



Universidad
Nacional
de Córdoba



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE ODONTOLOGÍA

ESCUELA DE POSGRADO

**“ESTUDIO COMPARATIVO IN VITRO DE LA RESISTENCIA
FLEXURAL DE LOS SISTEMAS ROTATORIOS DE NÍQUEL-
TITANIO PROTAPER UNIVERSAL Y TWISTED FILES”**

TESISTA:

OD. RAÚL ALCÁNTARA DUFEU.

DIRECTOR:

PROF. DR. OMAR A. GANI

CÓRDOBA, 2018



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



**Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Odontología
Escuela de Posgrado**

Trabajo de Tesis para optar al Grado de Doctor en Odontología

**“ESTUDIO COMPARATIVO IN VITRO DE LA
RESISTENCIA FLEXURAL DE LOS SISTEMAS
ROTATORIOS DE NÍQUEL-TITANIO
PROTAPER UNIVERSAL Y TWISTED FILES”**

Od. Raúl Alcántara Dufeu

Director

Prof. Dr. OMAR A. GANI

Co-Director

Prof. Dr. Ing. CARLOS OLDANI

Córdoba, Argentina

- 2018-

-

DEDICATORIA

A mis padres,
quienes me dieron la vida y me forjaron como persona.

AGRADECIMIENTOS

Un proyecto como el presente no hubiese sido posible sin la colaboración de todos los que han contribuido en él:

A mi director de tesis, Profesor Dr. Omar Gani quien me estimuló y orientó de modo fundamental en las ideas básicas y complejas, en la estructura general de cada parte, en el estilo del trabajo y compartió sus acabados conocimientos de manera generosa y desinteresada.

A la Facultad de Odontología de la Universidad de Concepción, que me formó como profesional, me capacitó como académico, permite y apoya mi constante perfeccionamiento.

A la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Córdoba, que me brindó la posibilidad de continuar con mi formación científica y profesional.

A mi Co-director Profesor Dr. Carlos Oldani por su disposición, apoyo, orientaciones y precisas acotaciones al trabajo.

A los miembros de la Comisión de seguimiento de Tesis; Profesora Dra. Carmen Visvisián, Profesor Ing. Luis Fabietti y a la evaluadora externa Dra. Patricia Silveti, quienes con sus consejos y sugerencias constructivas influyeron de manera muy positiva en los contenidos del presente trabajo.

Al Profesor Licenciado Ing. Daniel Lescano por su valiosa, generosa y desinteresada guía y enseñanza, la cual hizo posible la mejor comprensión del tema.

A quienes laboran en el laboratorio de microscopía electrónica y análisis por rayos x (LAMARX) de la Facultad de Matemática, Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba; y en el Centro de espectroscopía y microscopía electrónica (CESMI) de la Vice-rectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Concepción; por sus importantes apoyos que hicieron posible el presente proyecto.

Al estadístico Luis Luengo y al Ing. Luis Croharé por sus constantes asesoramientos y dedicación en los estudios estadísticos.

A la Escuela de posgrado de la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Córdoba y a todo su personal.

Finalmente mi profundo agradecimiento y gratitud a todos aquellos que de un modo u otro contribuyeron para la concreción de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

a. RESUMEN	08
b. INTRODUCCIÓN	11
c. RESEÑA DE ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	14
d. OBJETIVOS	29
e. MATERIALES Y MÉTODOS	31
ESTUDIO 1:	
Análisis microscópico del sector activo en instrumentos sin uso.	35
ESTUDIO 2:	
Influencia del grado de la curvatura del conducto sobre la resistencia de los instrumentos a la fractura.	38
ESTUDIO 3:	
Análisis de la superficie de fractura de los instrumentos y áreas adyacentes.	42
f. RESULTADOS	43
ESTUDIO 1:	
Análisis microscópico del sector activo en instrumentos sin uso.	44
ESTUDIO 2:	
Influencia del grado de la curvatura del conducto sobre la resistencia de los instrumentos a la fractura.	57
ESTUDIO 3:	
Análisis de la superficie de fractura de los instrumentos y áreas adyacentes.	72
g. DISCUSIÓN	93
h. CONCLUSIONES	114
i. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

RESUMEN

Con el fin de mejorar la resistencia a la fatiga de las limas de uso endodóntico y disminuir su posible fractura, en los últimos años se introdujo, con ventajas y desventajas, el uso de limas de Níquel Titanio (NiTi). Debido a las innovaciones que estos instrumentos experimentan a través del tiempo, se propuso como objetivo fundamental del presente estudio evaluar comparativamente a través de distintos estudios, la resistencia a la fatiga cíclica de las Limas Protaper Universal (PTU - Dentsply Maillefer) y Twisted File (TF - SybronEndo, Orange, CA) de última generación. El primer estudio consistió en analizar mediante Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y en base a una clasificación *ad-hoc*, el sector activo de instrumentos sin uso, a los efectos de establecer fallas de fabricación. Las limas PTU poseen una estructura homogénea y como producto del maquinado, en ella se observan defectos tales como rebabas y melladuras y, sobre todo, líneas o estrías dirigidas desde el eje longitudinal a los filos. Por el contrario, en las limas TF la frecuencia de defectos fue mayor, más variada y evidente con un predominio de estrías o surcos que, asociadas a numerosos poros dispuestos en cadenas, recorren la longitud del área activa de la lima para terminar, en muchos casos, en los filos donde originan puntos de debilitamiento y aún microfisuras que en casos de estrés pueden ser el inicio de una fractura. En el segundo estudio, y mediante un modelo experimental dinámico que reproducía las condiciones clínicas en las que trabajan las limas, se evaluó el efecto de la curvatura del conducto sobre la resistencia de los instrumentos a la fractura. Se utilizaron conductos artificiales con curvaturas de 40° y 60° que permitían registrar el tiempo y número de ciclos hasta la fractura (NCF). La evaluación estadística (Test de Fisher) mostró que sólo la curvatura tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) en cuanto al NCF y que las limas TF ofrecían mayor resistencia a la fatiga cíclica que las PTU. En el tercer estudio se comenzó por analizar el área externa del instrumento vecina a la fractura, donde fue clara la presencia de microgrietas, siendo en la limas PTU más visibles y frecuentes que en las TF. El análisis fractográfico mostró que el comportamiento de la fractura no siempre es el mismo, ya que a veces se manifiesta como parcialmente dúctil y frágil con inicio en los filos donde existía un microgrietas o una inclusión, con una propagación clásica de la grieta, y en otras, como una fractura eminentemente frágil sin poder definir su inicio y propagación. En ella se detectaron facetas de clivaje y zonas planas y lisas, lo que indica que su inicio se debió a la tensión generada por el trabajo, o bien hubo una separación por deslizamiento de dos superficies sin dejar huellas del defecto. Bajo las condiciones de este estudio, se concluye que el problema de la fractura en instrumentos NiTi es un tanto complejo. El hecho de que los instrumentos PTU, fabricados por maquinado, sean más vulnerables que los TF, fabricados por torsión, habla de la influencia que el proceso de fabricación tiene sobre la fractura. Merecen mayor consideración la presencia y comportamiento de los poros en la aleación; las líneas de maquinado en la fabricación y la curvatura del conductos en la clínica.

In order to improve resistance to fatigue of the instruments and decrease its possible fracture, in recent years, the Nickel Titanium (Ni Ti) rotary instruments files has been introduced to endodontic practices. The purpose of this study was to evaluate comparatively through different studies, between the cyclic fatigue resistance of Protaper Universal Files (PTU- Dentsply Maillefer) y Twisted File (TF- Sybron Endo, Orange, CA) instruments. The first study was assess morphological alterations of active sector of PTU y TF rotary files before use under scanning electron microscopy (SEM) and based on an ad-hoc classification. The PTU files showed a homogeneous structure, with machining marks, such as burrs and nicks, especially lines or stretch marks that run from the longitudinal axis to the edges. In contrast, the TF files showed the frequency of defects was abundant, varied and evident with predominance of lines or grain that, associated with many pores in chains, along the length of the file. To finish, in many cases, with weaknesses and microcrack on the cutting edge. In some cases, initiation of failure occurs if the areas with highest stress. In the second study was assess a dynamic experimental model that reproduced the clinical conditions and the effect canal curvature on the resistance of the instruments to the fracture. Artificial canal with angles of curvature of 40 and 60 degrees, were used to determined time to fracture and multiplying with rpm was calculated the number of cycles to failure (NCF). Fisher Test indicated that only the curvature had a significant difference ($P < 0.05$) in terms of NCF and that TF files showed the highest cyclic fatigue resistance than the PTU. The third study assess the external area of the instrument near the fracture site, were found a microcrack that in the PTU files more visible and frequent than in TF. The fractographic study is used to determine the modes to failure. The behavior of the fracture is not the same, sometimes appeared to be a partially ductile and brittle character with the existence crack initiation on cutting edges; with microcrack or microvoid: which is capable of propagating to cause final failure. Others cases, typically characterized brittle fracture were unable to define initiation and propagation. It detected presence of cleavage facets and flat and smooth fractured faces, indicating that its origin was due to the tension generated during motion instruments, or there was a separation by sliding of two surfaces without leaving traces of the defect. Under the study conditions, it can be concluded that the failure NiTi instrument is critical. PTU was manufactured with a grinding process showed more vulnerable to cyclic fatigue than TF files that were manufactured with a twisting method in fact the manufacturing process might contribute the mechanical behavior and hence the tendency of the instrument to fracture. The presence and behavior of pores in the alloy; the machining grooves in the fabrication and effect of canal curvature are fundamental importance to failure analysis.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento endodóntico tiene como fin primordial evitar la extracción de piezas dentarias afectadas, tanto por lesiones irreversibles de la pulpa dental, como por procesos destructivos que la hayan debilitado.

La preparación biomecánica de los conductos radiculares constituye una de las etapas fundamentales de dicho tratamiento, no sólo porque mediante el empleo de instrumentos específicamente diseñados se procura la conformación del o de los conductos principales de cada raíz, sino también, porque junto con la irrigación y su acción antiséptica, se busca alcanzar un alto nivel de limpieza y desinfección en ellos y en todo el sistema de ramificaciones, para, finalmente, concluir con un adecuado sellado del espacio creado a fin de prevenir su reinfección¹.

Para alcanzar esta meta se han utilizado, a través del tiempo, instrumentos de acero de muy variados diseños, de los cuales, en la actualidad, la mayoría ha quedado en desuso.

Muchos de los errores cometidos durante la instrumentación de los conductos radiculares, en especial si son curvos, se deben a la limitada flexibilidad que muestran los instrumentos de acero inoxidable¹. En efecto, como una propiedad inherente a la aleación, estos instrumentos poseen un cierto grado de rigidez que aumenta gradualmente en la medida que se acrecienta el calibre del instrumento.

Por otra parte, en la preparación de un conducto curvo, las fuerzas de recuperación o memoria de forma que el metal mantiene, hace que el instrumento, forzado a adaptarse a un trayecto curvo, tienda a recuperar su posición inicial que era recta y termine por modificar su anatomía.

Para salvar este inconveniente, antes de ser introducidos en conductos curvos, los instrumentos de acero debían ser pre-curvados, lo que les restaba efectividad y resistencia, ya que esta deformación limitaba o impedía sus movimientos de rotación¹.

Con el fin de ofrecer mayor efectividad y rapidez en el trabajo, en la década del '70 surgieron los primeros sistemas de pieza de mano automatizados, que utilizaban limas de acero inoxidable accionadas mediante un micromotor que funcionaba a presión de aire, lo que causaba una serie de efectos adversos. Respetando las reglas de la estandarización, los fabricantes siguieron en su intento de solucionar tales inconvenientes, pero aún así, la sobrevivencia de estos sistemas fue breve debido a las frecuentes dificultades, perjuicios y accidentes que ocasionaban. La pérdida de sensación táctil, junto con la rigidez y agresividad de los instrumentos, no sólo producía una excesiva rectificación y deformación en el conducto curvo, sino también, sobre-instrumentación, dilatación y traslación del foramen, y a menudo, la fractura del instrumento.

Viendo que el problema radicaba en las propiedades del metal con el que se fabricaban los instrumentos y no en su forma, los fabricantes pusieron su punto de mira en la aleación níquel-titanio (NiTi) de reciente implementación, ya que se caracterizaba por su elevada flexibilidad, lo que ofrecía múltiples ventajas. Fue así que apareció en el mercado una nueva generación de limas endodónticas, como así también, nuevos sistemas rotatorios que anticipaban un promisorio futuro en las prácticas endodónticas.

La incorporación de un nuevo material en la fabricación de instrumentos endodónticos fue motivo de nuevas investigaciones, de nuevos diseños en los instrumentos y de una permanente renovación en los sistemas rotatorios.

En su intento de solucionar viejos inconvenientes, los instrumentos sufrieron diversas variantes: Se idearon nuevos métodos de fabricación y se modificó la conicidad y también algunas de sus dimensiones; se introdujeron cambios en la forma de su sección transversal y en consecuencia, en el número de espiras, en el ángulo de sus filos y en el diseño de la punta². Sin embargo, y aún cuando las mejoras han sido muy notorias, todavía persiste el temido e inesperado momento de la fractura del instrumento, problema que en la actualidad preocupa a fabricantes e investigadores.

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En 1988, Walia y col.³ introdujeron en las prácticas endodónticas las limas manuales de aleación níquel-titanio (NiTi), puesto que demostraban poseer, respecto a las de acero inoxidable, mayor flexibilidad, elasticidad y resistencia a la fractura torsional, lo que permitía abordar las curvaturas radiculares con mayor facilidad y seguridad³.

La introducción en las prácticas clínicas de los sistemas rotatorios y la incorporación de la aleación NiTi en la fabricación de los instrumentos, representó una verdadera revolución en las técnicas endodónticas, ya que al disminuir el tiempo requerido para efectuar la preparación biomecánica y conseguir una buena conformación de los conductos radiculares, permitió al clínico efectuar con mayor eficiencia el tratamiento de los conductos radiculares^{4, 5}.

Hasta el año 2008, tanto las características microestructurales de la aleación NiTi que los industriales utilizaban en la fabricación de las limas, como la distribución porcentual de sus primeros componentes eran aún desconocidas, ya que fueron Bonaccorso y col.⁶; y Braga y col.⁷, quienes comprobaron que la mayoría de los instrumentos de aleación NiTi de uso endodóntico -cualquiera fuera la marca-, tenían como compuestos principales el níquel ($\approx 54.3\%$) y el titanio ($\approx 45.2\%$), y que las diferencias en sus componentes no eran estadísticamente significativas. Conocidas las propiedades de dicha aleación, los autores citados consideran que las diferencias en el comportamiento y efectividad que existe entre los distintos instrumentos rotatorios de NiTi, no recaen en el metal, sino en las características de su diseño geométrico (sección transversal, ángulo helicoidal, número de filos, ángulo de corte, etc.), ya que la aleación pareciera ser siempre la misma.

A diferencia de lo que ocurre con los instrumentos de acero inoxidable, los de aleación NiTi, sean de uso manual o mecanizado, no modifican mayormente la morfología del conducto radicular, aún cuando estos sean muy curvos¹. Es evidente que su efecto deformante es significativamente menor que en los de acero, por lo menos cuando en el sector apical se los utiliza hasta un calibre #30^{6,8}.

En el sector cortante de los instrumentos de NiTi de la **primera generación** se labraban tres ranuras longitudinales, equiespaciadas, en torno al eje axial de un alambre cónico de modo tal que en su sección transversal el contorno se presentaba circular con tres canales en forma de **U** (Fig. 1-a). Este primer diseño dotaba al instrumento de tres bordes de corte planos (bordes de ataque neutro), lo que evitaba que los filos se clavaran en la pared dentinaria mientras producía el corte de tejido a través de una acción de aplanado⁹, motivo por el cual, su empleo en la clínica requería del uso de un considerable

número de limas para lograr la preparación deseada. No obstante, en la actualidad, con otros diseños, varios sistemas lo siguen utilizando¹.

Posteriormente, y con el fin de disminuir los problemas que en la práctica ocasionaban las limas de **primera generación**, se comenzaron a fabricar las de **segunda generación** que se caracterizaron por tener bordes de corte con filos o activos (Fig. 1-b), lo que permitió que el instrumento fuera más efectivo en el corte y que se requiriera un menor número de instrumentos en la preparación del conducto.

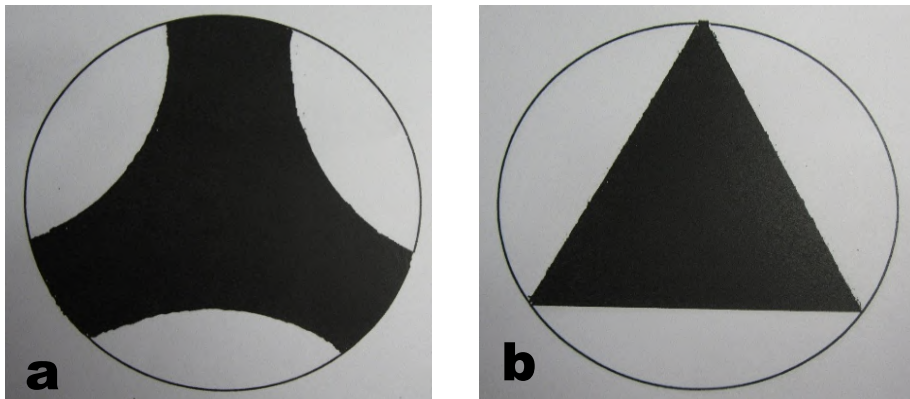


Fig. 1-a.- Representación esquemática de la sección transversal de un instrumento de la primera generación (bordes de cortes planos o neutros) y 1-b.- de un instrumento de segunda generación (bordes de cortes afilados o activos).

Las mejoras introducidas en la metalurgia de la aleación de NiTi se convirtieron en el sello distintivo de la que puede ser identificada como la **tercera generación** de limas. El nuevo procedimiento aplicado consistía en someter a los instrumentos a un tratamiento térmico que pareciera ser fundamental, ya que afecta el ajuste de la temperatura de transición de la aleación de NiTi y la resistencia de las limas a la fatiga y a la corrosión^{1,9}.

A temperaturas ambiente y corporal, las limas de NiTi convencionales (**1ª y 2ª generación**) tienen una estructura cristalina que se denomina austenita. Si a estas limas se le aplica una fuerza de rotación -es decir cuando trabajan y cortan dentina en el conducto-, la microestructura cambia a una fase que se denomina martensita, cuyas propiedades físicas son distintas a las de la austenita, ya que la aleación se torna más flexible aunque menos resistente (Fig. 2).

