agrawal et al., 2024). Además, el NiTi puede alterarse térmicamente para mejorar sus características físicas. La proporción de fases austeníticas y martensíticas se modifica mediante tratamiento térmico, lo que mejora su control de la memoria de forma, la resistencia a la fatiga cíclica y la ductilidad (Bhagwatkar et al., 2023). En comparación con generaciones anteriores, los

instrumentos tratados térmicamente, incluidos Hyflex CM y Reciprocc Blue, han mostrado una resistencia superior (Aranguren et al., 2024).

Tipos de tratamientos térmicos y aleaciones (M-Wire, CM, Gold, Blue)

La introducción de tratamientos térmicos que mejoran las propiedades mecánicas del material ha sido el factor principal que impulsa la evolución de los instrumentos de endodoncia e níquel-titanio (NiTi). Esto ha resultado en el desarrollo de varias aleaciones, incluyendo M-Wire, Controlled Memory (CM), Gold Wire y Blue Wire, cada una de las cuales posee propiedades únicas que permiten su uso en escenarios clínicos específicos. El objetivo de estas tecnologías es mejorar la seguridad, flexibilidad y durabilidad de la fractura de la instrumentación del conducto radicular.

M-Wire: A través de un procedimiento de tratamiento térmico que altera la microestructura del material antes del mecanizado, se introdujo la aleación M-Wire como una mejora del NiTi convencional. Esto permite una distribución más uniforme de las fases martensítica y austenítica, lo que mejora la resistencia a la fatiga cíclica sin comprometer totalmente la rigidez requerida para cortar tejidos duros. Los instrumentos como ProTaper Next y Reciprocc están contruidos con M-Wire, que ha demostrado tener una vida útil más larga cuando se usa durante períodos prolongados en canales curvos. Sin embargo, estos instrumentos continúan exhibiendo superelasticidad, lo que resulta en su tendencia a volver a su forma original. Esto puede impedir su desarrollo posterior en el campo de la anatomía compleja. A pesar de que tienen una seguridad mejorada en comparación con los instrumentos tradicionales, siguen siendo más susceptibles a la transmisión por canales que las versiones más avanzadas (Sánchez et al., 2024).

CM-Wire: La aleación de memoria controlada (CM) es un avance significativo en términos de adaptabilidad y flexibilidad. Los instrumentos CM son capaces de adaptarse a las curvaturas del conducto sin ejercer fuerzas excesivas sobre las paredes dentinarias, ya que no recuperan automáticamente su forma original tras la deformación, a diferencia del hilo M. Esto se ve facilitado por una modificación térmica que disminuye la cantidad de fase austenítica a la temperatura corporal, promoviendo así la martensita estable a temperatura ambiente. Esta tecnología se emplea para producir instrumentos como HyFlex CM y V-Taper 2H. Según la investigación, estos sistemas exhiben la menor resistencia a la flexión, lo que les permite navegar por los canales curvos con mayor suavidad, y la mayor resistencia a la fatiga cíclica cuando se comparan con M-Wire u Gold (Oh et al., 2023).

Además, los CM han mostrado una estabilidad dimensional excepcional, incluso después de usarse en numerosos entornos clínicos. La integridad estructural de estos instrumentos no se ve comprometida, ya que la degradación se concentra principalmente en las áreas de corte, según un estudio de micro-CT (Faus-Matoses et al., 2022).

Gold Wire: La aleación de alambre de oro es el resultado de un tratamiento térmico adicional que se aplica a los instrumentos CM. Este tratamiento mejora la estabilidad de la estructura martensítica y produce un tono dorado único. Este proceso mejora el control de la memoria del instrumento, aumenta su resistencia a la torsión e imparte una textura más maleable y sedosa. Ruiz et al. (2020) han demostrado que instrumentos como WaveOne Gold y ProTaper Gold exhiben un rendimiento clínico excepcional, particularmente en conductos estrechos o calcificados donde se necesita una mayor precisión sin sacrificar la eficiencia de corte. El comportamiento

térmico de estos instrumentos es más complejo, ya que la transición austenita-martensita ocurre a la temperatura corporal, lo que les permite pasar de un comportamiento rígido a flexible durante el uso. Esto logra un equilibrio más óptimo entre rigidez y flexibilidad, lo que permite incisiones más eficientes que CM, al tiempo que elimina el riesgo de fractura asociado con M-Wire (Hou et al., 2020).

Blue Wire: Uno de los avances más recientes en aleaciones NiTi es la tecnología de alambre azul. Estos instrumentos se someten a un tratamiento térmico que altera su estructura cristalina y produce una capa de óxido azulado que mejora la dureza de la superficie y protege contra la corrosión. Reciprocc Blue Y Vortex Blue son dos ejemplos de esta tecnología que han exhibido la mayor resistencia a la fatiga cíclica, incluso en condiciones adversas como irrigación con hipoclorito o altas temperaturas (Ramos et al., 2025). Su comportamiento térmico es comparable al del oro, pero exhiben un rango más amplio de deformación elástica, lo que los hace más predecibles y seguros, particularmente en anatomías intrincadas. Además, la superficie tratada térmicamente del producto presenta una fricción reducida, lo que mejora la eficiencia de penetración y deslizamiento dentro del canal (Faus-Matoses et al., 2022).

Fatiga Cíclica en Instrumentos Endodónticos

Definición y mecanismo de fatiga cíclica

Uno de los principales mecanismos de falla en los instrumentos de níquel-titanio (NiTi) utilizados en endodoncia rotativa es la fatiga cíclica. Este fenómeno se caracteriza por la fractura progresiva de un material que está sometido a esfuerzos repetitivos o cíclicos, particularmente en situaciones en las que el instrumento gira dentro de un conducto radicular curvo, encontrando compresión y tensión alternas. La fatiga cíclica es un fenómeno que se induce por la deformación repetitiva de

un área localizada en un material metálico, como el NiTi, durante su uso. Esto ocurre en el contexto endodóntico cuando el instrumento gira libremente dentro de una curvatura, lo que da como resultado una tensión alterna en las porciones interna y periférica del punto de curvatura. A diferencia de la fractura torsional, que se caracteriza por el bloqueo de la punta del instrumento mientras el resto continúa girando, la fatiga cíclica no está asociada con el agarre del instrumento. Más bien, es el resultado de la acumulación gradual de microdaños estructurales hasta que se produce una fractura completa (Oh et al., 2023). Las etapas secuenciales de degradación estructural que dan como resultado la fractura del instrumento durante el uso se describe en la Tabla 1.

Tabla 1: Mecanismos de fatiga cíclica

Mecanismo de fatiga cíclica	Descripción
Iniciación de microgrietas	Formación de grietas microscópicas en la zona de curvatura por tensión alternante.
Propagación de las grietas	Expansión progresiva de las grietas con cada ciclo de rotación.
Fractura súbita	Ruptura completa del instrumento cuando ya no puede resistir el esfuerzo acumulado.

Fuente: (Abdellatif et al., 2024)

Factores que influyen en la resistencia a la fatiga: La durabilidad y seguridad de los instrumentos de níquel-titanio (NiTi) durante el tratamiento endodóntico, particularmente en canales anatómicos curvos o complejos, están significativamente influenciadas por su resistencia a la fatiga cíclica. Esta resistencia está influenciada por una variedad de factores, incluida la aleación, el diseño del instrumento, el entorno clínico y las condiciones operativas.

Tipo de aleación y tratamiento térmico: La microestructura del instrumento está directamente influenciada por la variedad de NiTi y su tratamiento térmico. Se ha encontrado que la fase martensítica de aleaciones tales como Alambre CM, Alambre Dorado y

Alambre Azul tiene una resistencia a la fatiga sustancialmente mayor que la del alambre NiTi o M convencional a la temperatura corporal. Este contenido de fase martensítica mejora la tolerancia al estrés y la flexibilidad (Oh et al., 2023).

Diseño del instrumento: El comportamiento mecánico del instrumento está influenciado por su geometría, que incluye la sección transversal, el diámetro central y el ángulo helicoidal. Los diseños con núcleos más pequeños, secciones en forma de S y acanaladuras más anchas son más resistentes a la fatiga debido a la reducción de la concentración de tensiones en áreas críticas (Faus-Matoses et al., 2023).

Temperatura de trabajo: La temperatura de funcionamiento afecta la resistencia a la fatiga. A temperatura corporal (~37 °C), ciertos instrumentos experimentan una pérdida de rigidez pero adquieren flexibilidad, lo que puede aumentar o disminuir su resistencia, dependiendo de la aleación empleada (Ramos et al., 2025).

Longitud y calibre del instrumento: Debido al mayor momento de flexión y a la mayor área de contacto con el canal, los instrumentos con puntas más largas o más grandes (por ejemplo, 25 mm, ISO 40) exhiben una menor resistencia a la fatiga cíclica que aquellos con puntas más cortas o delgadas (Faus-Matoses et al., 2023).