La fase martensítica de la aleación de NiTi es una fase de baja temperatura, con estructura monoclinica, que posee un módulo elástico relativamente bajo (20 a 50 GPa) y un límite elástico también bajo (138 MPa) frente a la austenita (40 a 90 GPa y 379 MPa, respectivamente). Esto indica que la martensita es fácilmente deformable con bajas tensiones aplicadas, mientras que la austenita presenta un límite elástico mucho más

alto. Además de ser más flexible que la austenita, la martensita tiene la ventaja de reducir el riesgo de fractura bajo la aplicación de altas tensiones debido a que puede ser deformada plásticamente en vez de romper. Por lo tanto, se ha hecho mucho esfuerzo para introducir la martensita en los instrumentos endodónticos comerciales de NiTi¹⁰.

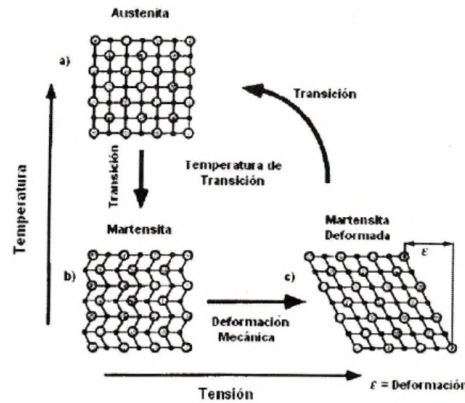


Fig. 2.- Esquema del cambio de distribución espacial de los átomos de Ni y Ti en las fases austenita y martensita.⁴

Las limas de NiTi de la tercera generación con tratamiento térmico poseen una microestructura que es mezcla de austenita y martensita¹. Se han estudiado las propiedades metalúrgicas de la aleación NiTi, y tanto su marcada elasticidad como su manifiesta memoria para recuperar su forma después de la deformación, son las características que la distinguen. Sin embargo, la aleación es susceptible a ser afectada por fatiga cíclica si se somete a repetidas condiciones de tensión, y la aplicación de tensiones cíclicas provoca una transformación de fase que mantiene estable la fase martensítica. La elasticidad de esta aleación se debe a la presencia de martensita¹¹.

Pareciera que la presencia de la fase martensítica de la aleación, según Kunt y Jordan¹¹, podría ser la responsable de la iniciación y propagación de la fractura por fatiga. A veces la transformación directa de austenita a martensita incluye una estructura intermedia llamada Fase R, que muestra propiedades similares a la austenita. Finalmente, el calentamiento del material transforma la martensita y regresa a su fase austenita¹¹.

Los sistemas rotatorios de NiTi ofrecen taper (conicidad) y diámetros mayores que los de acero inoxidable en toda su longitud. En efecto, el taper o conicidad del instrumento expresa el incremento del diámetro a lo largo de su parte activa. En instrumentos estandarizados bajo la norma ISO, el taper es de 0,02; lo que significa que por cada milímetro el incremento del diámetro es de 0,02 mm. En cambio, los instrumentos rotatorios de NiTi poseen un taper mayor que el propuesto por las normas ISO, llegando a valores que fluctúan entre los 0,03 mm y 0,12 mm. Esta configuración

permite que el instrumento elimine la constricción dentinaria cervical y que las limas de menor conicidad penetren luego sin interferencias y sin riesgos hacia el sector apical del conducto, puesto que su punta que era activa, ya no lo es y con ello se evita que se desvíe del trayecto original del conducto radicular y provoque un escalón o una perforación¹. La conformación obtenida a través de esta técnica denominada Crown-Down, permite una irrigación endodóntica más eficaz y una mejor condensación de la obturación radicular¹⁰.

Otro aspecto considerado en el diseño de los instrumentos es el ángulo helicoidal (Fig. 3), que es aquel que se forma entre el borde de las estrías y una línea transversal perpendicular al eje longitudinal del instrumento y en los rotatorios es de aproximadamente de 35°. Si supera los 45°, mayor es el riesgo de que el instrumento se atasque en las paredes dentinarias y que se produzca su fractura^{1,9}. La sección transversal de algunos de ellos no es homogénea en toda su longitud, lo que permite su acomodación en el conducto radicular y una mejor distribución de las fuerzas, hecho que sin duda también reduce el riesgo de fractura¹⁰.



Fig. 3.- Trazado del ángulo helicoidal en un instrumento.

El ángulo de corte o ángulo de incidencia de la hoja de corte en instrumentos de segunda generación está graficado en la figura 4. Los instrumentos con bordes de corte plano, como ya se dijo, raspan y aplanan la dentina, lo que los hacen más seguros, pero menos efectivos, inconveniente, este último, que en la actualidad se compensa mediante el aumento de velocidad en la rotación. Los que poseen bordes de corte con filos o bordes activos, arañan y cortan dentina, y si bien pueden clavarse en la pared del conducto, son más efectivos para eliminar dentina¹⁰.

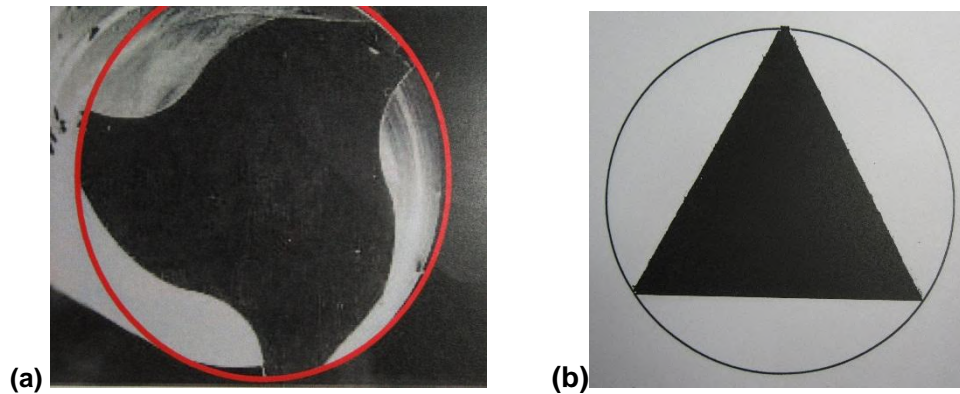


Fig. 4.- Representación esquemática de la sección transversal al eje longitudinal de dos instrumentos de segunda generación, uno (a) con bordes de corte planos o neutros y otro (b) con bordes de corte activo.

Sin embargo, y pese a todas estas innovaciones el problema que estos instrumentos aún mantienen es el riesgo de fractura, ya que para Tzanetakis y col.¹³ la frecuencia de rotura es del 0,55% para los instrumentos de acero inoxidable y del 1,33% para los rotatorios de NiTi, mientras que para otros investigadores, la frecuencia varía entre el 2% y el 6%^{10,12,13}, respectivamente, hecho que sin duda sigue siendo preocupante dado el pronóstico. La capacidad de una lima para soportar el estrés de corte depende, a su vez, de sus diámetros. Si sus dimensiones son pequeñas, menor será el área de metal en su sección transversal, y por lo tanto, tendrá menor resistencia a la carga torsional que la de una lima de mayor grosor¹⁴.

A los efectos de mejorar las propiedades de la aleación y el funcionamiento de los instrumentos, en las últimas generaciones de estos sistemas, incluido el Twisted File, se introdujeron nuevos tratamientos superficiales a base de electropulido (tratamientos electroquímicos), que se basan en procedimientos que disminuyen los defectos del instrumento en la cubierta de su superficie. Esto involucra la remoción de una delgada capa de su superficie mediante la inmersión del material en una solución altamente iónica donde circula una corriente eléctrica. Este proceso daría al instrumento mayor lisura, puesto que remueve de su superficie fisuras o hendiduras que afectarían la resistencia a la fatiga por flexión y/o torsión. Otros procedimientos permitirían la aplicación de recubrimientos por deposición física en fase vapor (PVD), que le daría al instrumento mayor dureza y resistencia al desgaste, como así también, mayor eficiencia al corte, resistencia a la corrosión y a los procedimientos de esterilización¹⁵.

El electropulido podría tener relación con la resistencia a la fractura. Los estudios de Anderson y col.⁸; Bui y col.¹⁶, establecen que este tipo de tratamiento reduciría la fatiga cíclica y aumentaría su vida útil. Esto se debería a la disminución de las irregularidades de la superficie que actuarían como puntos de concentración de estrés e iniciación y propagación de grietas o fisuras (cracks), sin que afecte la eficiencia de corte.

Sin embargo, Cheung y col.¹⁷ sostienen que si bien el electropulido suaviza las superficies del instrumento, no afecta la resistencia a la fatiga cíclica. Schäfer y col.¹⁸, consideran que dicho tratamiento no aporta beneficios significativos y que la diferencia entre instrumentos está dada principalmente por su diseño (forma de la sección transversal, ángulo helicoidal, número de hojas o filos, ángulo y condición de corte).

En cuanto a la corrosión, que se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico de su entorno, el electropulido también tendría un efecto beneficioso. Bonaccorso y col.⁶, demostraron que los instrumentos con tratamientos de superficies presentaban mayor resistencia a la corrosión provocada por las soluciones de irrigación, en comparación con los que no lo tenían.

No obstante, está demostrado que las principales causas que conducen al fracaso del instrumento rotatorio NiTi sigue siendo la fatiga por flexión y torsión provocadas por sobrecarga, puesto que conducen a la rotura de los instrumentos, fundamentalmente en función del método de fabricación, de la curvatura del conducto radicular, y de la geometría del instrumento^{19,20}. La prolongada rotación de un instrumento en conductos radiculares curvos, generan compresión y tensión cíclica, las cuales, a su vez, producen la fatiga del metal²¹. Por otra parte, en estudios efectuados mediante microscopía electrónica de barrido, la mayoría de los instrumentos fracturados presentaban un incremento en la frecuencia de grietas, hendiduras, deformaciones y cracks, defectos que sin duda favorecen la concentración de estrés y la propagación de la fractura²²⁻²³.

Según la Sociedad Americana para Prueba de Materiales (ASTM), *“la fatiga es un proceso de cambios estructurales localizados, permanentes y progresivos que ocurren en un material sometido a condiciones que producen estrés y tensión fluctuante en algún o algunos puntos y que podría culminar en la aparición, ya sea de grietas (cracks) o de una fractura completa después de un número suficiente de fluctuaciones”*²⁴.

Se sabe que un metal sujeto a tensiones repetitivas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura en una sola aplicación de carga. Son necesarias tres condiciones principales para que se produzca una rotura por fatiga. Estas son: 1) una tensión máxima de tracción de valor elevado; 2) una variación o fluctuación suficientemente intensa de la tensión aplicada y 3) un número suficiente de ciclos. Además hay una gran cantidad de otras variables que tienden a modificar las condiciones para la fatiga²⁴.

El proceso de rotura por fatiga, de forma general, consiste en la aparición de microgrietas con crecimiento lento (por cada ciclo de carga) hasta que se alcanza un tamaño crítico de grieta de propagación rápida. Debido a la aplicación repetitiva de

cargas, la fisura crece lentamente. Llega un momento en que ella es tan grande que la pieza no puede resistir la carga y se produce una rotura súbita. Los defectos superficiales y próximos a la superficie tienen mucha importancia como concentradores de tensión y su presencia afecta de forma crítica a la resistencia a la fatiga de las piezas mecánicas²⁵.

Es necesario, en este caso, tener claro y diferenciar los siguientes conceptos: **fatiga cíclica flexural** y **fatiga torsional** que puede ser **estática** o **dinámica**.

La primera, la **fatiga cíclica flexural** ocurre cuando un instrumento es sometido a ciclos repetitivos de compresión y tensión en el mismo punto. Esto ocurre cuando el instrumento rota dentro de un conducto curvo (flexión del instrumento). Durante el movimiento de rotación, la parte externa del metal (lado convexo) es sometido a tracción y la parte interna (lado cóncavo), sufre compresión²⁶.

La resistencia a la fatiga cíclica de un instrumento es normalmente testada contando el número de rotaciones o ciclos del instrumento en un conducto artificial hasta la fractura^{27,28}.

La **fatiga torsional estática** ocurre cuando un sector de la lima se atasca en un segmento del conducto y el libre sigue rotando. La **fatiga torsional dinámica** resulta de las fuerzas de fricción causadas por la resistencia de la dentina al corte de la lima²⁹.

La **fatiga torsional** es fácilmente detectable en los instrumentos de acero inoxidable por el estiramiento del instrumento o desenrollado de las espiras, en cambio, los instrumentos NiTi pueden no presentar evidencia de deformación inminente, produciéndose la fractura sin previa señal debido a la fatiga cíclica o al estrés torsional o combinación de ambos³⁰. La fatiga cíclica es la causa primaria de fractura de las limas y entre el 50 y 90% de los casos ocurre por fallas mecánicas²⁶.

Otro de los factores determinantes en la fractura de los instrumentos NiTi se encuentran en la anatomía del conducto radicular, en particular cuando es curvo y el ángulo y radio de sus curvaturas es reducido, ya que este último es el que más influye sobre las posibilidades de fractura, puesto que a menor radio, mayor es el riesgo^{31,32}.

Respecto a la relación que guarda la configuración del instrumento con la fatiga cíclica, diversos estudios postulan que tanto su diseño transversal como el diámetro y el taper contribuirían a su vulnerabilidad^{29,31-33}.

Como consecuencia del ya mencionado taper o conicidad, sólo una porción de la parte activa del instrumento entra en contacto con la pared del conducto radicular donde actúa, la cual, por razones obvias, generalmente es la parte inicial del conducto, consiguiéndose así un desgaste selectivo y por lo tanto más efectivo con menos riesgo

de fractura¹⁰. Schrader y col.³⁴ mencionan, además, otros factores a tener en cuenta para evitar la posible fractura de los instrumentos NiTi mientras trabaja en el conducto de un diente, y ponen como ejemplo la técnica o secuencia aplicada durante la instrumentación, que consiste en utilizar distintos taper antes de pasar a un instrumento de calibre mayor. Esto reduciría la fatiga cíclica y por lo tanto los riesgos de fractura.

Incidiría también la adecuada velocidad de operación, aunque Kitchens y Liewehr³⁵ señalan que la fatiga cíclica no tiene relación con la velocidad operatoria. Li y col.³⁶ sugieren que el movimiento “en picoteo” utilizado en la instrumentación influiría de manera significativa en la fatiga cíclica del instrumento, ya que una mayor amplitud en el movimiento de introducción y extracción del instrumento en el conducto prolonga el tiempo de la fractura, puesto que incorpora amplitud al intervalo de tiempo que transcurre hasta que el instrumento vuelva a ser sometido al área de estrés que encuentra en la curvatura, lo que también disminuye la fatiga cíclica.

Para mejorar la resistencia a la fatiga cíclica de las limas, como también las de otras propiedades (superelasticidad, resistencia a la fractura, mantenimiento del centrado original del conducto minimizando así su transporte), los fabricantes, mediante los aportes que brinda la tecnología, tratan, permanentemente, de mejorar las propiedades físicas de los instrumentos^{7,14,37,38}.

El torque aplicado en la instrumentación también constituiría un factor importante en la fractura del instrumento ya que a menor torque, menor fatiga cíclica de los instrumentos rotatorios³⁹. Si se utiliza un torque elevado que sobrepasa el límite de elasticidad, la probabilidad de que ocurra un accidente operatorio es elevada. Sin embargo, la fractura puede ocurrir también por debajo de dicho límite. Para solucionar este inconveniente se debe utilizar motores en los que el torque pueda ser ajustado por debajo del límite de elasticidad inherente a cada instrumento y técnica (entre 0.1Ncm y 10Ncm)¹⁰. Por último, es necesario dominar la técnica rotatoria para preparar conductos, dominio que se adquiere mediante el aprendizaje y la práctica, de ahí que la experiencia del operador también se describa como un factor que influye en la incidencia de fractura de los instrumentos NiTi⁴⁰.

A través del tiempo han aparecido numerosos sistemas rotatorios NiTi que aportaron distintos beneficios al operador, aún con sus ventajas y desventajas. Son dos los sistemas que resultan de interés para ser estudiados: El sistema Protaper Universal® por ser el más difundido y el Twisted File™ por las innovaciones que en muchos aspectos aporta.

Las propiedades torsionales y de flexión de los instrumentos endodónticos están influenciadas, tal como se dijo, por múltiples factores, y entre ellos, cuenta -quizás como uno de los más importantes- el proceso de fabricación, ya que puede ser por maquinado, hasta ahora el más utilizado, aún cuando se le atribuye la posibilidad de debilitar el metal y de producir microgrietas (microcraks) que luego actuarán como potenciales inicios de fracturas cuando el instrumento trabaje, o bien por torsión o enroscamiento sobre su eje longitudinal al que se lo considera como un procedimiento innovador, puesto que se le adjudican más propiedades y beneficios que al anterior⁴¹. Por otra parte, el método de fabricación, en este caso, juega un papel muy importante, ya que uno de los sistemas analizados, el Protaper Universal®, es por maquinado y el otro, el Twisted File™, por torsión⁴², calificados como tradicional o clásico el primero y como renovador o de avanzada el segundo.

El sistema Protaper Universal® (PTU) (Dentsply, Maillefer, Ballaigues, Suiza) se introdujo en el mercado en la década del 90 y quizás sea el más utilizado. Las limas rotatorias PTU, según Thompson y col.⁴, se fabrican mediante el proceso de tallado o maquinado que requiere pasar por etapas tales como trituración, presión uniforme mediante rodillos, trefilado, recocido, elaboración de su sección transversal, limpieza y acondicionamiento de la superficie.

Los instrumentos ofrecidos por este sistema presentan sección transversal triangular convexa de aristas ligeramente redondeadas. Como innovación en el momento de su aparición en el mercado, los instrumentos poseían conicidades múltiples y progresivas en el mismo instrumento. Los instrumentos convencionales manuales en el punto D1 de la parte activa (punta del instrumento), la conicidad es de 0,02mm/mm, pero cada 2mm, hasta alcanzar el punto D16 (inicio de la parte activa), la conicidad aumentaba de 0,02 mm/mm. Fig. 5.

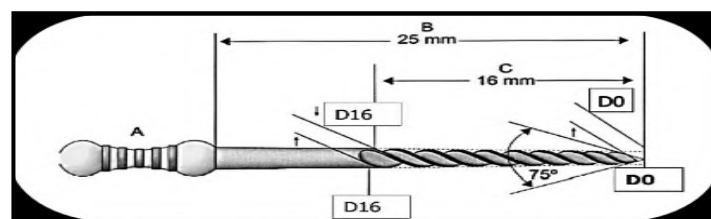


Fig. 5.- Esquema de un instrumento manual convencional de acero inoxidable.

Esta reducida conicidad en la porción inicial del instrumento, junto a otras características del diseño, le confieren buena flexibilidad, mayor efectividad y permitirían una instrumentación apical más sencilla aún en curvaturas¹.

Según el fabricante los instrumentos del sistema Protaper se dividen en 2 grupos de tres limas cada uno: Shaping y Finisher o también llamados limas de conformación y limas de acabado.