Reutilización y esterilización: La resistencia del NiTi a la fatiga disminuye como resultado del deterioro progresivo de su microestructura como resultado del uso repetido y la exposición a ciclos de autoclave. La reutilización debe restringirse, particularmente en canales curvos (Stošić et al., 2024).

Tabla 2: Factores que influyen en la resistencia a la fatiga de instrumentos NiTi

Factor	Descripción
Tipo de aleación y tratamiento térmico	CM, Gold y Blue Wire resisten más fatiga que M-Wire o NiTi convencional.
Diseño del instrumento	Sección en S, núcleo reducido y flautas anchas aumentan la flexibilidad.
Movimiento del instrumento	El movimiento recíprocante mejora la resistencia respecto a la rotación continua.
Temperatura de trabajo	A 37 °C puede reducir o mejorar la resistencia, según el tipo de aleación.
Longitud y calibre del instrumento	Instrumentos más largos o más gruesos son más propensos a fracturarse.
Reutilización y esterilización	El uso repetido y autoclave disminuyen la resistencia estructural.

Sistema F-one (Limas AF F-One)

Los instrumentos de endodoncia rotativos de níquel-titanio (NiTi) son las limas afines, que están destinadas a la preparación del sistema de conductos radiculares. Emplean una aleación única conocida como alambre AF-R (Aleación con flexibilidad Retenida), que se somete a un moderno tratamiento térmico para mejorar su resistencia a la fatiga cíclica y la flexibilidad.

Características

Aleación térmicamente tratada (AF-R Wire): Las limas AF-One están compuestas por una aleación de NiTi que se ha sometido a un tratamiento térmico conocido como alambre AF-R. Este tratamiento está diseñado para mejorar la memoria controlada y la flexibilidad del instrumento. Esta modificación térmica permite que la lima se ajuste a la curvatura del conducto sin imponer presiones excesivas ni volver forzosamente a su forma original, como ocurre en las aleaciones superelásticas. Se ha demostrado que este tipo de tratamiento térmico mejora sustancialmente la resistencia del instrumento a la fatiga cíclica, extendiendo así su vida útil en entornos clínicos desafiantes (Oh et al., 2023).

Sección transversal en forma de "S": Se incluyen dos filos de corte en el diseño de sección transversal en forma de "S" del sistema F-One, que es otra característica crítica. La capacidad de corte del instrumento se ve reforzada por

esta forma de geometría, que permite la extracción de dentina con menos presión. Además, se mejora la limpieza del sistema de conductos y se reduce el peligro de extrusión apical por la forma abierta, lo que facilita la evacuación eficiente de residuos. La investigación ha demostrado que las limas con diseños similares en forma de S exhiben un rendimiento superior en términos de control de la trayectoria del canal y eficacia de corte (Faus-Matoses et al., 2023).

Sistema de limas Jizai

Los archivos Jizai, producido por Mani Inc., son instrumentos rotativos de níquel-titanio diseñados con sofisticadas técnicas de tratamiento térmico, lo que resulta en una mayor flexibilidad, resistencia a la fatiga cíclica y adaptación anatómica. Estas limas se caracterizan por su diseño de corte asimétrico, que minimiza el contacto con las paredes del canal y promueve una instrumentación más efectiva al tiempo que reduce la posibilidad de transferencia apical. El delgado núcleo central de estas limas mejora la eliminación de detritos y mejora la eficacia de corte al tiempo que mantiene la integridad estructural del instrumento (Kyaw et al., 2024).

El tratamiento térmico de la aleación de NiTi facilita una transformación de fase regulada entre austenita y martensita, dotando a los archivos de características de memoria controlada similares a las del CM Wire o Gold Wire. Una característica destacable adicional es su compatibilidad con los sistemas de rotación continua, lo que facilita una experiencia más fluida durante la instrumentación y un control mejorado para el operador. Además, se observa una capacidad competente para controlar la curvatura del canal, particularmente en anatomías altamente curvadas, donde la probabilidad de fractura en otros sistemas es elevada (Kasuga et al., 2023).

Metodología

Tipo y diseño de la investigación El estudio constituyó un estudio de tipo experimental, ya que se manipuló deliberadamente una variable independiente, para evaluar su impacto en una variable dependiente, la resistencia a la fatiga del ciclo. Esta relación causal se evaluó en circunstancias controladas de laboratorio, lo que permitió el mantenimiento de un entorno estable y la regulación de posibles influencias extrañas.

El diseño adoptado fue *in vitro*, comparativo y transversal. Se trabajó en un entorno fuera del cuerpo humano utilizando conductos artificiales de acero inoxidable, los cuales simulaban una curva radicular estandarizada de 60°. El aspecto comparativo del estudio se centró en evaluar dos tipos de instrumentos NiTi, AF™ F-One y JIZAI, caracterizados por distintas configuraciones geométricas de sección transversal. De manera similar, el diseño fue transversal ya que la recopilación de datos se produjo en un solo punto de tiempo, sin intervención terapéutica ni monitoreo longitudinal.

Este enfoque analítico facilitó una evaluación precisa de las diferencias en la resistencia a la fatiga cíclica entre los dos instrumentos, reduciendo así la variabilidad vinculada a las variables clínicas. La estandarización de parámetros que incluyen velocidad de rotación, par, longitud de trabajo y circunstancias experimentales mejoró la validez interna de la investigación y permitió la comparación objetiva de los datos obtenidos.

Población y muestra

La población de investigación comprendía limas de endodoncia de níquel-titanio (NiTi) que normalmente se utilizan en la preparación del conducto radicular. Esta investigación examina cuidadosamente instrumentos con parámetros dimensionales análogos que difieren en su diseño de sección transversal para facilitar una

comparación uniforme. La muestra estuvo conformada por 40 limas endodónticas, distribuidas en dos grupos experimentales.

El primer grupo se constituyó por 20 limas AF™ F-One (FO), fabricadas por ShanghaiFanta Dental Material Co., China, que se distingue por una sección transversal en forma de "S" con lados planos. El segundo grupo consistió en 20 limas JIZAI (J) producidas por Mani, Tochigi, Japón, con una sección transversal excéntrica rectangular delgada, alterada con una superficie radial. Todas las limas medían 25 mm de longitud, con un diámetro de punta de 35mm y una conicidad de 0,04 cumpliendo con los requisitos de inclusión estandarizados para garantizar la comparabilidad de los datos.

La selección de la muestra fue no probabilística y basada en la conveniencia, teniendo en cuenta la disponibilidad de instrumentos en el mercado local y su pertinencia para los objetivos del estudio. Cada instrumento se evaluó una sola vez, eliminando su reutilización para garantizar la integridad de los datos y evitar sesgos asociados con el desgaste previo. Esta muestra facilitó un análisis comparativo riguroso entre los dos tipos de instrumentos, manteniendo constantes las variables estructurales y operativas, y concentrándose únicamente en el impacto del diseño geométrico de la sección transversal en la resistencia a la fatiga cíclica.

Procedimiento experimental

El enfoque experimental se llevó a cabo en un entorno de laboratorio controlado, empleando un diseño estandarizado para evaluar la resistencia a la fatiga cíclica de los instrumentos de endodoncia elegidos. Inicialmente, se fabricaron dos conductos artificiales sobre una placa de acero inoxidable de 5 cm por 5 cm. Cada conducto poseía un diámetro interno de 1,5 mm, una longitud de trabajo de 21 mm, una curva de sesenta grados situada a 5mm del vértice y un radio de curvatura de 5 mm. Se incorporó

una región circular terminal con un diámetro de 4 mm, imitando un sistema abierto que permitía la entrada de glicerina como lubricante. La placa estaba encerrada en una cubierta de vidrio asegurada con tornillos, lo que permitía monitorear directamente el momento de fractura del instrumento.

Cada lima se colocó por separado en el conducto artificial y se conectó a la pieza de mano del motor de endodoncia E-value (Eighteeth), que se conectó a un topógrafo dental para su estandarización. El motor se activó según las especificaciones del fabricante, funcionando en rotación continua a 500 RPM, con un par de torsión de 2 N/cm. Se emplearon movimientos de intrusión y extrusión para replicar la aplicación clínica estándar, con glicerina utilizada como lubricante para minimizar la fricción y la generación térmica durante la rotación. La rotación del instrumento hasta el momento preciso de su fractura fue capturada en video con un iPhone 16 Pro Max, con calidad 4K y una velocidad de grabación de 120 cuadros por segundo (fps). El tiempo de fractura se determinó analizando las imágenes, medidas en segundos. Luego se estimó el número de ciclos hasta la fractura (NCF) usando la siguiente fórmula:

$$NCF = \frac{\text{Tiempo de fractura (s)} \times \text{Velocidad (rpm)}}{60}$$

Los valores adquiridos se documentaron en una hoja de cálculo Excel y posteriormente se sometieron a análisis estadístico utilizando el software SPSS versión 25 (IBM-SPSS Inc., Chicago, EE. UU.), empleando estadísticas descriptivas, pruebas de normalidad y pruebas de separación de medias (Kruskal-Wallis y Mann-Whitney U) para evaluar la importancia de las diferencias entre los dos grupos instrumentales.