Las primeras o limas “**S**” poseen conicidad variada, progresiva y distintos diámetros en su punta (**Sx**: 0,19mm; **S1**: 0,17mm y **S2**: de 0,20mm). Son de conformación (shaping files) y diseñadas para la preparación del tercio cervical y medio. Las segundas o limas “**F**” (finishing files) están diseñadas para la preparación del extremo del conducto y crear un *stop* apical. Tienen en el punto D1 diámetros crecientes (**F1**: 0,20mm; **F2**: 0,25mm y **F3**: 0,30mm). Cabe destacar, además, que la conicidad varía dentro de un mismo instrumento con aumentos progresivos que van del 3.5 % al 19%, lo que hace posible la conformación en zonas determinadas del conducto con un sólo instrumento y que éste haga su propio *crown-down* o escalonamiento corono apical^{43,44}.

Para evitar accidentes tales como deformaciones, escalones o perforaciones, la punta de estos instrumentos es redondeada y por lo tanto inactiva. Poseen una sección transversal triangular con bordes ligeramente convexos. Este diseño permite, por un lado, reducir el área de contacto de la lima con las paredes del conducto, lo que se traduce en una mayor eficacia en la acción de corte, y por otro, reducir la fatiga torsional, así como la presión necesaria para ampliar el conducto, con lo que se reduce el riesgo de fractura torsional⁴⁵.

Otras particularidades de este sistema están dadas por el variado ángulo helicoidal de la lima y la separación de los filos que aumenta a medida que se avanza hacia el mango del instrumento, lo que optimiza la acción de corte y la remoción de detritos, a la vez que disminuye el efecto de “atornillamiento” del instrumento dentro del conducto. En la punta los filos se asemejan a las ya clásicas limas tipo K y hacia el mango se parecen a los un tanto desaparecidos ensanchadores o escariadores^{43,44}.

El tiempo de trabajo requerido por el sistema PTU es significativamente menor comparado con otros sistemas⁴⁶ y la vida útil de sus instrumentos depende del tipo de trabajo que realicen y de la anatomía del conducto radicular⁴⁷.

El Sistema Twisted Files® (TF) (SybronEndo, Orange, CA, USA) fue creado con el fin de eliminar algunas de las desventajas observadas en los sistemas hasta entonces fabricados. Se propuso que estas limas podrían tener una mayor resistencia a la fractura y crear una preparación centrada del conducto radicular.

Autores como Ha y col.⁴⁸ y Sharma y col.⁹ sostienen que su resistencia a la fractura y su eficiencia en el corte son de 3 a 4 veces mayores que la de otros instrumentos rotatorios NiTi disponibles en este momento. Con otra mirada, Gambarini y col.¹⁵, Larsen

y col.⁴⁹, Yamazaki-Arasaki y col.⁵⁰ analizaron la fatiga cíclica de sus instrumentos y concluyen que los nuevos procedimientos que se aplican en su manufactura, parecen otorgarles mayor resistencia.

Las limas TF se fabrican a partir de un alambre de NiTi que es calentado, enfriado y torsionado⁹, por lo que se obtiene un instrumento de una sola pieza que no está sujeto a las limitaciones del maquinado y que recibe, además, un tratamiento de electro-pulido y de desoxidación. Este proceso sería el responsable de sus mejores propiedades mecánicas y físicas que luego se traducen en una mayor resistencia a la fractura, un mejor control táctil y una mejor capacidad de corte sobre los diseños existentes^{15,49,51}. Experimenta también un incremento en la resistencia a la fatiga cíclica, ya que pueden soportar más torque que las fabricadas por el método convencional de maquinado^{52,53}.

Entre las innovaciones introducidas en la fabricación de las limas TF se destaca la disposición de sus cuchillas de corte no radial y ángulo positivo (sentido horario)^{9,54}. En su punta tienen calibres que van desde 0,25 mm al 0,40 mm y 5 conicidades: 0,12; 0,10; 0,08; 0,06 y 0,04 mm. Cuentan con una codificación de dos anillos coloreados, uno indica el calibre en la punta y el otro el taper: lila 0.12; rosado 0.10; azul 0,08; naranja 0,06; verde 0,04. La distancia entre las estrías de corte varía de acuerdo a la conicidad o taper.

Un aspecto a destacar en el procedimientos de fabricación propio del sistema TF lo constituye la aplicación de los distintos tratamientos de avanzada ya mencionados que se practican con el fin de optimizar la microestructura y las propiedades del níquel titanio, ya que refuerzan la dureza del metal y conservan la integridad de sus filos o bordes cortantes, y sobre todo, aumentan su flexibilidad, ya que según pruebas experimentales sería de hasta un 70% superior que la de los instrumentos NiTi tradicionales^{15,49,51}. Según la opinión de los autores antes citados, estas características proveen a las limas TF resistencia a la fractura y otras propiedades muy especiales para la preparación de los conductos que antes no poseían.

Una de las formas de evaluar el tiempo de fractura, es considerando la velocidad y el número de rotaciones por minuto. Al-Hadlaq⁵⁵ comparó instrumentos rotatorios NiTi Twisted Files (TF) y Profile (PF) y el tiempo medio de fractura bajo el test de fatiga cíclica flexural fue medido en segundos. Las limas rotaron a una velocidad constante de 300 rpm con un torque controlado por motor eléctrico. El tiempo registrado fue de 235±68s para TF 25/0.04, 188±75s para TF 25/0.06; y de 108±102s para PF 25/0.04 y 156±17s para PF 25/0.06. La diferencia entre el tiempo hasta que se produce la fractura, entre ambas limas no fue significativa.

También Kim y col.⁵⁶, en 2010, evaluaron comparativamente el tiempo de fractura

en limas que pertenecían a los sistemas Twisted File, RaCe, Helix y Protaper y lo establecieron calculando el número de revoluciones por minuto (rpm) para cada instrumento. Los resultados mostraron que el número de rpm registradas hasta que se produjo la fractura en las limas TF fue significativamente mayor que en los instrumentos de otros sistemas.

Según el fabricante, los mayores beneficios que ofrece el sistema TF respecto a otras marcas comerciales, son su resistencia a la fractura y eficiencia en el corte, lo que en teoría serían 3 a 4 veces mayor que las de otros instrumentos rotatorios de NiTi disponibles en este momento. Sin embargo, los beneficios en este aspecto no han sido suficientemente analizados⁴⁸.

El procedimiento más adecuado para evaluar las causas por las cuales el instrumento se ha fracturado es mediante el estudio de la superficie que la fractura transversal deja cuando ocurre el accidente, puesto que permite determinar, en cada caso, el tipo o modo aparente de fractura y su posible mecanismo.

En un estudio fractográfico, Cho y col.²¹, observaron que la superficie de fractura mostraba una combinación de estriaciones y falla dúctil, a la vez que señalaban a la fatiga cíclica como una importante causa de fractura. Para estos autores, la superficie muestra cracks de iniciación, región de propagación de la grieta y zona de sobrecarga por fractura rápida. También Elnaghy y col.⁵², expresan, con ciertas coincidencias, que la sección transversal de la fractura de las limas TF y PTU revelan fallas fractográficas similares, en las que se observan grietas de iniciación en los bordes cortantes de la sección transversal de la fractura, como así también zonas de fatiga y zonas de sobrecarga, y en ellas áreas de cavidades.

Kim y col.⁵⁶, señalan que en el análisis de superficie de fractura es donde se manifiestan las microgrietas, sobre todo a nivel de los bordes cortantes, y que al inicio aparecía cerca de los bordes cortantes y que su propagación parece estar situada en medio de una gran densidad de defectos microscópicos superficiales.

En su estudio Alapati y col.²², observaron la superficie de fractura en instrumentos del sistema PTU con alta magnificación (X2500), evidenciando la presencia de cavidades, a los que consideraron como una clara característica de fractura dúctil. Con forma circular alargada, los dimples surgen a partir de partículas de segunda fase en la microestructura y estas cavidades crecen durante el proceso de fractura. Agregan a su vez, que los dimples observados sobre la superficie de fractura de instrumentos NiTi que fallaron, fueron invariablemente mucho menos profundos que los observados en instrumentos de acero inoxidable. Concluyen que el aspecto que ofrece la superficie de fractura en estos

instrumentos sugiere fractura dúctil, al que consideran como un modo de fractura deseable, ya que la fractura frágil tiene lugar abruptamente sin deformación permanente significativa y por tanto, no anticipa el peligro de una inminente fractura. López y col.³¹, al examen con MEB, también observan que en la superficie de fractura de las limas PTU presentaban características morfológicas de fractura dúctil, con presencia de dimples de variadas formas y longitudes.

Las características morfológicas muestran dos tipos de patrones; uno por **fractura torsional** caracterizada por presentar una abrasión circular y hoyuelos cerca del centro de rotación de la superficie de fractura. El otro es por **fatiga cíclica**, que consiste en un proceso de propagación incremental de la grieta impulsado por ciclos de estrés. El inicio de la grieta se produce en uno o más bordes cortantes de la sección transversal fracturada y la propagación de la grieta se determina por características dúctiles, presentando numerosas cavidades en toda la superficie de fractura y estrías y, a su vez, una lenta velocidad de propagación de la grieta^{19,27,31,52,56-57}.

El procedimiento más adecuado para evaluar las causas por las cuales el instrumento se ha fracturado es mediante el estudio de la superficie de fractura que consiste en analizar la superficie de fractura de ambos sistemas (**PTU y TF**) de manera longitudinal y transversal con un microscopio electrónico de barrido (**MEB**) y determinar el tipo o modo aparente de fractura y su posible mecanismo para cada caso. Cho y col.²¹, observaron en su estudio que fractográficamente la superficie de fractura muestra una combinación de estriaciones y falla dúctil, señalando a la fatiga cíclica como una importante causa de fractura. En general, las superficies incluyen crack de iniciación, región de propagación de la grieta y zona de sobrecarga de fractura rápida. Muy similar a lo observado por Elnaghy y col.⁵², donde la sección transversal de la superficie de fractura de las limas TF y PTU revelan fallas fractográficas similares, incluyendo crack de origen, zona de fatiga y zona de sobrecarga de fractura rápida, revelando crack de iniciación en los bordes cortantes de la sección transversal de la fractura, con un área de dimples sobre esta superficie. Kim y col.⁵⁶, mencionan que en la superficie de fractura donde se presentaron aumento de microcrack, fue sobre los bordes cortantes. El crack de iniciación se encontró cerca de los bordes cortantes y su propagación parece estar situada en medio de una gran densidad de tipos de defectos microscópicos. En su estudio Alapati y col.²², observaron la superficie de fractura de PTU en alta magnificación (X2500), evidenciando rotura de dimples, característica típica de una fractura dúctil, en el cual ocurre deformación permanente. Los dimples se forman a partir de las partículas de la microestructura y éstos crecen durante el proceso de fractura. Los hoyuelos sobre la superficie de fractura de instrumentos NiTi, que fallaron, fueron invariablemente mucho

menos profundos que los observados en instrumentos de acero inoxidable. Según las observaciones con MEB, estos instrumentos fracturados sugieren fractura dúctil. Este modo de fractura, es deseable porque la fractura frágil toma lugar abruptamente sin deformación permanente significativa y por tanto, no advierte el peligro de una inminente rotura. En estudio realizado con MEB, López y col.³¹, también observan que en la superficie de fractura de las limas PTU, se presentan características morfológicas de fractura dúctil con presencia de dimples de variadas formas y longitudes.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Evaluar comparativamente a través de un modelo artificial dinámico el comportamiento de las limas rotatorias NiTi Protaper Universal y Twisted Files ante la fatiga cíclica, y establecer mediante fractografía electrónica la causa de la fractura.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- **Establecer en el sector activo de instrumentos Protaper Universal y Twisted File la presencia de defectos estructurales producidos durante su fabricación.**
- **Evaluar mediante un modelo experimental que reproduce la dinámica de los instrumentos, la resistencia a la fractura flexural.**
- **Determinar en ambas limas la relación que existe entre el grado de curvatura y la resistencia a la fractura.**
- **Establecer a través de un análisis de fractografía electrónica las características que ofrece la superficie de fractura y áreas adyacentes en ambos instrumentos para definir el posible origen de las mismas.**

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de efectuar un análisis comparativo entre dos sistemas rotatorios, cuyos instrumentos o limas ofrecen características estructurales disímiles, se seleccionó el **Sistema Protaper Universal (PTU)** (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suiza) por ser ampliamente experimentado y mundialmente difundido y el **Sistema Twisted Files (TF)** (SybronEndo, Orange, CA, USA), de reciente incorporación en el mercado con distintas innovaciones que lo diferencia del anterior.

Basados en los objetivos propuestos, se realizaron los siguientes estudios, todos *In vitro*:

ESTUDIO 1:

ANÁLISIS DEL SECTOR ACTIVO EN INSTRUMENTOS SIN USO.

1.a.- Análisis de la superficie del instrumento.

1.b.- Análisis del material del instrumento.

Ambos, a su vez, respectivamente divididos en **1.a.1** y **1.a.2** y **1.b.1** y **1.b.2**, según el tipo de instrumento analizado.

ESTUDIO 2:

INFLUENCIA DEL GRADO DE CURVATURA DEL CONDUCTO SOBRE LA RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS A LA FRACTURA.

ESTUDIO 3:

ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA FRACTURA

Se efectuó bajo tres aspectos:

3-a.- Evaluación de la superficie externa de los instrumentos vecinas a la fractura.

3-b.- Evaluación de la superficie de fractura.

3-c.- Correlación entre el tiempo de fractura y las condiciones de ensayo mecánico para los instrumentos Protaper Universal y Twisted File.

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los diversos parámetros que caracterizan la rotura del componente. Tal es el caso de:

- Mecanismo de propagación de la fisura

- Tenacidad del material
- Configuración de tensiones: distribución y magnitud
- Medio químico
- Origen de la fractura

Es claro que una fractografía es tanto más útil cuanto mayor es el número de estos parámetros que se puede determinar. El análisis resulta particularmente efectivo si permite determinar el punto de origen o comienzo de la fractura. Las técnicas fractográficas pueden aportar también información sobre la fractoténacidad del material del componente fracturado, es decir, su comportamiento dúctil o frágil. La fragilidad o la ductilidad quedan en general reveladas en la superficie de fractura aunque, en general, los distintos modos de fractura aparecen mezclados entre sí. Pero aunque la interpretación no es siempre fácil, la proporción relativa de los distintos tipos de fractura puede tomarse como punto de partida para el análisis de las propiedades fractomecánicas del material.

Una observación fractográfica también permite estimar cualitativamente la magnitud de las tensiones actuantes, ya que existen rasgos fractográficos que indican si las cargas que condujeron a la rotura fueron altas o bajas.

La determinación del sitio donde se originó la fractura es una de las contribuciones principales a un análisis de fallas.

En este trabajo se realizó un análisis fractográfico óptico y electrónico.

La observación de una superficie de fractura a bajos aumentos, ya sea a simple vista, bajo una lupa, a través de una macrografía óptica, o en una micrografía electrónica de barrido de bajos aumentos, puede proporcionar información muy valiosa acerca de parámetros específicos que gobernaron el proceso de rotura. El análisis crítico de estos parámetros permite en la mayoría de los casos la determinación de las posibles causas de la falla.

Por ejemplo, una superficie de fractura por fatiga presenta una serie de marcas fractográficas características:

- Marcas de playa, nivel de arresto (beach marks)
- Conjuntos repetidos de marcas de nivel (ratchet marks)
- Estrías de fatiga

Las dos primeras son normalmente identificadas en una micrografía óptica, pero las estrías son solamente visibles a altos aumentos, en el microscopio electrónico.

Las marcas de nivel también llamadas de playa o de arresto, son características de una falla por fatiga. Se observan comúnmente en las fracturas de componentes en servicio. También es necesario aclarar que la ausencia de marcas de playa no es indicativa de la ausencia de fatiga. Las marcas de playa corresponden a sucesivas posiciones de arresto del frente de la fisura que se van propagando a través del componente. El espaciado entre sucesivas marcas de playa permite evaluar la velocidad de propagación de la fisura.

Los conjuntos repetidos de marcas de nivel (ratchet marks) se observan en los bordes de las superficies de fractura y corresponden a distintos orígenes de iniciación del proceso de rotura por fatiga.

Las estrías son características de la propagación de fisuras por fatiga. Se observan a grandes aumentos con microscopía electrónica, como elevaciones y depresiones paralelas entre sí, espaciadas algunos pocos micrones. Constituyen tanto una estructura fina de una marca de nivel dada, o también pueden encontrarse entre dos marcas de nivel consecutivas. La observación de estrías es una prueba evidente de la propagación de fisuras por fatiga.

ESTUDIO 1

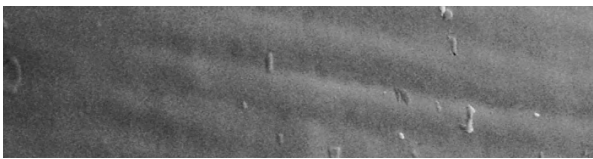
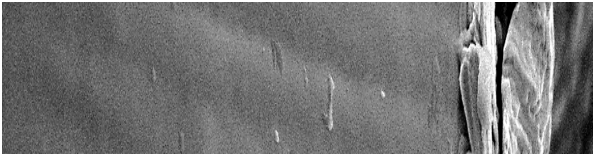
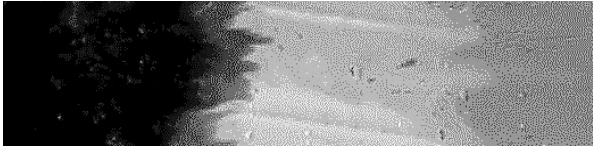
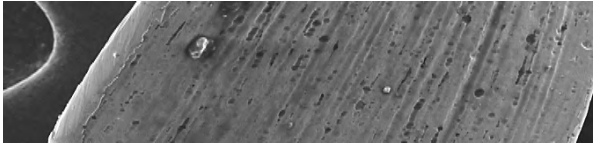
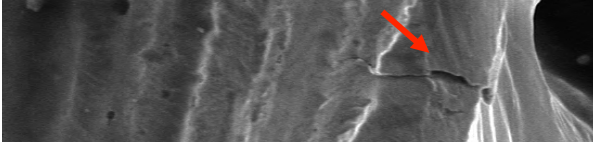

ANÁLISIS DEL SECTOR ACTIVO EN INSTRUMENTOS SIN USO

1a.- Análisis de la superficie del instrumento

Mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca JEOL JEM 6380LV del Centro de Espectroscopía y Microscopía Electrónica (CESMI) de la Vice-rectoría de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Concepción (Chile), se analizó la superficie del sector activo de los instrumentos Protaper Universal y Twisted File aún sin uso, a los efectos de establecer la presencia de defectos que estuvieran vinculados con el proceso de fabricación.

Con el fin de facilitar el análisis, se establecieron los defectos y sus características como se indica en la Tabla 1:

Tabla 1.- Denominación de los defectos analizados

	Estrías o surcos: Cuando la superficie del metal se manifestaba cubierta por líneas dispuestas con regularidad y ordenadamente.
	Rebabas: Cuando un sobrante del material permanecía adherido al filo, a veces sobresaliendo y otras plegados sobre la superficie metálica y aun sueltos.
	Melladuras: Cuando las aristas cortantes del instrumento mostraban falta de nitidez o de regularidad en su continuidad por pérdida de material.
	Poros: Cuando el defecto se presentaba como concavidades circulares, ovales y aún achatadas, aislada o fusionadas (coalescencia) .
	Microgrietas: Cuando en los filos del instrumento o en sus proximidades se observaban microfracturas.
	Microfisuras: Cuando la falla, coincidente con el fin de una estría, alteraba la continuidad del filo y que se convertía en microfisura si se combinaba con un poro.

Se observaron, además, defectos tales como cúmulos de residuos adheridos a la superficie del metal que por considerar que no influyen en la fractura de los instrumentos, no fueron incluidos. Además, por no figurar en ninguna de las clasificaciones consultadas, ni tener antecedentes de ellos, no se incluyeron en la clasificación defectos tales como pequeñas y aisladas pérdidas de metal en los bordes o filos, tampoco la presencia de “vacíos” e “inclusiones”, todos defectos que por sus características deberían ser considerados en futuros estudios.

Según los instrumentos del Sistema a estudiar, se conformaron los siguientes grupos:

Grupo 1a.1: Sistema **Protaper Universal (PTU)** compuesto por **8 limas S2 (20/.04)**.

Grupo 1a.2: Sistema **Twisted Files (TF)** compuesto por **8 limas 25/.04**.

Los grupos estuvieron compuestos por limas del mismo calibre y se estableció como sector de análisis la porción activa que mide 16 mm a partir de su punta.

Además de los puntos de interés (defectos), se captaron 3 (tres) imágenes por cada uno de los 3 niveles en que se dividió el sector activo del instrumento (nivel 1 vecino a la punta y nivel 3 en el inicio del sector activo, y entre ambos, equidistante, el nivel 2). Los datos obtenidos se registraron en tablas diseñadas específicamente para este propósito.

1b.- Análisis del material del instrumento

Con el fin de determinar en el volumen metálico de los instrumentos la presencia de defectos que pudieran influir sobre su fractura, se conformaron dos grupos:

- **Grupo 1b.1:** Sistema **Protaper Universal (PTU): 4 limas S2 (20/.04)**.
- **Grupo 1b.2:** Sistema **Twisted Files (TF): 4 limas 25/.04**.

Los instrumentos, individualmente, fueron incluidos en bloques de resina y luego, dos de cada grupo fueron desgastados en sentido longitudinal y dos seccionados transversalmente a 7 mm y 14 mm a partir de su punta (Fig. 6), para finalmente, ser sometidos a un acabado final mediante pulido espejo (Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Área geología – U. N. de Córdoba – Argentina).

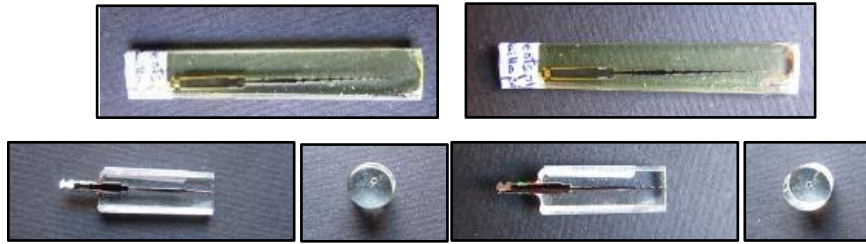


Fig.- 6.- Instrumentos incluidos en resina. Secciones en sentido longitudinal y transversal.

El estudio de las muestra (cortes longitudinales y transversales) se efectuó con **microscopio óptico Confocal (LAMARX – FAMAFA – Córdoba)**. Establecidos los puntos de interés, se captaron imágenes en los puntos y sectores señalados.

ESTUDIO 2

INFLUENCIA DEL GRADO DE LA CURVATURA DEL CONDUCTO SOBRE LA RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS A LA FRACTURA.

Para establecer la influencia que la curvatura del conducto tiene sobre la fractura de los instrumentos, en el presente estudio se utilizó un modelo experimental construido en base al que Pruett y Col.³² diseñaron en el año 1997.

En el modelo original presentado por los autores citados se utilizaban conductos artificiales curvos donde las limas rotaban en posición estática. Estos conductos se fabricaban a partir de agujas de acero inoxidable con un diámetro en su luz de 0,83 mm. Tenían una longitud de 22 mm, de los cuales 7 mm presentaban curvaturas de 30°, 45° y 60° (A mayor graduación, menor radio de curvatura).

La punta del instrumento sobresalía 2 mm del conducto artificial. Los instrumentos se insertaron a través de los conductos y sus cabezas se sujetaron al Magtrol Dynamometer (Magtrol, Inc., Buffalo, NY) cuya función era ajustar las rpm y el torque de manera más precisa que la lectura en la caja de control del motor eléctrico Aséptico utilizado. Los instrumentos con una abrazadera conectada al Magtrol Dynamometer giraron así libremente dentro del conjunto del tubo (Fig. 7). Una pieza de mano eléctrica (modelo Aséptico AEU-17, Inc., Woodinville, WA) se unió al mango del instrumento para así hacerlo rotar. La velocidad de rotación deseada se logró activando la pieza de mano eléctrica.



Fig.7.- Modelo experimental de Pruett y Cols.

A los efectos de reproducir lo más cercanas posibles las condiciones clínicas en las que los instrumentos actúan mediante el programa computacional **Autodesk® Inventor Professional 2011** se diseñó, en base al modelo antes mencionado y para ser aplicado en la presente experiencia, un dispositivo con las siguientes características: se utilizó, como base del mismo, una placa de Technyl ® (material de plástico rígido) de aproximadamente 45 x 45 cm. Sobre ella se montó una corredera telescópica de 30 cm (Ducasse™ Industrial), sobre la que se acopló un mecanismo que, como se explicará más adelante, actuó de soporte del tubo de acero que hizo las veces de conducto radicular.

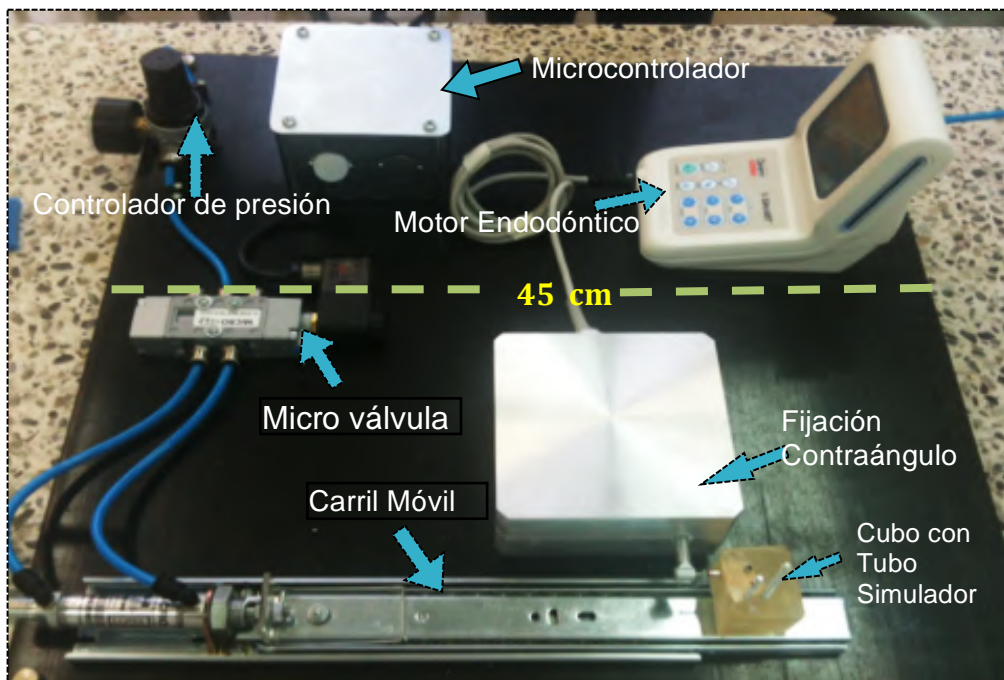


Fig. 8.- Dispositivo utilizado en la experiencia. Distribución de sus principales componentes.

El carril estaba conectado a un micro-cilindro hidráulico marca Micro™, manejado por un micro-controlador eléctrico Atmel™. El micro-cilindro producía un movimiento inicial de entrada al conducto artificial de 22 mm y después un movimiento cíclico axial de 0 a 8 mm, con una presión de 4 g de fuerza, tal como lo sugiere Kramkowski y Bahcall⁵⁸. Este movimiento hizo que el estudio fuera dinámico, a diferencia del modelo de Pruett y col.³¹ que era estático.

Por otro lado, disponía de un motor endodóntico eléctrico (Dentply X- Smart™), cuyo contra-ángulo fue montado de tal manera que quedaba fijo y la lima a utilizar permanecía a la altura de la entrada del conducto artificial (Fig. 8).

Al igual que en las prácticas clínicas, también aquí se utilizó un aceite sintético (DW-40®)^{12,21,50} a los efectos de disminuir la fricción del instrumento sobre las paredes del tubo que hacía las veces de conducto.

Los tubos que simulaban los conductos se fabricaron a partir de agujas de acero inoxidable. Tenían un diámetro uniforme de 1 mm y una longitud total de 20 mm, de los cuales, 15 mm era rectos y curvos los 5 mm restantes. Para ser utilizados en dos experiencias distintas, se prepararon tubos con dos graduaciones: 40° y 60° según el método de Schneider⁵⁹ (Fig. 9).

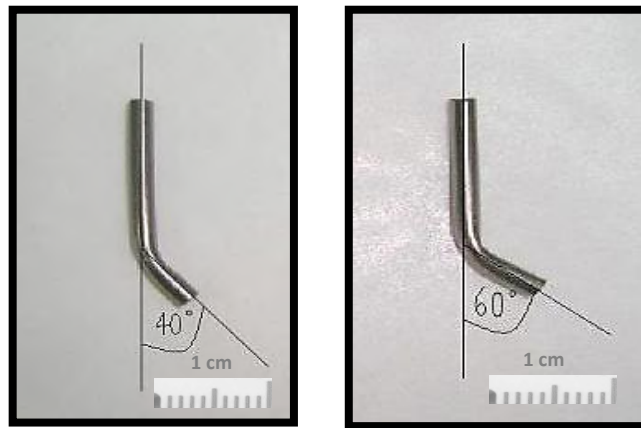


Fig. 9- Tubos de acero inoxidable con curvaturas de 40° y 60° que simulan conductos radiculares.

Con el fin de que estos pequeños tubos pudieran ser fácilmente manejados, orientados y posicionados de modo tal que guarden el paralelismo que el caso requería, se los incluyó en cubos de acrílico de aproximadamente 3 cm de lado, cuidando que sus extremos permanecieran abiertos.

Por otra parte, y a los efectos de estandarizar la exacta posición de la cabeza del contra-ángulo respecto a la ubicación del tubo que simulaba el conducto radicular, se utilizó un dispositivo *ad hoc* que mantuvo fija y en posición a la lima mientras giraba en el interior del tubo de acero (Fig. 10).



Fig. 10.- Dispositivo de acrílico en el cual se montaron los tubos.

La velocidad y torque se ajustaron según las indicaciones del fabricante: para el Sistema **Protaper Universal**, 350 rpm y para el Sistema **Twisted Files**, 500 rpm.

Para determinar en cada uno de los instrumentos la resistencia flexural, se conformaron, según el grado de curvatura de los tubos a utilizar, dos grupos por cada uno de los sistemas a analizar, según se muestra a continuación:

Grupo 2a.1: **Sistema Protaper Universal**, compuesto por 15 instrumentos S2 (20/.04) con una longitud total de 25 mm y una parte activa de 16 mm, que actuaron en conductos simulados con una angulación de **40°** hasta que se produjo su fractura.

Grupo 2a.2: **Sistema Protaper Universal**, compuesto por 15 instrumentos S2 (20/.04) con una longitud total de 25 mm y una parte activa de 16 mm, que actuaron en conductos simulados con una angulación de **60°** hasta que se produjo su fractura.

Grupo 2b.1: **Sistema Twisted Files**, compuesto por 15 instrumentos 25/.04. con una longitud total de 23mm y una parte activa de 16 mm. Estos instrumentos se hicieron actuar en conductos simulados con una angulación de **40°** hasta que se produjo su fractura.

Grupo 2b.2: **Sistema Twisted Files**, compuesto por 15 instrumentos 25/.04. con una longitud total de 23 mm y una parte activa de 16mm. Estos instrumentos se hicieron actuar en conductos simulados con una angulación de **60°** hasta que se produjo su fractura.

Mediante un motor endodóntico X-Smart (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suiza) fijado al modelo experimental, las limas se dejaron rotar libremente dentro del tubo de acero en toda su longitud, y mediante un cronómetro se estableció el tiempo transcurrido hasta que se produjo la rotura y separación de los cabos, lo que se detectó visual y auditivamente. Se midió la longitud del trozo y se calculó el número de ciclos cumplidos hasta el momento que ocurrió la fractura, multiplicando las rpm por el tiempo transcurrido hasta la fragmentación⁵⁹. Todos los datos obtenidos se tabularon mediante el programa Microsoft Excel 2003, registrándose en tablas diseñadas específicamente con ese propósito.

Las variables independientes fueron el tipo de instrumento, la velocidad del motor y el grado de curvatura y las dependientes, el tiempo, los ciclos producidos antes de la fractura y el nivel a que ocurre la fractura.

A partir de los valores obtenidos, expresados en medias, se realizó primero un análisis estadístico descriptivo con tablas, gráficos y mediante el programa computacional

SPSS software versión 19. Para evaluar la influencia de cada factor o variable independiente sobre la variable dependiente, se utilizó un Modelo Lineal General Univariante, con pruebas de efecto intersujeto: Suma de cuadrados tipo III (SC tipo III), Test estadístico de Fisher – Snedecor con significación estadística ($p < 0,05$) y Determinante R^2 . Para el análisis comparativo se utilizó Diagrama de Dispersión, Correlación de Pearson, Diagrama de Caja y Bigotes (Boxplots), Gráfico Perfil de Medias.

ESTUDIO 3:

ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LA FRACTURA

El análisis de los instrumentos **PTU y TF** fracturados se realizó con microscopio electrónico de barrido Oxford Modelo AZTec del Laboratorio de Microscopía Electrónica y Análisis por Rayos X LAMARX de la Facultad de Astronomía, Matemática, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina). Se utilizaron aumentos que iban de 120X a 900X y se efectuó bajo tres aspectos:

3-a.- Evaluación de la superficie externa de los instrumentos vecinas a la fractura.

3-b.- Evaluación de la superficie de fractura.

3-c.- Correlación entre el tiempo de fractura y las condiciones mecánicas para los instrumentos PTU y TF.

Los instrumentos analizados en los puntos 3-b y 3-c fueron los mismos que se experimentaron hasta la fractura en el **ESTUDIO 2**, de modo tal que estuvieron distribuidos en los siguientes Grupos:

- 1) **GRUPO 2a.1:** Instrumentos PTU ensayado hasta fractura a 350 rpm flexionado 40°.
- 2) **GRUPO 2a.2:** Instrumentos PTU ensayado hasta fractura a 350 rpm flexionado 60°.
- 3) **GRUPO 2b.1:** Instrumentos TF ensayado hasta fractura a 500 rpm flexionado 40°.
- 4) **GRUPO 2b.2:** Instrumentos TF ensayado hasta fractura a 500 rpm flexionado 60°.

RESULTADOS

ESTUDIO 1**ANÁLISIS DEL SECTOR ACTIVO EN INSTRUMENTOS SIN USO.****1a.- Análisis de la superficie del instrumento**

En la Tabla 2 se presenta una síntesis de los defectos que, en base a la clasificación establecida en la Tabla 1, se detectaron a lo largo de la superficie del sector activo o cortante de instrumentos sin uso, pertenecientes a los sistemas PTU y TF, ambos analizados en este estudio y que se consideraron como defectos vinculados al proceso de fabricación.

Tabla 2.- Características generales que ofrece la presencia de distintos defectos en limas de los sistema PTU y TF sin uso.

SISTEMAS MECANIZADOS	DEFECTOS MICROSCÓPICOS
<p>PROTAPER UNIVERSAL</p> <p>(PTU)</p>	<p>Las estrías surcan toda la superficie del sector activo con una dirección que va desde su eje axial hacia los filos.</p> <p>La presencia de rebabas y melladuras sobre los filos o vecindades de los instrumentos es muy frecuente.</p> <p>Se observa escasa presencia de diminutos poros sobre la superficie analizada y están prácticamente ausentes en los filos.</p> <p>No se detectaron microcracks ni microfisuras.</p>
<p>TWISTED FILE</p> <p>(TF)</p>	<p>Por el aspecto, abundancia y nitidez, las estrías son el rasgo que más se destaca. Son surcos longitudinales que en su trayecto exponen hileras de poros. A menudo terminan en los filos del instrumento donde producen discontinuidades que se manifiestan como microfisuras. Las rebabas son menos frecuentes que en las limas PTU, no así las melladuras.</p> <p>Se observan numerosos poros de diversos tamaños y formas sobre toda la superficie activa de los instrumentos. Se distribuyen en forma de cadenas a lo largo de los surcos, a veces individualizados, otras unidos y aún fusionados mostrando sectores de coalescencia.</p> <p>No se apreciaron microgrietas.</p>

En las limas **PTU** los defectos se destacan sobre una superficie que se muestra un tanto homogénea y despejada. En ella se aprecia, como rasgo sobresaliente y constante, la presencia de **estrías** horizontales que, sin duda, son producto del maquinado. Se caracterizan por su trazado horizontal o ligeramente oblicuo que va del eje central al filo

del instrumento y por la levedad del diseño y, además, por la regularidad del paralelismo, (Fig. 11).

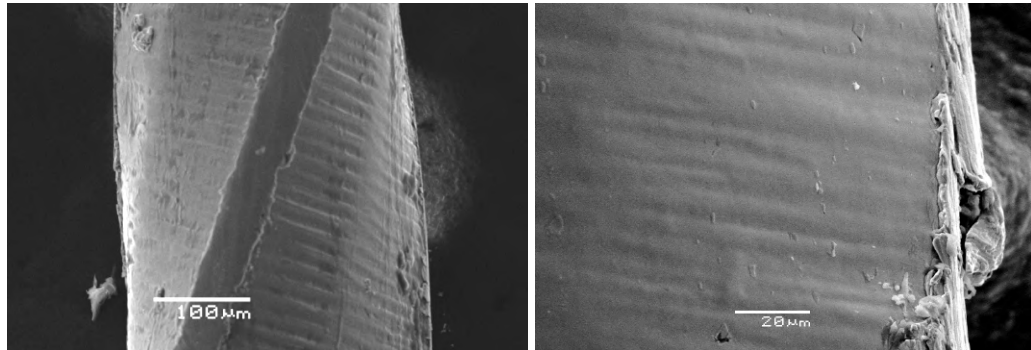


Fig. 11.- Instrumentos PTU. Estrías que inciden perpendicularmente o algo oblicuas respecto al filo.