Hallazgos

Resistencia a la fatiga cíclica de dos las limas Fanta (AFTM F ONE) y JIZAI.

En la tabla 3 se identifica la media, desviación estándar y error experimenta de los grupos experimentales. Estos sistemas fueron probados a 60° de arco. La investigación se desarrolló mediante condiciones geométricas constantes.

Tabla 3: Análisis descriptivo de las limas utilizadas

Grupo experimental	Media (NCF)	Desviación estándar	E. E	Significancia Shapiro-Wilk
AFTM F ONE	787,83	354,85	79,34	,016
JIZAI	2238,33	256,58	57,37	0,828

La lima AFTM F ONE presento una media de 787,83 ciclos y una DE= 354,85, mientras que la lima JIZAI obtuvo una media de 2238,33 ciclos y una DE= 256,58. Estos resultados muestran una diferencia en la resistencia a la fatiga cíclica entre los dos instrumentos evaluados. De acuerdo con el test de normalidad el grupo experimental AFTM F ONE no presento una distribución normal (.016), se aplicó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comprar las medias entre los grupos de estudio.

Tabla 4: Prueba de Kruskal-Wallis sobre NCF

Variable	Estadístico χ^2	gl	p-valor	Significancia	Conclusión
NCF	28,982	1	0,000	p < 0,05	Diferencia significativa

PROB. <0,01: Hay diferencias altamente significativas

PROB. < 0,05: Hay diferencias significativas

PROB. >0,05: No hay diferencias significativas

Los resultados de la tabla 4, muestran que existen diferencias estadísticamente significativas en el número de ciclos hasta la fractura (NFC) entre los grupos experimentales, con un p-valor de 0,000, lo que demuestra que no existe una igualdad de distribución entre grupos. El análisis indica que el diseño de la sección transversal del instrumento influye de manera significativa en su resistencia a la fatiga cíclica.

Tiempo de ruptura de las lima AFT^MF ONE y JIZAI. En la tabla 5 se identifica los tiempos de ruptura de los instrumentos endodónticos AFTM F ONE y JIZAI, expresado en segundos. Este análisis incluye la media, desviación estándar, error experimental y la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, con la finalidad de evaluar la distribución de los datos y determinar el enfoque estadístico adecuado para la comparación entre los grupos de estudio.

Tabla 5: Estadística descriptiva para el análisis de los tiempos de ruptura de las limas

Grupo experimental	Media (Tiempo de ruptura, segundos)	Desviación estándar	E. E	Significancia Shapiro-Wilk
AFTM F ONE	94,4740	42,5822	9,52	,016
JIZAI	268,600	30,7902	6,88	,828

El grupo JIZAI presento un tiempo de ruptura de 268,6segundos, mientras que las limasdel grupo AF^TM F ONE tuvieron un tiempo de ruptura menor de 94,47 segundos, siendo estevalor mucho mejor que la del otro grupo de estudio. Respecto a la dispersión los datos del grupoAFTM F ONE mostraron mayor variabilidad (DE=42,58) en comparación con JIZAI(DE=30,79), lo que indica que los resultados de las limas JIZAI fueron más consistentes entrelas repeticiones. Respecto a la normalidad se evidenció una distribución normal para JIZAI (p=0,828), pero anormal para la marca AF^TM F ONE (p=0,016). Por lo cual se empleo una prueba noparamétrica de Mann-Whitney U.

Tabla 6: Estadísticos de la prueba de Mann-Whitney U para el tiempo de ruptura de las limas

Estadístico	Valor
Mann-Whitney U	1,000
Estadístico de Wilcoxon W	211,000
Z (valor normalizado)	-5,383
Sig. asintótica bilateral (p-valor)	0,000
Nivel de significancia	p < 0,001 (altamente significativo)

El valor U de Mann-Whitney de 1.000, acompañado de un valor p inferior a 0.001, significa diferencias muy significativas entre los grupos con respecto al tiempo de ruptura. El grupo JIZAI, exhibiendo una media más alta en el análisis descriptivo (268,6 segundos en comparación con 94,47 segundos para AF™ F ONE), demostró estadísticamente una mayor resistencia a la fatiga del ciclo durante el período previo a la fractura.