En cuanto a los filos, a veces presentan imperfecciones que según la clasificación preestablecida, entran en la categoría de **rebabas** (Fig. 12). Pese a su frecuencia y a sus características, parecieran no afectar la estructura del instrumento.

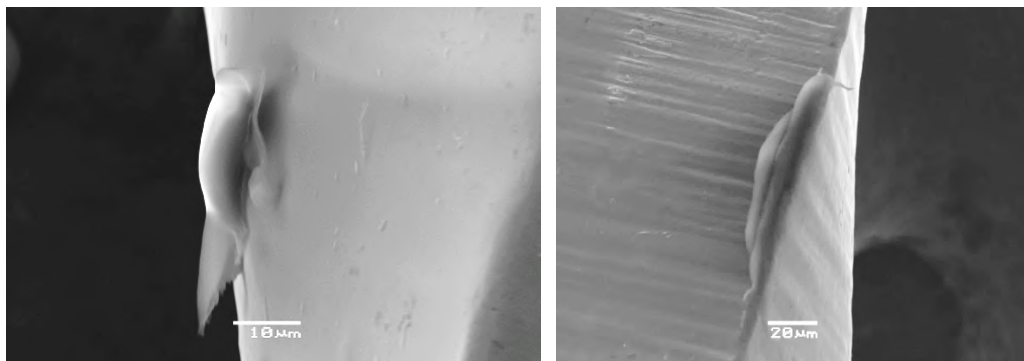


Fig. 12.- Instrumentos PTU. En ambas imágenes se observan defectos calificados como rebabas.

En la Fig. 13 se muestran imágenes que corresponde a defectos que se identificaron como **melladuras**, ya que en sus filos se evidencia una clara pérdida de metal. Por sus características, requieren ser analizadas en el futuro con mayor detenimiento.

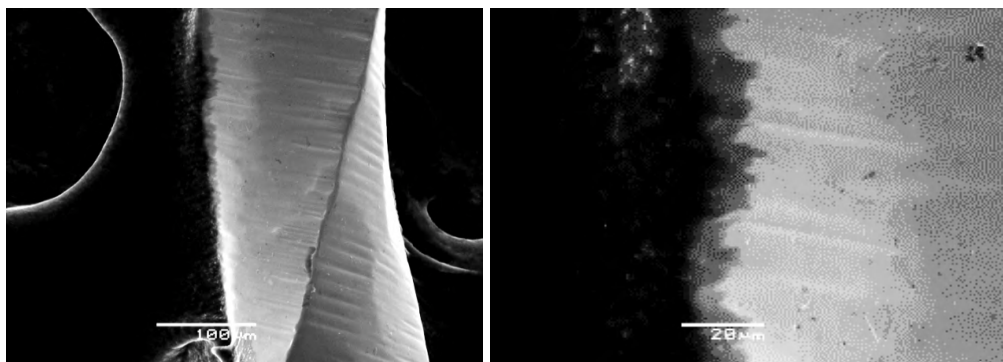


Fig. 13.- Instrumentos PTU. a.- Melladuras en el borde izquierdo del instrumento. b.- Sector afectado con mayor aumento. En ambas presencia de estrías horizontales.

La presencia de pequeños **poros** en la superficie de los instrumentos **PTU** es muy escasa y sus dimensiones son muy reducidas (Fig. 14). Se presentan agrupados dentro de amplias áreas vacías.

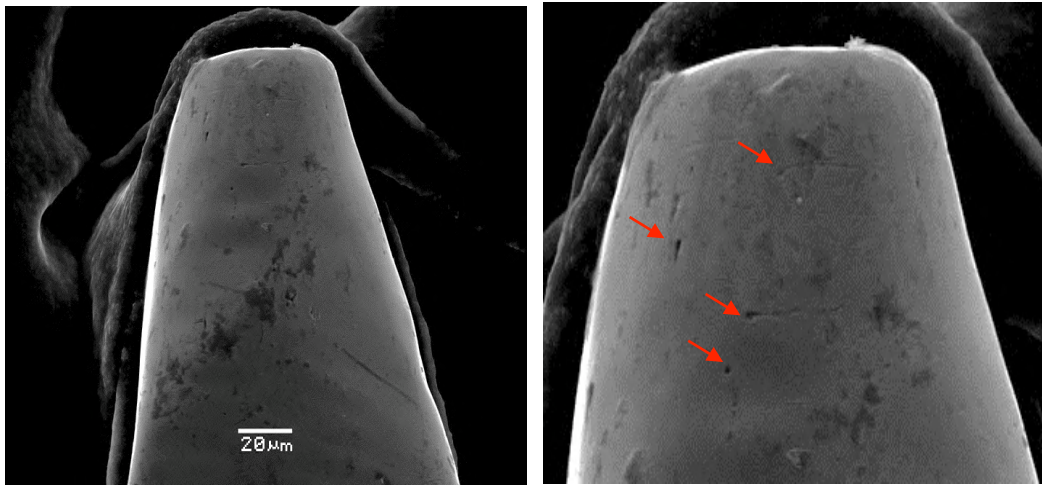


Fig. 14.- Extremo o punta de Instrumentos PTU. Superficie lisa. Estrías levemente insinuadas.
b. (Ampliación) Muy escasos poros de reducidas dimensiones (Flechas rojas).

La presencia de **microcracks** en las limas PTU sin uso es escasa y de dudosa identificación, aún en los filos.

En los instrumentos **TF** la situación difiere totalmente. El defecto microscópico que los identifica es la abundante presencia de estrías que con evidente nitidez y aparentemente sin interrupción, surcan toda la longitud del sector activo del instrumento, guardando un claro paralelismo entre sí. Una particularidad de estas estrías es que en su trayecto exponen numerosos poros con los que guardan una clara asociación (Fig. 15).

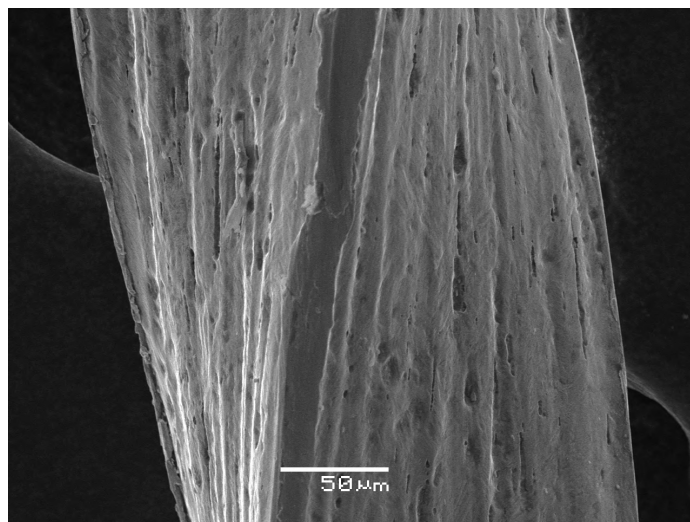


Fig. 15.- Limas TF: Estrías asociadas a poros cubren la superficie del instrumento.

Los **poros** constituyen otro defecto que identifica a las limas TF, ya que además de estar estrechamente vinculados a las estrías, también presentan otras características muy particulares. En efecto, son abundantes, de muy variadas formas y dimensiones. A veces en coalescencia por lo que adquieren las características de una grieta (Fig. 16). Muestran, además, una disposición un tanto llamativa, ya que a lo largo de las estrías se presentan en rigurosas hileras, lo que hace que adquieran un aspecto arrosariado.

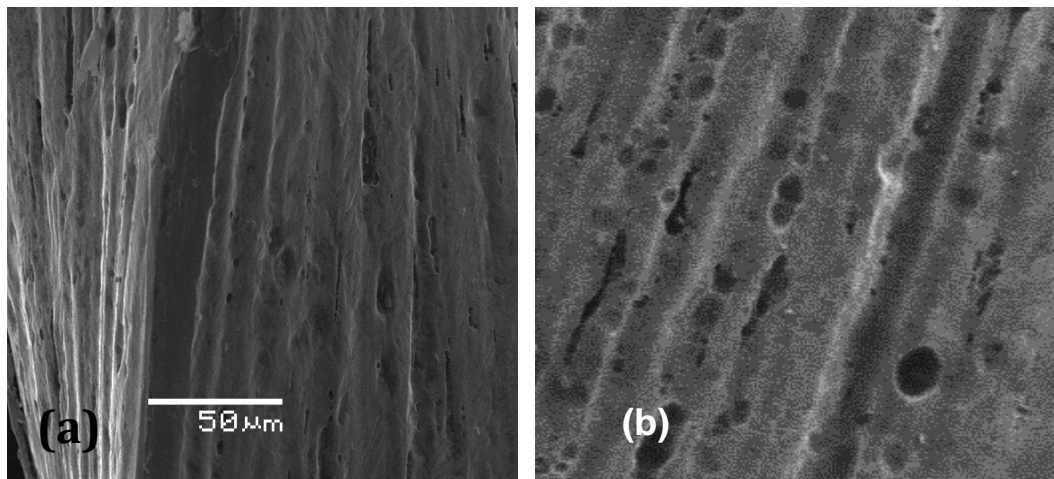


Fig. 16.- Instrumentos TF. (a).- Poros individuales y en cadenas asociados a estrías cubren la superficie del instrumento. (b) Imagen de los poros a mayor aumento.

En las imágenes de la Fig. 17 se muestran dos aspectos del extremo de un instrumento TF, donde el corte del metal es en parte oblicuo y en parte redondeado. En ellas se aprecia que los poros se presentan aislados y a veces agrupados, rara vez unidos o formando cadenas.

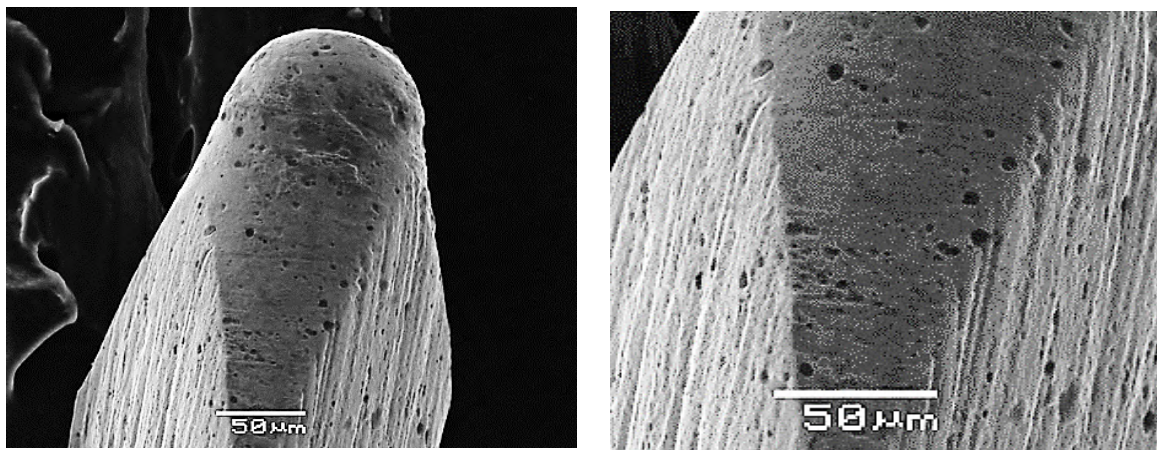


Fig. 17.- Imágenes del extremo de un instrumento. En ellas se aprecia la sección oblicua y redondeada donde los poros se presentan aislados o agrupados y raramente unidos.

La presencia de **rebabas** (Fig. 18) en los instrumentos TF es menor que en los PTU, mientras que las **melladuras**, por el contrario, se observan con mayor frecuencia (Fig. 19).

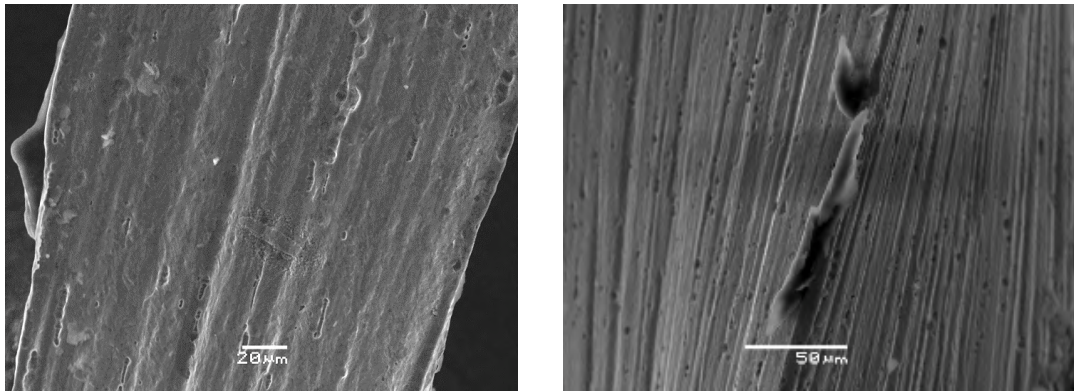


Fig. 18.- Limas TF: Presencia de rebabas sobre el filo y la superficie del instrumento.

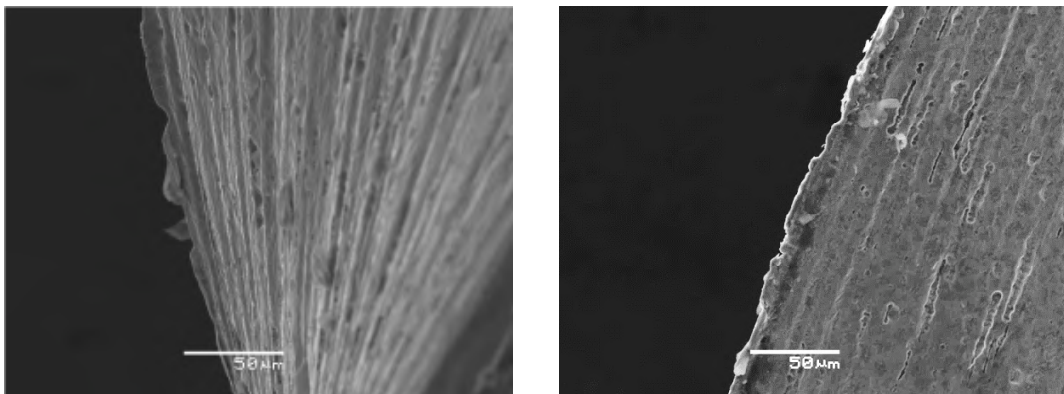


Fig. 19.- Limas TF: Distintos aspectos que ofrecen las melladuras.

Si bien en los filos de las limas TF no se aprecian **microcracks**, con cierta frecuencia se observan importantes puntos de debilitamiento que coinciden con la terminación de una estría o surco (Fig. 20).

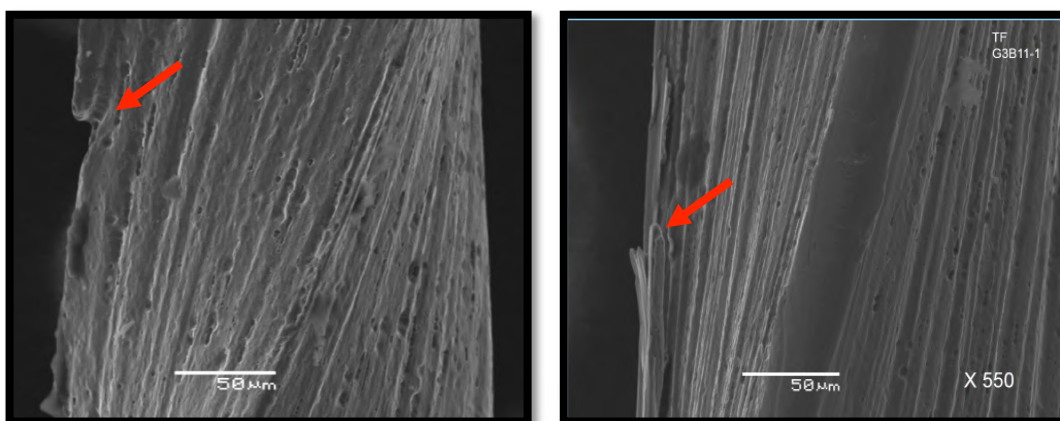


Fig. 20. Limas TF: Defectos coincidentes con la finalización de una estría que actúa como punto de debilitamiento o inicio de una microfisura.

Si en el punto de finalización sobre el filo la estría coincide con un poro o con una cadena de poros, puede que se forme una microfisura que sigue la dirección oblicua del surco (Fig. 21). En la Fig. 22 se muestra el filo de un instrumento con ambas situaciones.

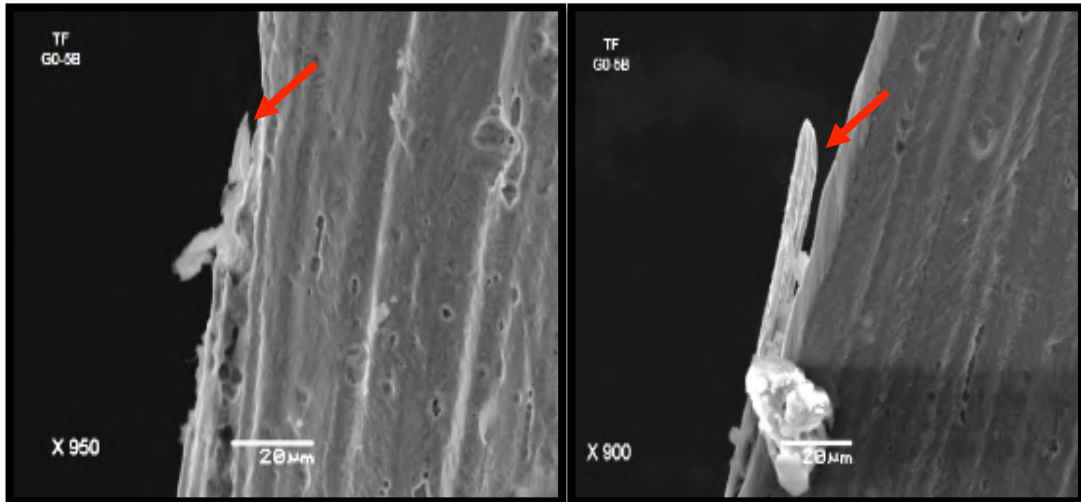


Fig. 21.- Limas TF. Microfisuras en el filo de instrumentos productos de la asociación de la finalización de estrías longitudinales con una cadena de poros (flechas).

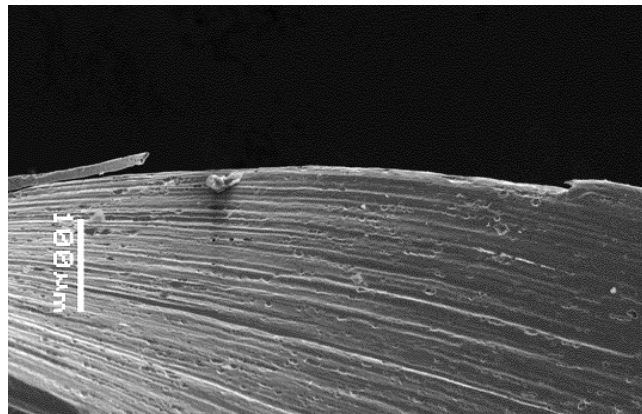


Fig. 22.- Filo del instrumento donde se aprecian ambas situaciones.

Se observaron, además, cúmulos de residuos que resultaron de la fabricación del instrumento y que por no influir mayormente sobre la posible fractura de los instrumentos, no fueron incluidos en la clasificación. Además, por valorarlos en su momento poco frecuentes, aunque pareciera que no lo son tanto, no se incluyeron defectos tales como pequeñas y aisladas faltantes del metal en los bordes, posiblemente asociadas a poros abiertos en los filos. Tampoco se consideró la presencia de “vacíos” e “inclusiones”, dos aspectos que a veces se asocian y que requerirían mayor atención, ya que no han sido suficientemente evaluados por los autores (Fig. 23).

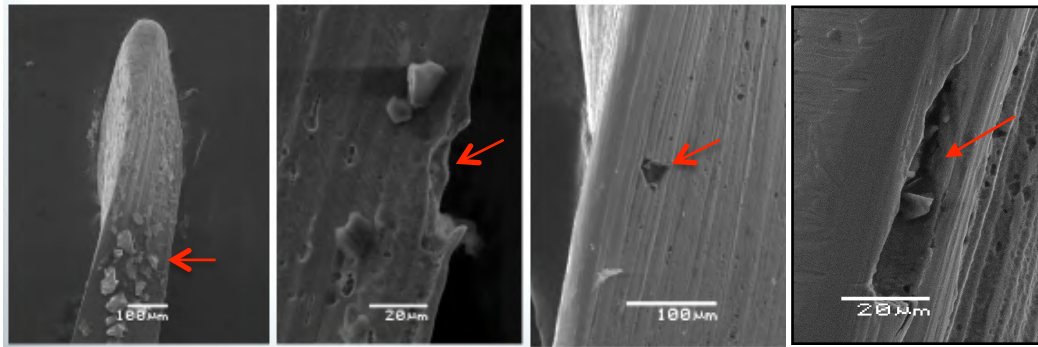


Fig. 23- Defectos no incluidos en la clasificación: Residuos, oquedades aisladas, a veces en sacabocado, vacíos e inclusiones, en este caso dentro de una cavidad o vacío, etc.

1b.- Análisis del material del instrumento

En ambos instrumentos (TF y PTU) se evaluó el aspecto volumétrico y su acabado mecánico superficial.

El análisis se realizó en base a la observación de la superficie y bordes resultantes de cortes transversales al eje longitudinal de los instrumentos. Para ello se utilizó un Microscopio Óptico Confocal perteneciente al LAMARX – Famaf – Conicet - (Córdoba – Argentina)

Las superficies resultantes de los cortes fueron pulidas mecánicamente utilizando pasta de diamante para su presentación final.

1.- Instrumentos Protaper Universal (PTU)

En la Fig. 24 se muestra un corte transversal al eje longitudinal de una lima PTU sin uso. La imagen es la de un plano triangular convexo y es propia de estos instrumentos.

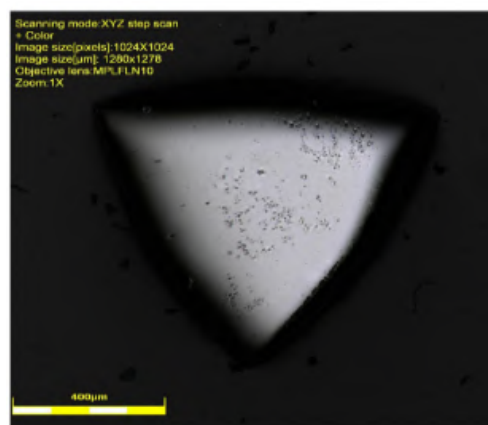


Fig. 24.- Sección transversal de una lima PTU sin uso. La imagen es la de triangular de lados convexos. En su superficie se observan defectos inmersos en el volumen del metal.

Sus vértices se corresponden con los filos del instrumento. En su superficie del corte se destacan áreas puntilladas constituidas por aglomerados de numerosos poros e inclusiones que tienden a ocupar el área central y sólo en ciertos sectores alcanzan el contorno y bordes del corte, por lo que su distribución carece de regularidad (Fig. 24).

En la Fig. 25 se observa con mayor aumento, un sector de la imagen anterior que incluye un vértice del triángulo (filo del instrumento) y áreas adyacentes con sus bordes. En ella se observa con mayor nitidez e incluidos en el volumen del metal poros de reducidas dimensiones, y junto a ellos, la presencia de inclusiones y líneas (indicadas por flechas) consideradas como posibles microcracks.

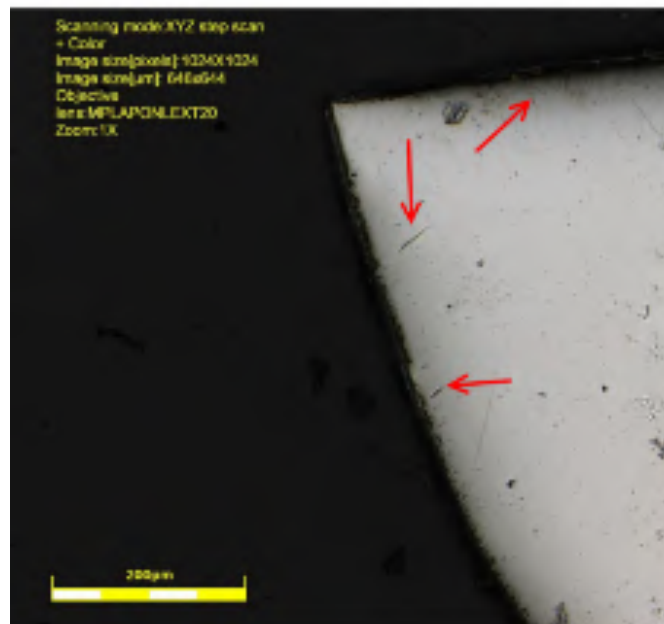


Fig. 25.- Vértice del triángulo de una lima PTU. Presencia de poros, inclusiones y posibles microcracks (flechas rojas) en un el volumen.

La Fig. 26 muestra un corte longitudinal de una lima PTU sin uso. En él se observa una colección de poros distribuidos en el interior del metal.

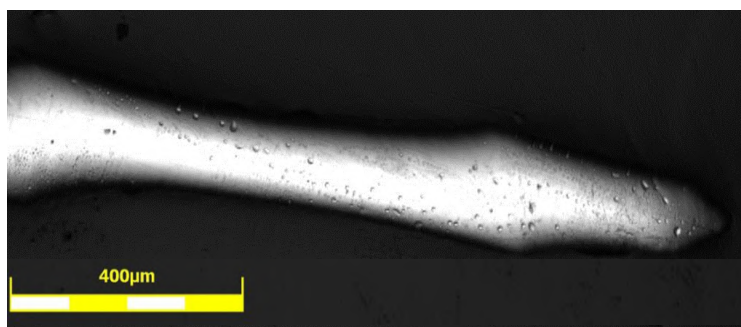


Fig. 26.- Lima PTU. Corte longitudinal donde se aprecian poros dentro del volumen del metal.

En la Fig. 27 se aprecia parte del contorno del corte transversal de un instrumento PTU que se caracteriza por ser, generalmente, liso y sin alteraciones. Ello se debe a que las líneas de maquinado no lo alteran ya que corren paralelamente al plano del corte.

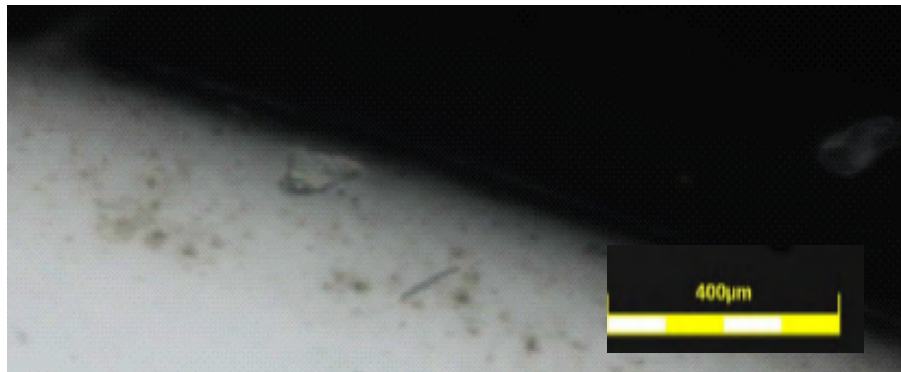


Fig. 27.- Borde del corte transversal de un instrumento PTU. Generalmente se presenta liso y sin alteraciones en su continuidad.

En la Fig. 28 se muestra un corte axial del instrumento donde además de la superficie del desgaste (volumen del metal), se observa también parte de la superficie externa con estrías del maquinado, las cuales, por su incidencia perpendicular al área del corte, hacen que su borde tengan un aspecto aserrado.

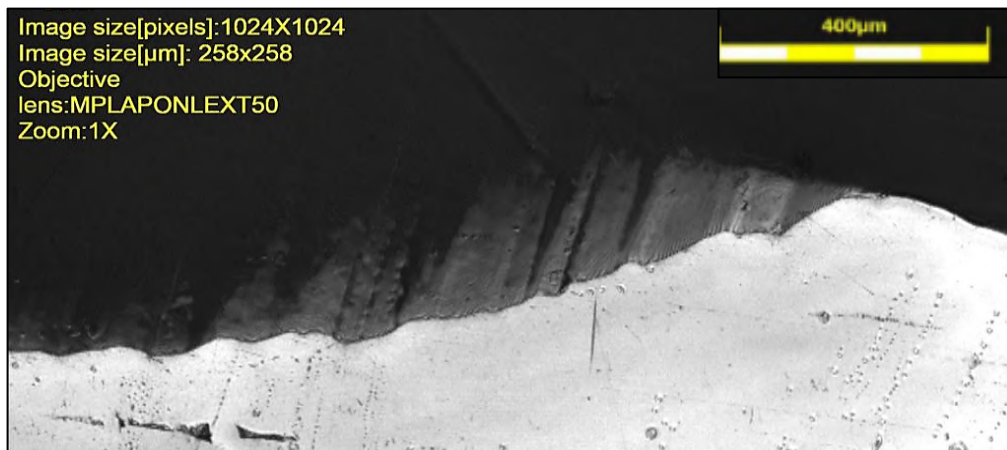


Fig. 28.- Instrumento PTU. Corte axial donde se aprecia la superficie pulida del corte del metal y estrías externas que alteran la línea del contorno (borde zigzagueante).

La imagen obtenida mediante microscopio confocal que se presenta como Fig. 29, muestra con mayor magnificación un sector de una sección longitudinal de un instrumento PTU sin uso donde se pueden valorar, con más detalles, la presencia de poros en el metal, como así también su diversidad en cuanto a sus formas y dimensiones. En cuanto a su distribución, un tanto irregular ya que se observan áreas vacías y los poros, aislados o fusionados y aún en coalescencia adoptan un perfecto orden lineal con una disposición en cadena o arrosariada.

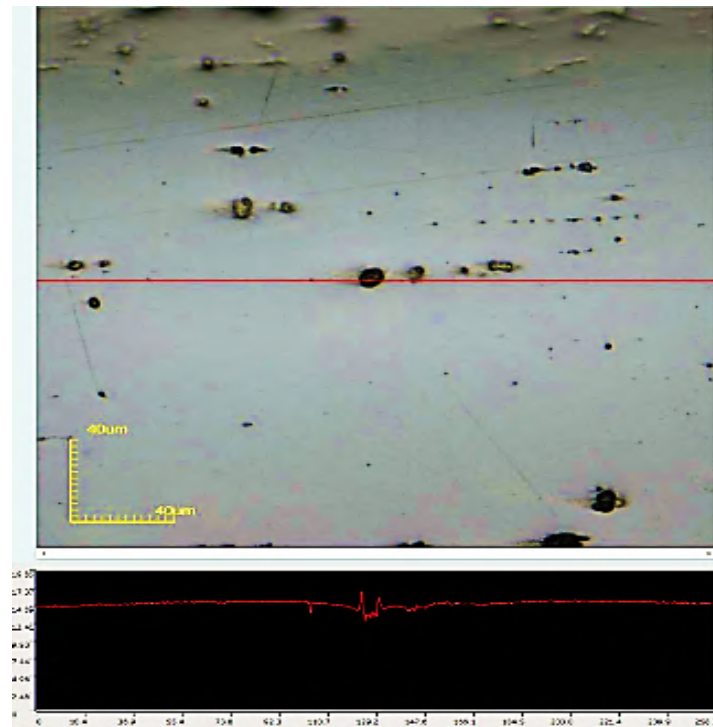


Fig. 29.- Corte longitudinal de una lima PTU. Los poros, dentro del metal, aislados o unidos forman hileras. La línea roja inferior indica la profundidad del poro y bordes algo elevados.

2.- Instrumentos Twisted Files (TF)

En la Fig. 30 se muestra el corte transversal de una lima TF sin uso. Su imagen es la de un triángulo de lados planos y sus vértices se corresponden con los filos del instrumento. Su superficie está cubierta en toda su extensión por poros de distintos tamaños distribuidos con cierta regularidad. En la Fig. 31 se muestra la irregularidad de sus bordes.

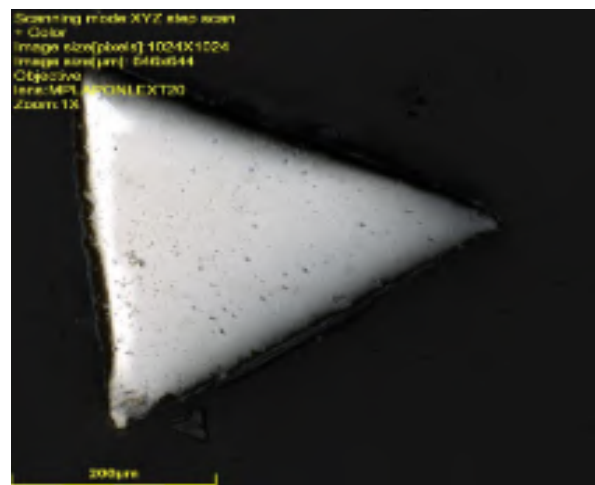


Fig. 30.- Corte transversal de una lima TF. Presencia de poros en su superficie triangular.



Fig. 31.- Corte transversal de una lima TF. Presencia de irregularidades en sus bordes

La Fig. 32 muestra una fracción de un corte longitudinal de una lima TF sin uso que coincide con sector de transición de una espira. El recuadro rojo marca el vértice de transición.

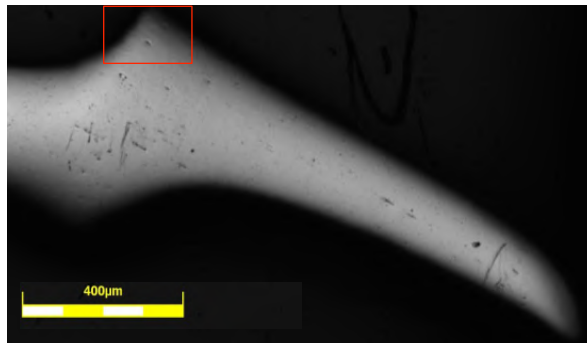


Fig. 32.- Sector de la Sección longitudinal de una lima TF sin uso que coincide con una espira.

En la Fig. 33 se aprecia un sector de lima TF, que se destaca en la Fig. 32. En el se aprecian con nitidez numerosos poros de pequeñas dimensiones (de 5 μm a 20 μm).



Fig. 33.- Poros en el volumen y en los bordes de la espira de una lima TF (Flechas).

En la Fig. 34 se muestra un sector ampliado de la imagen de la Fig. 33 donde se aprecia la presencia de poros en el interior y en sus bordes destacados con la letra **P**, a modo de resaltar las imperfecciones existentes.

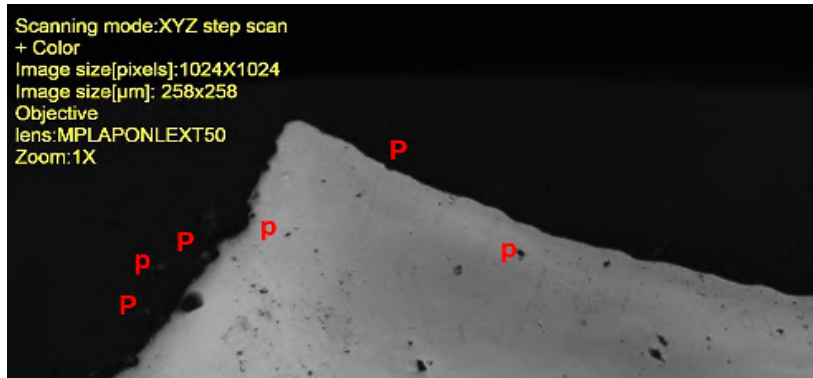


Fig. 34.- Sector de un corte transversal de una lima TF (ampliación de la Fig. 30) donde además de mostrar un contorno irregular, también se aprecia la presencia de poros (P).

Lo que se destaca en la imagen antes citada es la irregularidad en los bordes de las limas TF, debidas a la presencia de poros y al zigzag de las estrías un aspecto que merece particular atención, ya que por sus características pareciera que la presencia de poros en los filos o en sus proximidades pueden actuar como inicio de una fractura (Fig. 35), más aún si coincide con una estría o surco.

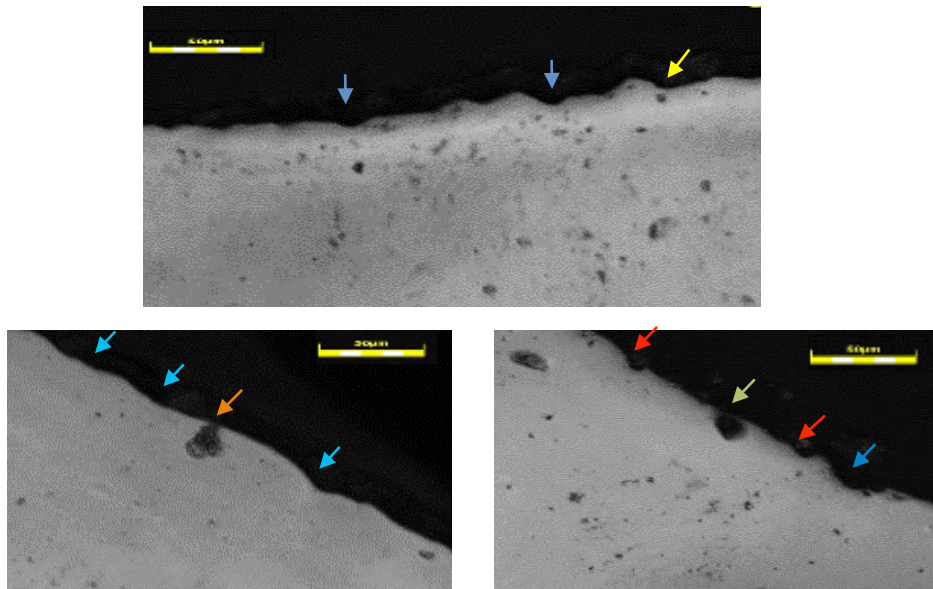


Fig. 35.- Corte transversal en una lima TF. Perímetro zigzagueante debido a la presencia de estrías (flecha azul). Poros abiertos sobre el borde (flechas rojas). Poros abiertos en forma de saco o bolsa (flecha naranja). Poro junto a una estría (flecha amarilla).