Este hallazgo valida que, bajo los entornos experimentales aplicables, el tratamiento de la marca JIZAI tiene un mejor desempeño clínico en cuanto a durabilidad, atribuible a sus características de diseño, composición de aleación o tratamiento térmico.

Discusión and conclusions

Discusión

Los hallazgos de esta investigación revelan diferencias significativamente significativas ($p < 0,001$) tanto en el número de ciclos hasta la fractura (NCF) como en la duración de la ruptura entre las limas AF™ F ONE y JIZAI. En ambos casos, los archivos JIZAI demostraron un rendimiento superior, como lo indica un NCF medio más alto (2238,33 ciclos en comparación con 787,83 ciclos) y un tiempo de ruptura significativamente mayor (268,6 segundos frente a 94,47 segundos). Los hallazgos pueden explicarse a los atributos metalúrgicos y de diseño de los instrumentos. De acuerdo con Ruiz (2020) los sofisticados tratamientos térmicos implementados en el alambre NiTi, ejemplificados por la tecnología CM-Wire o Goldwire, mejoran notablemente la resistencia a la fatiga cíclica. Las limas JIZAI se producen a través de tratamientos térmicos que mejoran la flexibilidad y la resistencia al estrés repetitivo, lo que resulta en un mejor rendimiento clínico.

Estos coinciden con lo reportado por Portillo (2023) descubrieron que las limas AF Blue tenían una resistencia intermedia a la fatiga del ciclo en relación con Reciproc

Blue y X1 Blue, enfatizando que el tratamiento térmico influye significativamente en el rendimiento clínico. Sandino et al. (2024) indicaron que las limas pediátricas sometidas al tratamiento AF-H Wire presentaban una durabilidad superior frente a la fatiga cíclica en comparación con las que no fueron tratadas térmicamente. Además, un estudio realizado por Ubaed y Bakr (2022) demostró que los archivos AF F ONE mostraban un rendimiento competitivo en relación con otros sistemas como 2 Shape, sin superar a aquellos con una especialización térmica superior.

Además, el diseño geométrico del instrumento debe considerarse como un elemento fundamental en su resistencia a la fatiga. La sección transversal, el ángulo de corte, el uso y el tipo de movimiento (rotativo continuo o alternativo) afectan directamente la distribución de tensiones durante la instrumentación. Faus et al. (2021) afirman que estos aspectos de diseño influyen en la acumulación de tensiones en las regiones curvas de los conductos, lo que se correlaciona directamente con la durabilidad del instrumento. A pesar de que ambos sistemas están expuestos a configuraciones experimentales controladas idénticas, una curvatura de 60° con un radio de 5 mm, el rendimiento mejorado de las limas JIZAI indica que su configuración geométrica es más efectiva para reducir las cargas concentradas. De acuerdo con Kyaw et al. (2024) JIZAI presenta el mejor desempeño en el mantenimiento de la curvatura original del conducto, esto gracias a su forma de sección transversal, lo que genera una naturaleza pasiva de corte lo que puede ayudar a mantener el instrumento giratorio centrado y prevenir rupturas de la lima.

Conclusiones

El diseño geométrico de la sección transversal de los instrumentos de endodoncia de níquel-titanio afecta considerablemente su resistencia a la fatiga cíclica. Las

limas JIZAI, que presentan una sección transversal excéntrica rectangular modificada, demostraron una mayor durabilidad contra ciclos repetidos de compresión y tracción dentro de conductos artificiales con una curvatura de 60°, en contraste con las limas AFTM F ONE, que poseen una sección en forma de "S". Este descubrimiento confirma que las propiedades geométricas y metalúrgicas de los instrumentos influyen significativamente en su rendimiento clínico, particularmente en estructuras anatómicas intrincadas.

La idoneidad del instrumento para entornos clínicos que presentan grandes desafíos técnicos se ve reforzada por su mayor vida útil previa a la ruptura y sus características geométricas y metalúrgicas mejoradas. Se determinó que la lima JIZAI exhibe un comportamiento mecánico más estable y seguro en condiciones clínicas simuladas a través de una comparación de los dos instrumentos. Este rendimiento es el resultado de las propiedades mejoradas de la aleación y el diseño estructural, que promueven una distribución uniforme de las tensiones, reducen el riesgo de fractura y mejoran la durabilidad operativa en anatomías exigentes.