Además de los poros, el volumen metálico aloja, con frecuencia, otros elementos de dimensiones muy variadas en forma de partículas de segunda fase (posiblemente inclusiones mucho más duras que la matriz), tal como se muestra en la Fig. 36, que también pueden actuar como inicio del proceso de fractura.

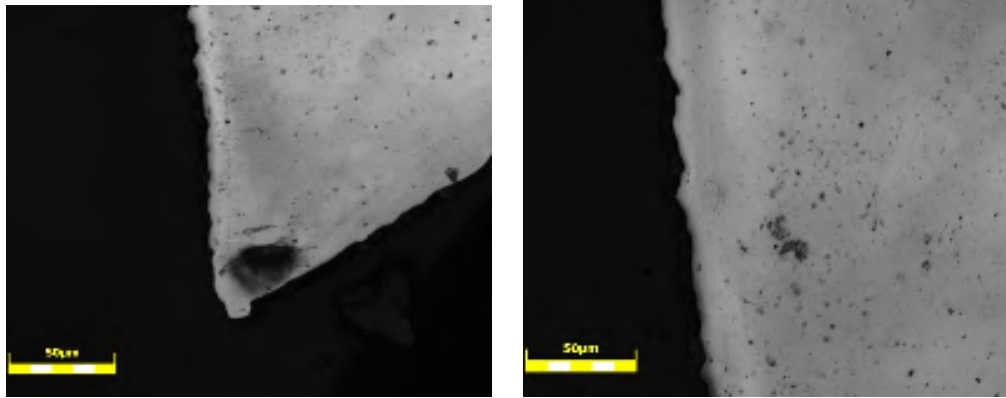


Fig. 36.- Limas TF. Cortes transversales. Bordes irregulares por estrías y pequeños poros y, además, otros defectos reconocidos como inclusiones, que puede ser el inicio de fracturas.

La Fig. 37 muestra parte de un corte longitudinal de una lima TF. La deformación plástica que el instrumento sufre durante su manufactura hace que los poros, a veces aislados y otras unidos entre sí, sigan el eje longitudinal del instrumento adoptando una disposición en cadena, lo cual, desde el punto de vista mecánico -concentrando tensiones- actúan como si fueran una grieta.

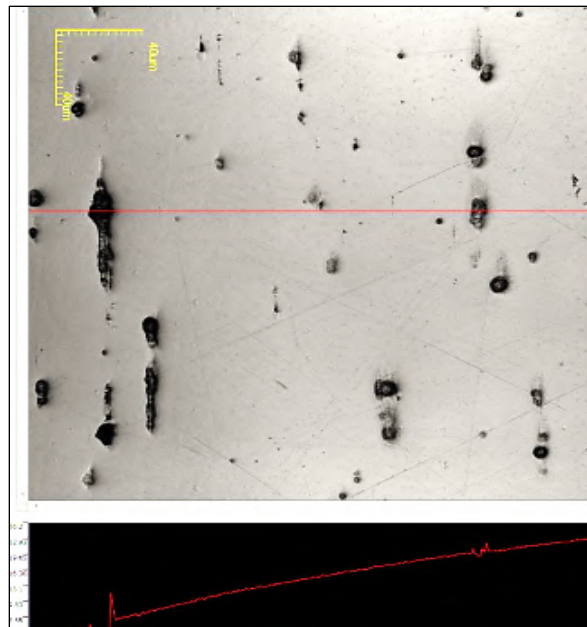


Fig. 37.- Lima TF. Corte longitudinal. Los poros, aislados o fusionados, forman cadenas distribuidas en su interior. La línea roja en la parte inferior indica la profundidad del poro y que sus bordes son elevados.

ESTUDIO 2

INFLUENCIA DEL GRADO DE LA CURVATURA DEL CONDUCTO SOBRE LA RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS A LA FRACTURA.

Al igual que en el Estudio 1 se consideraron cuatro grupos, según el tipo de instrumento y el grado de curvatura del conducto:

Grupo 2a.1 - LIMAS PROTAPER UNIVERSAL, trabajadas en 40° de curvatura.

Grupo 2a.2 - LIMAS PROTAPER UNIVERSAL, trabajadas en 60° de curvatura.

Grupo 2b.1 - LIMAS TWISTED FILE, trabajadas en 40° de curvatura.

Grupo 2b.2 - LIMAS TWISTED FILE, trabajadas en 60° de curvatura.

Este estudio tuvo como fin evaluar la influencia que la curvatura del conducto (40° y 60°) tiene sobre la fractura de los instrumentos endodónticos en su movimiento de rotación, valorando, fundamentalmente, el tiempo transcurrido hasta su fractura, el número de ciclos (rpm) y el nivel donde ocurre la rotura de la lima.

Debido a que la variable **ciclos** (o revoluciones por minuto: **rpm**) es linealmente dependiente de la variable **tiempo**, las distribuciones de datos en ambas tendrán formas idénticas (sólo variarán la escala y las unidades de medida) y dado que también los ciclos dependen de forma directa y lineal de la variable velocidad angular o velocidad rotacional, que fue diferente y constante en cada uno de los dos sistemas utilizados (350 rpm en limas PTU y 500 rpm en limas TF), a iguales tiempos, la cantidad de ciclos cumplidos será diferente en ambos sistemas, situación que se expresa en los gráficos de las figuras 38 y 39, donde se observan rangos de tiempos diferentes según la curvatura de los conductos, con valores muy inferiores en ángulos de 60°, pero al considerar cada curvatura por separado, los rangos de tiempos fueron similares en ambas limas.

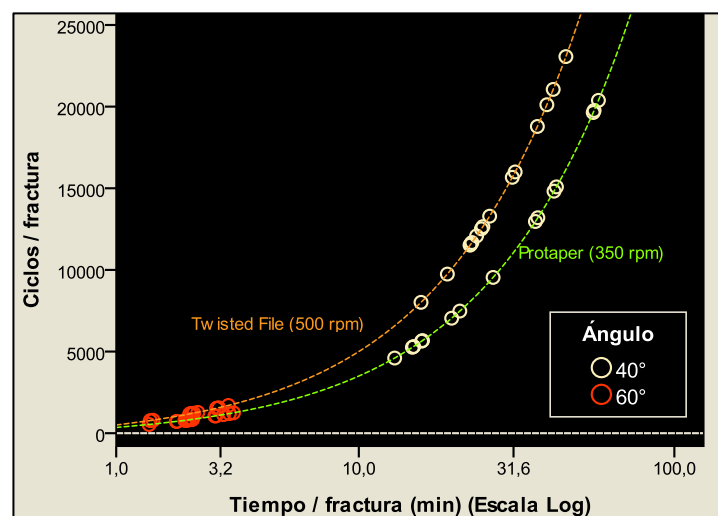


Fig. 38.- Diagrama de dispersión de valores de cantidad de ciclos cumplidos hasta la fractura del instrumento en función del tiempo según velocidad de giro y angulación.

La distancia que separa ambas líneas de ajuste que corresponden a los dos tipos de limas como se aprecia en el gráfico de la Fig. 38 (líneas curvas discontinuas verde y anaranjada) equivale a la diferencia que existe en el número de ciclos entre limas, número que se incrementa con el tiempo en un factor de 150 ciclos por cada minuto transcurrido. En el gráfico de la Fig. 39, se muestran las distribuciones de los tiempos hasta la fractura (en escala logarítmica) según sistema y curvatura.

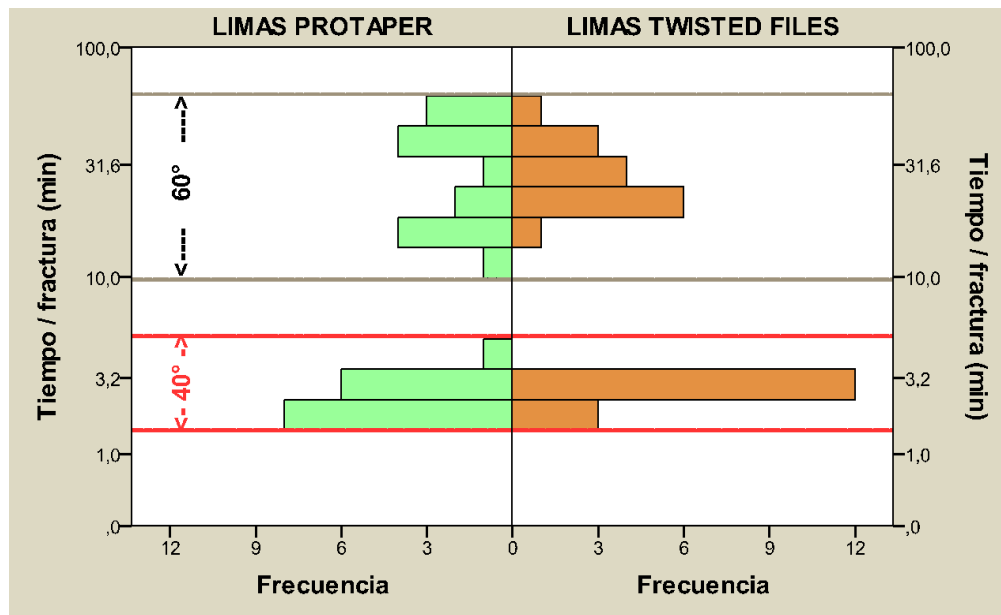


Fig. 39.- Histograma de distribución de valores de cantidad de ciclos cumplidos hasta la fractura del instrumento en función del tiempo transcurrido hasta la misma, considerando el tipo de limas y el grado de curvatura del instrumento.

En las **Tablas 3 y 4** se muestran los valores correspondientes a los tiempos y ciclos completados en cada uno de los instrumentos hasta el momento de la fractura (NCF), así como el nivel donde se produjo la fragmentación, lo que equivale a longitud del fragmento y que se obtuvieron en los ensayos mecánicos realizados y registrados en los grupos **2a.1 y 2a.2**, en los que se experimentaron limas **PTU** con curvaturas de **40° y 60°** respectivamente, y en las **Tablas 5 y 6** que muestran los resultados obtenidos en los grupos **2b.1 y 2b.2** con limas **TF** en curvaturas de igual graduación.

Grupo 2a.1 - LIMAS PROTAPER UNIVERSAL (40°):

Tabla 3.- Muestra el tiempo y los ciclos en los que se produjo la fractura de limas Protaper S2 en conductos con 40° de curvatura, como así también el nivel de la fractura del instrumento (mm).

RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS PROTAPER A LA FRACTURA			
• Curvatura: 40°			
MUESTRA	Tiempo / fractura (min)	Ciclos / fractura (a 350 rpm)	Nivel / Fractura (mm)
1	42,35	14822,5	2
2	21,37	7479,5	4
3	16,21	5673,5	4
4	37,04	12964,0	3
5	56,11	19638,5	3
6	15,03	5260,5	5
7	16,10	5635,0	4
8	13,15	4602,5	5
9	27,26	9541,0	4
10	43,10	15085,0	6
11	20,12	7042,0	4
12	56,47	19764,5	3
13	37,70	13195,0	2
14	58,24	20384,0	2
15	15,17	5309,5	5
Media	31,69	11093,1	3,73
Desv. Std.	16,61	5812,2	1,22
Mediana	27,26	9541,0	4
Mínimo	13,15	4602,5	2
Máximo	58,24	20384,0	6

Grupo 2a.2 - LIMAS PROTAPER UNIVERSAL (60°):

Tabla 4.- Muestra el tiempo y los ciclos en los que se produjo la fractura de limas Protaper en conductos con 60° de curvatura, como así también el nivel de la fractura del instrumento (mm).

RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS PROTAPER A LA FRACTURA			
• Curvatura: 60°			
MUESTRA	Tiempo / fractura (min)	Ciclos / fractura (a 350 rpm)	Nivel / Fractura (mm)
1	2,34	819,0	4
2	2,29	801,5	4
3	2,26	791,0	5
4	2,31	808,5	5
5	3,00	1050,0	4
6	3,56	1246,0	4
7	3,03	1060,5	5
8	3,43	1200,5	4
9	2,42	847,0	6
10	2,07	724,5	5
11	2,05	717,5	4
12	1,52	532,0	5
13	2,39	836,5	4
14	3,25	1137,5	5
15	2,24	784,0	5
Media	2,54	890,4	4,6
Desv. Std.	0,58	201,7	0,63
Mediana	2,34	819,0	5
Mínimo	1,52	532,0	4
Máximo	3,56	1246,0	6

Grupo 2b.1 - LIMAS TWISTED FILE (40°):

Tabla 5.- Muestra los tiempos y ciclos hasta que se produjo la fractura del instrumento Twisted File en conductos con curvaturas de 40°, como así también el nivel de fractura (mm).

RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS TWISTED FILE A LA FRACTURA			
• Curvatura: 40°			
MUESTRA	Tiempo / fractura (min)	Ciclos / fractura (a 500 rpm)	Nivel / Fractura (mm)
1	31,34	15670	8
2	23,35	11675	9
3	25,30	12650	7
4	25,03	12515	9
5	26,58	13290	9
6	40,23	20115	5
7	42,11	21055	8
8	23,15	11575	11
9	32,00	16000	9
10	19,49	9745	8
11	16,03	8015	8
12	24,16	12080	6
13	23,03	11515	9
14	46,13	23065	8
15	37,57	18785	9
Media	29,03	14517	8,2
Desv. Std.	8,86	4429,0	1,42
Mediana	25,30	12650	8
Mínimo	16,03	8015	5
Máximo	46,13	23065	11

Grupo 2b.2 - LIMAS TWISTED FILE (60°):

Tabla 6.- Muestra el tiempo y ciclos hasta que se produjo la fractura del instrumento Twisted File en conductos con curvaturas de 60°, como así también el nivel de fractura (mm).

RESISTENCIA DE LOS INSTRUMENTOS TWISTED FILE A LA FRACTURA			
• Curvatura: 60°			
MUESTRA	Tiempo / fractura (min)	Ciclos / fractura (a 500 rpm)	Nivel / Fractura (mm)
1	3,40	1700	4
2	3,05	1525	5
3	1,59	795	5
4	2,39	1195	6
5	2,39	1195	6
6	3,06	1530	4
7	2,55	1275	3
8	2,37	1185	4
9	2,35	1175	4
10	2,39	1195	4
11	2,37	1185	5
12	3,11	1555	5
13	2,40	1200	5
14	1,54	770	5
15	2,45	1225	4
Media	2,49	1247	4,6
Desv. Std.	0,51	255,5	0,83
Mediana	2,39	1195	5
Mínimo	1,54	770	3
Máximo	3,40	1700	6

ANÁLISIS COMPARATIVO:

- **TIEMPO transcurrido hasta la fractura del instrumento:**

En los gráficos de las figuras 40 y 41 se evidencia con claridad que cuanto mayor es la curvatura del conducto, más notoria es la reducción de los tiempos en el que se produce la fractura de la lima, situación que se observó tanto en las limas **PTU** como en las **TF**. Los rangos de tiempos de fractura fueron muy acotados (poca dispersión) y muy bajos en conductos con una curvatura de 60°, mientras que en conductos con curvaturas de 40°, los tiempos promedios hasta la fractura fueron aproximadamente 12 veces mayores que los registrados en conductos con curvatura de 60°, aunque las dispersiones de valores de resistencia estructural fueron más altos en limas que trabajaron en conductos de 40° de curvatura, particularmente en el grupo del sistema **PTU**, ya que en él se registraron los tiempos más prolongados hasta que se produjo la fractura del instrumento.

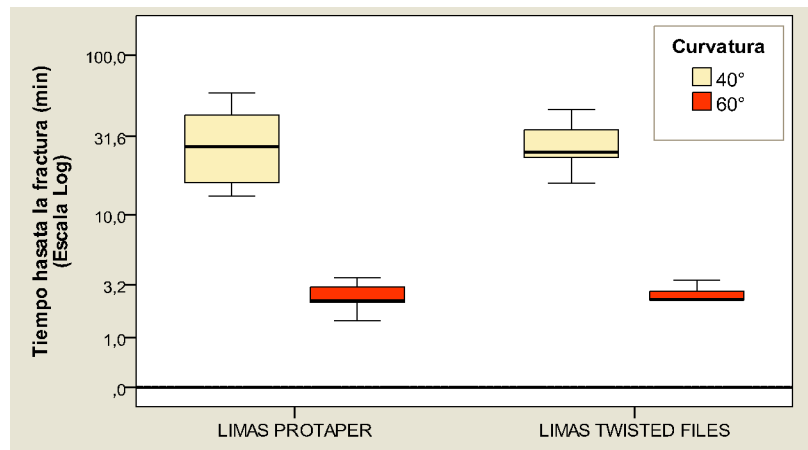


Fig. 40.- Distribuciones de valores de tiempos hasta la fractura según tipo de lima y grado de curvatura. En cada subgrupo, la línea central representa a la mediana, la caja rectangular abarca al 50% de los datos más centrales (2° y 3° cuartil), los bigotes representan a los valores mínimos y máximos y los círculos valores atípicos.