La funcionalidad de la lima JIZAI se corrobora mediante el análisis del tiempo de uso hasta la fractura, lo que indica que puede soportar un período prolongado de instrumentación sin comprometer su integridad. Este resultado enfatiza su idoneidad para procedimientos clínicos en conductos con curvaturas significativas, donde es necesario un instrumento confiable y resistente a la fatiga cíclica.

Bibliografía

1. Abdellatif, D., Iandolo, A., Scorziello, M., Sangiovanni, G., y Pisano, M. (2024). Cyclic Fatigue of Different Ni-Ti Endodontic Rotary File Alloys: A Comprehensive Review. *Bioengineering*. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11050499>.

2. Agrawal, P., Chandak, M., Nikhade, P., Patel, A., y Bhopatkar, J. (2024). Revolutionizing Endodontics: Advancements in Nickel–Titanium Instrument Surfaces. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontic*, 27(2), 126-133.
3. Agrawal, P., Chandak, M., Nikhade, P., Patel, A., y Bhopatkar, J. (2024). Revolutionizing Endodontics: Advancements in Nickel–Titanium Instrument Surfaces. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontic*, 27(2), 126-133.
4. Barbosa, I., Ferreira, F., Scelza, P., Adeodato, C., Caldas, I., Gonçalves, F., . . . Zaccaro, M. (2020). Structural Analysis of NiTi Endodontic Instruments: A Systematic Review. *Iranian Endodontic Journal*, 15(3), 124-139.
5. Bhagwatkar, D., Bin, F., Pavithra, B., Tabassum, W., Tiwari, P., y Garg, B. (2023). Nitinol advancements in endodontics: Heat treatment and surface functionalization of NiTi instruments. *IP Indian Journal of Conservative and Endodontics*. <https://doi.org/10.18231/j.ijce.2023.028>
6. Bhagwatkar, D., Bin, F., Pavithra, B., Tabassum, W., Tiwari, P., y Garg, B. (2023). Nitinol advancements in endodontics: Heat treatment and surface functionalization of NiTi instruments. *IP Indian Journal of Conservative and Endodontics*. <https://doi.org/10.18231/j.ijce.2023.028>
7. Di Nardo, D., Gambarini, G., Seracchiani, M., Mazzoni, A., Zanza, A., Giudice, A. D., . . . Testarelli, L. (2020). Influence of different cross-section on cyclic fatigue resistance of two nickel–titanium rotary instruments with same heat treatment. *Saudi Endodontic Journal*, 10(3), 221-225. https://doi.org/10.4103/sej.sej_124_19
8. Di Russo, F., Zanza, A., Gisario, A., Natali, S., y Ruta, G. (2023). FEM analysis of NiTi rotary

- endodontic instruments to fatigue stress conditions: influence of geometrical parameters and design optimization. *Saudi Endodontic Journal*, 47, 765-781. https://doi.org/10.4103/sej.sej_124_19
9. Faus, V., Hamoud, N., Marhuenda, M., Faus-Matoses, I., Zubizarreta-Macho, Á., Ruiz Sánchez, C., y Faus-Matoses, V. (2021). Influence of the Geometrical Cross-Section Design on the Dynamic Cyclic Fatigue Resistance of NiTi Endodontic Rotary Files. *Journal of Clinical Medicine*, 10(20), 4713. <https://doi.org/10.3390/jcm10204713>
10. Faus-Matoses, V., Faus-Llácer, V., Aldeguer Muñoz, Á., Alonso Pérez-Barquero, J., Faus-Matoses, I., Ruiz-Sánchez, C., y Zubizarreta-Macho, Á. (2022). A novel digital technique to analyze the wear of CM-wire NiTi alloy endodontic reciprocating files: An in vitro study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph19063203>
11. Faus-Matoses, V., Faus-Llácer, V., Ruiz-Sánchez, C., Prats Gallego, S., Zubizarreta-Macho, Á., Solano-Mendoza, B., . . . Faus-Matoses, I. (2023). The cyclic fatigue resistance of different lengths of CM Gold Wire and CM Blue Wire NiTi alloy endodontic rotary files: An in vitro study. *Applied Sciences*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/app13074612>
12. Grande, N., Castagnola, R., Minciocchi, I., Marigo, L., y Plotino, G. (2023). A review of the latest developments in rotary NiTi technology and root canal preparation. *Australian Dental Journal*, 68(s1), 24-38. <https://doi.org/10.1111/adj.12998>.
13. Hadriyanto, W. W. (2021). Influence of nickel-titanium rotary systems with varying cross-sectional, pitch, and rotational speed on deflection and cyclic fatigue: a finite element analysis study. *BIO Web of Conference*, 41. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20214105005>
14. Hou, X., Yang, Y., y Qian, J. (2020). Phase transformation behaviors and mechanical properties of NiTi endodontic files after gold heat treatment and blue heat treatment. *Journal of Oral Science*. <https://doi.org/10.2334/josnusd.19-0331>.
15. Kasuga, Y., Kimura, S., Maki, K., Unno, H., Omori, S., Hirano, K., y Okiji, T. (2023). Phase transformation and mechanical properties of heat-treated nickel-titanium rotary endodontic instruments at room and body temperatures. *BMC Oral Health*, 23(1), 825.
16. Kharkar, A., Reddy, K., Banerjee, S., y Maheshwari, Z. (2024). Coping with complexity: Navigating severe curve canals in endodontic root canal treatment. *Journal of Conservative Dentistry and Endodont*, 27, 785-788. https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_208_24
17. Kyaw, M., Ebihara, A., Iino, Y., Thu, M., Maki, K., Kimura, S., y Okiji, T. (2024). Effect of repetitive up-and-down movements on torque/force generation, surface defects and shaping ability of nickel-titanium rotary instruments: an ex vivo study. *BMC Oral Health*, 24(1). <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04689-6>.
18. Missier, S., y George, A. (2021). NiTi and its Usage in Endodontic Rotary Instruments—A Review. *Scholars Journal of Dental Sciences*, 8(2), 33-37. <https://doi.org/10.36347/sjds.2021.v08i02.002>.
19. Oh, S., Kim, T., y Chang, S. (2023). Mechanical properties of NiTi rotary files fabricated through Gold-Wire, CM-Wire, T-Wire, and R-Phase heat treatment. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app13063604>

20. Pillay, M., Vorster, M., y van der Vyver, P. (2020). Fracture of endodontic instruments—Part 1: Literature review on factors that influence instrument breakage. *South African Dental Journal*, 75(10), 553-563. <https://doi.org/10.17159/2519-0105/2020/v75no10a4>
21. Portillo, M., Santos, L., Couto, V., Frozoni, M., & Méndez, J. (2023). Cyclic fatigue resistance of three reciprocating nickel-titanium instruments with heat treatment at intrachannel temperature. *Revista Facultad de Odontología*. <https://doi.org/10.17533/udea.rfo.v35n1a2>
22. Ramos, M., Aranguren, J., Malvicini, G., de Gregorio, C., Bonilla, C., y Pérez. (2025). Temperature-dependent effects on cyclic fatigue resistance in three reciprocating endodontic systems: An in vitro study. *Materials*, 18(5). <https://doi.org/10.3390/ma18050952>
23. Ruiz, C., Faus-Llácer, V., Faus-Matoses, I., Zubizarreta-Macho, Á., Sauro, S., y Faus-Matoses, V. (2020). The influence of NiTi alloy on the cyclic fatigue resistance of endodontic files. *Journal of Clinical Medicine*, 9(11), 3755. <https://doi.org/10.3390/jcm9113755>
24. Sánchez, P., Vidi, B., Rico, C., Mena-Álvarez, J., Gil, J., y Aragonese, J. (2024). Relevant aspects in the mechanical and aging degradation of NiTi alloy with R-phase in endodontic files. *Materials*, 17. <https://doi.org/10.3390/ma17133351>
25. Sandino, A., Vega-González, A., & Méndez, C. (2024). Cyclic fatigue resistance of two pediatric rotary files made of different NiTi alloys. *Pediatric Dental Journal*, 29(1), 25-31. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2024.109>
26. Sandino, A., Vega-González, A., & Méndez, C. (2024). Cyclic fatigue resistance of two pediatric rotary files made of different NiTi alloys. *Pediatric Dental Journal*, 29(1), 25-31. <https://doi.org/10.22514/jocpd.2024.109>
27. Ubaed, S., y Bakr, S. (2022). Cyclic fatigue resistance of nickel–titanium rotary instruments: AF F ONE vs 2Shape in curved canals. *Saudi Endodontic Journal*, 12(4), 187-192.
28. Versiani, M., Basrani, B., y Sousa-Neto, M. (2019). *The Root Canal Anatomy in Permanent Dentition*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73444-6>.
29. Xu, L., Zhang, J., Huang, Z., y Wang, X. (2022). Successful individualized endodontic treatment of severely curved root canals in a mandibular second molar. *World Journal of Clinical Cases*, 10, 4632-4639.