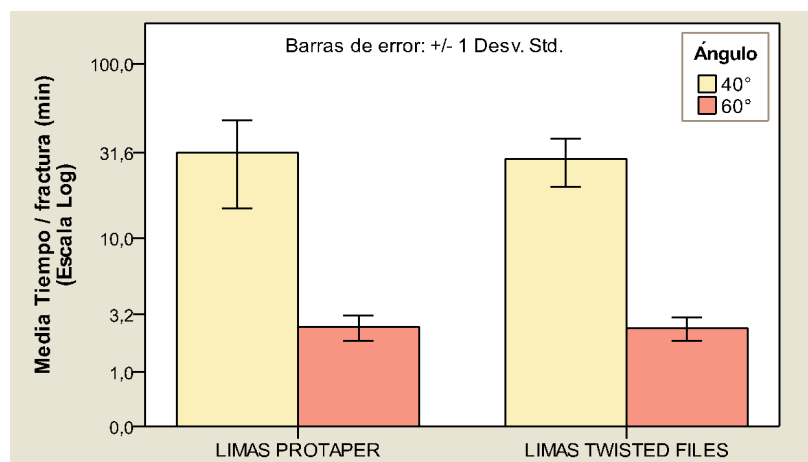


Fig. 41.- Tiempo hasta la fractura según tipo de lima y grado de curvatura: Media \pm σ . Análisis mediante Modelo Lineal General Univariante (ANOVA factorial univariante)

Para evaluar la influencia de los factores “ángulo de curvatura” y “sistema de limas” sobre el tiempo de duración de los instrumentos hasta el momento de su fractura, se utilizó un modelo lineal general univariante (Tabla 7). Este modelo proporciona tanto un análisis de varianza como un análisis de regresión para una variable dependiente considerando uno o más factores o variables. Los factores dividen la población en grupos, pudiéndose contrastar hipótesis nulas sobre los efectos de otras variables en las medias de varias agrupaciones de una única variable dependiente. Se pueden investigar las interacciones entre los factores así como los efectos de los factores individuales:

Variable dependiente:

- **Tiempo hasta la fractura**

Variables independientes o factores:

- **Ángulo de curvatura** (40°, 60°)
- **Grupo** (Limas PTU; Limas TF)

Tabla 7.- Pruebas de los efectos inter-sujetos. De izquierda a derecha: Fuente u origen del efecto (factor); Estadístico de Fisher (F); significación estadística (p-valor) y abajo el determinante R².

Origen (fuente del efecto)	F	Sig. (p-valor)
Grupo	0,31	0,58
Ángulo	131,11	<0,01
Grupo * Ángulo	0,29	0,59
R ² = 0,702 (R ² corregida = 0,686)		

Según los resultados obtenidos en este análisis, sólo el ángulo de curvatura fue una fuente de efecto significativo sobre el tiempo de duración del instrumento ($p < 0,05$). En cuanto al factor grupo o sistema de limas no resultó significativo respecto al tiempo de resistencia a la rotura ($p > 0,05$). Tampoco se verificó interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo; $p > 0,05$).

El determinante R² indica el nivel de ajuste del modelo planteado (68,6%), siendo el porcentaje restante atribuible al error experimental, que constituye la fuente de variación que aglutina a todos los componentes no controlados dentro del modelo de clasificación experimental.

Como complemento y resumen de lo analizado, en la Fig. 42 se presenta el gráfico de perfil de medias.

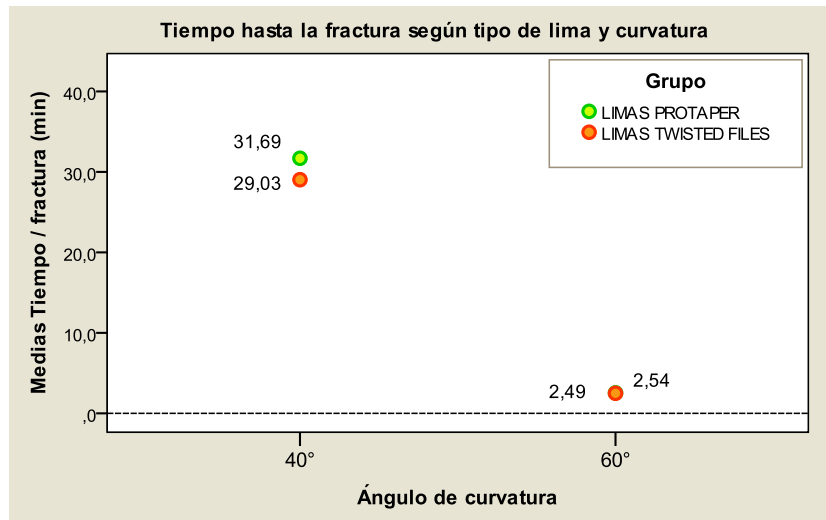


Fig. 42.- Tiempo de duración del instrumento hasta la fractura del instrumento según grupo y curvatura. Los valores expresan las medias de cada grupo.

- **NÚMERO de CICLOS registrados hasta la FRACTURA del instrumento (NCF)**

En los gráficos de las figuras 43 y 44, se observa una marcada disminución de la cantidad de ciclos completados hasta el momento de la fractura tanto en limas PTU como en TF ensayadas en conductos con curvaturas de 60°. En este caso, también las dispersiones de valores de los ciclos fueron mayores en limas que trabajaron en conductos de 40° de curvatura en ambos sistemas. El grupo TF (40°) sumó mayor cantidad de ciclos que el resto de los grupos.

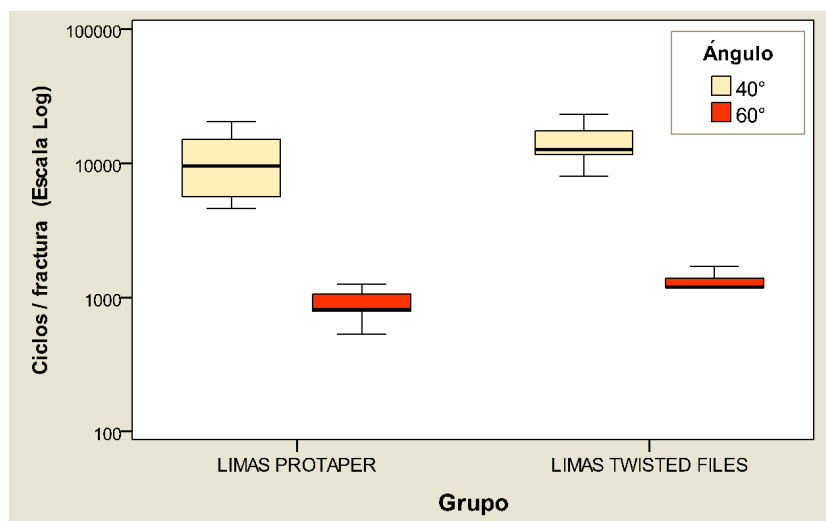


Fig. 43.- Distribuciones de valores de número de ciclos hasta la fractura según tipo de lima y grado de curvatura. En cada subgrupo, la línea central representa a la mediana, la caja rectangular abarca al 50% de los datos más centrales (2° y 3° cuartil), los bigotes representan a los valores mínimos y máximos y los círculos valores atípicos.

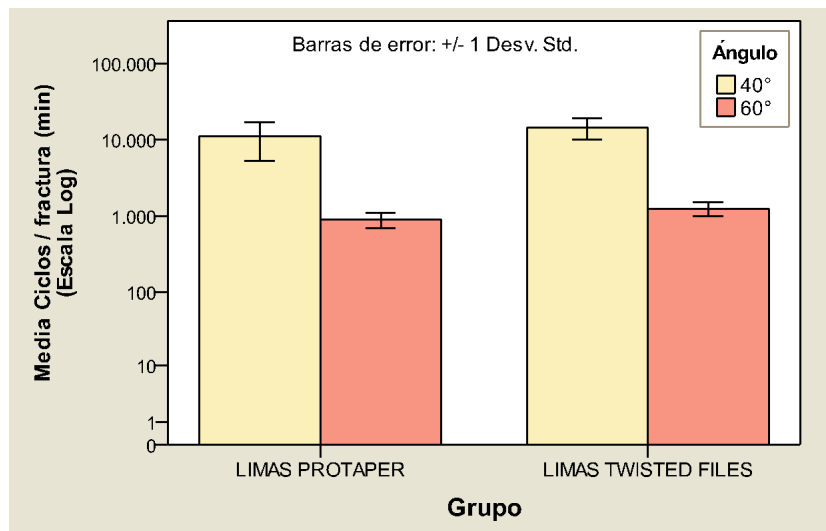


Fig. 44.- Número de ciclos hasta la fractura según tipo de lima y grado de curvatura: Media $\pm \sigma$.

Análisis General Univariante

Para evaluar la influencia de los factores “ángulo de curvatura” y “sistema de limas” sobre la cantidad revoluciones o ciclos de los instrumentos hasta el momento de su fractura, se utilizó un modelo lineal general univariante semejante al utilizado en la sección anterior para evaluar la variable tiempo (Tabla 8).

Variable dependiente:

- **Ciclos hasta la fractura**

Variables independientes o factores:

- **Ángulo de curvatura** (40°, 60°)
- **Grupo** (Limas Protaper U; Limas Twisted Files)

Tabla 8.- Pruebas de los efectos inter-sujetos. De izquierda a derecha: Fuente u origen del efecto (factor); Estadístico de Fisher (F); significación estadística (p-valor) y abajo el determinante R^2 .

Origen (fuente del efecto)	F	Sig. (p-valor)
Grupo	4,01	0,05
Ángulo	154,46	<0,01
Grupo * Ángulo	2,64	0,11
$R^2 = 0,742$ (R^2 corregida = 0,728)		

De acuerdo a los resultados del análisis realizado, sólo el ángulo de curvatura fue una fuente de efecto significativo respecto al número de ciclos del instrumento antes de fracturarse ($p < 0,05$). En cuanto al factor grupo o sistema rotatorio, el p-valor o nivel de significación estadística de la prueba fue de 0,05; exactamente igual al límite de

significación estadística fijado, por tanto, se sugiere aceptar la hipótesis nula ya que por rigurosidad científica, el valor de p no es menor a 0,05 ($p=0,05$), aunque la tendencia muestra que las limas Twisted File soportaron mayor cantidad de ciclos antes de la fractura. La interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo) no resultó significativa ($p=0,110$; $p>0,05$).

El determinante R^2 indica el nivel de ajuste del modelo planteado (72,8%), siendo el porcentaje restante atribuible al error experimental, que constituye la fuente de variación que aglutina a todos los componentes no controlados dentro del modelo de clasificación experimental.

Como complemento y resumen de lo analizado, en la Fig. 45 se presenta el gráfico de perfil de medias.

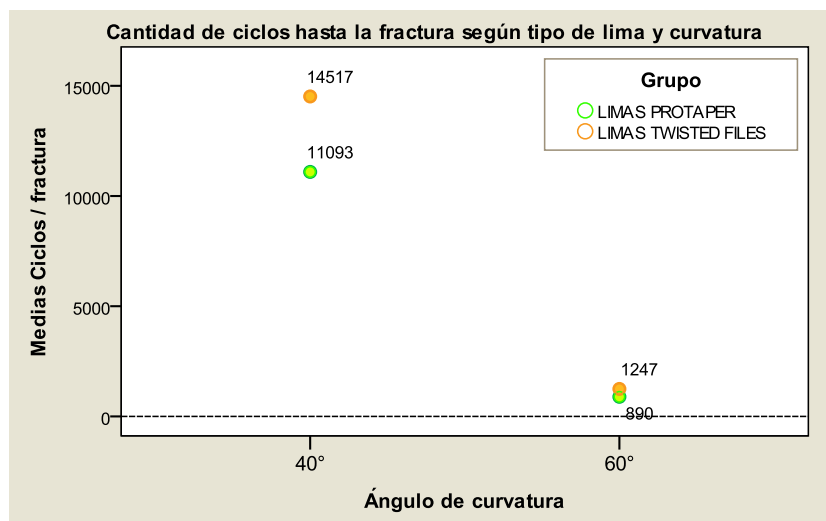


Fig. 45.- Ciclos hasta la fractura del instrumento según grupo y curvatura. Los valores expresan las medias de cada grupo.

- **Nivel de la fractura: Longitud del fragmento del instrumento fracturado**

En la Fig. 46 se puede observar que el grupo de limas TF (40°) se diferenció del resto de los grupos. En este Grupo (2b-1), la longitud media de los fragmentos fue más larga que en los demás, que como se recordará, fue en el que los instrumentos más ciclos cumplieron. En conductos con curvaturas de 60° los niveles de fractura, en ambos sistemas, fueron similares.

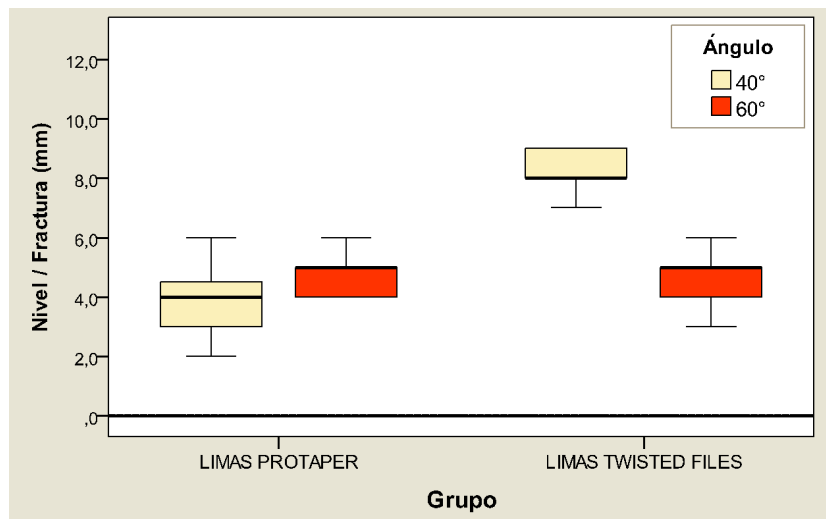


Fig. 46.- Distribuciones de valores de longitud del fragmento fracturado según tipo de lima y grado de curvatura. En cada subgrupo, la línea central representa a la mediana, la caja rectangular abarca al 50% de los datos más centrales (2° y 3° cuartil), los bigotes representan a los valores mínimos y máximos y los círculos valores atípicos. Análisis General Univariante.

Para evaluar el grado de influencia que los factores “ángulo de curvatura” y “sistema de limas” tuvieron sobre el nivel de la fractura o longitud del fragmento fracturado, también se utilizó un modelo lineal general univariante (Tabla 9).

Variable dependiente: **Nivel de la fractura (longitud del fragmento fracturado)**

Variables independientes o factores: **Ángulo de curvatura** (40°, 60°) y **Grupo** (Limas Protaper U; Limas Twisted Files)

Tabla 9.- Pruebas de los efectos inter-sujetos. De izquierda a derecha: Fuente u origen del efecto (factor); Estadístico de Fisher (F); significación estadística (p-valor) y abajo el determinante R^2 .

Origen (fuente del efecto)	F	Sig. (p-valor)
Grupo	64,92	<0,01
Ángulo	24,31	<0,01
Grupo * Ángulo	64,92	<0,01
$R^2 = 0,734$ (R^2 corregida = 0,719)		

De acuerdo a los resultados del análisis univariante, los dos factores (ángulo de curvatura y grupo) fueron fuentes de efecto significativo sobre la longitud del fragmento fracturado ($p < 0,05$). Nótese que la interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo) también resultó significativa ($p < 0,05$), lo que indica que la curvatura del conducto generó respuestas que difieren en ambos sistemas de limas en relación a la localización de la fractura, ya que las longitudes de los trozos en las limas TF fueron, según la curvatura del conducto, muy diferentes entre sí, mientras que en las

limas PTU las longitudes fueron similares cualquiera fuera el grado de la curvatura (Fig. 46 y 47).

El determinante R^2 indica el nivel de ajuste del modelo planteado (71,9%), siendo el porcentaje restante atribuible al error experimental, que constituye la fuente de variación que aglutina a todos los componentes no controlados dentro del modelo de clasificación experimental.

Como complemento y resumen, en la Fig. 47 se presenta el perfil de medias.

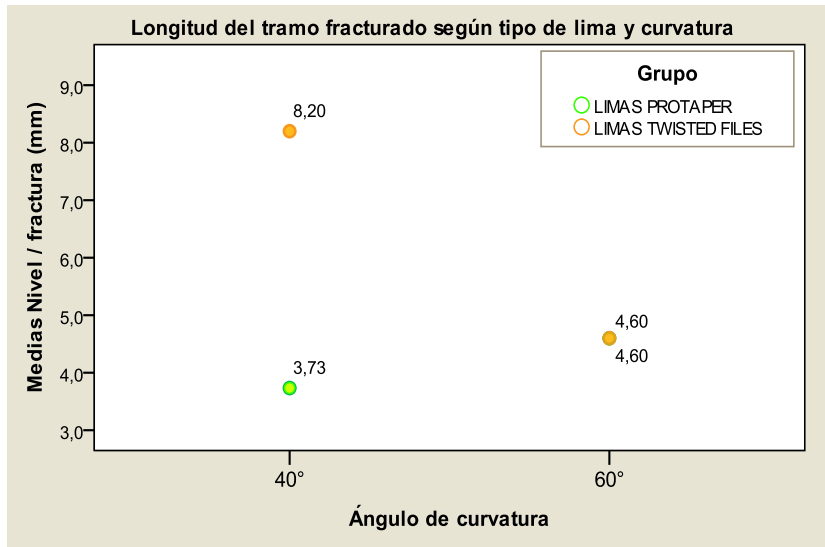


Fig. 47.- Medida del fragmento fracturado. Valores de la medias según grupo y curvatura.

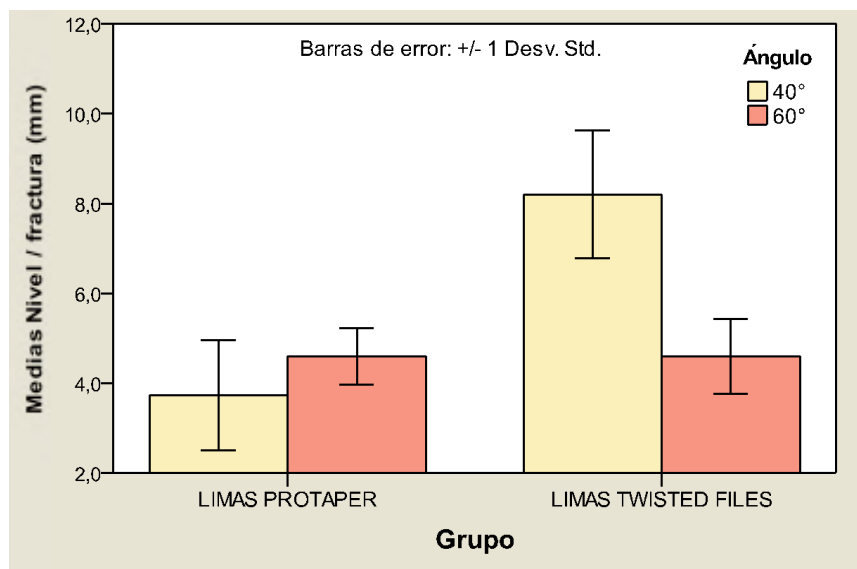


Fig. 48.- Medida del fragmento fracturado según tipo de lima y grado de curvatura: Media $\pm \sigma$.

Análisis Complementario

Correlación entre el número de ciclos y el nivel de fractura (longitud del fragmento).

Como se observa en el gráfico de dispersión (Figuras 49 y 50), la tendencia en ambos sistemas de limas indica una disminución de la longitud de los fragmentos cuanto mayor es la cantidad de ciclos (ver las líneas de ajuste o tendencias), aunque sólo en el Grupo de limas Protaper se verificó una correlación estadísticamente significativa entre estas dos variables (Correlación de Pearson: valor=-0,598; $p=0,019$; $p<0,05$).

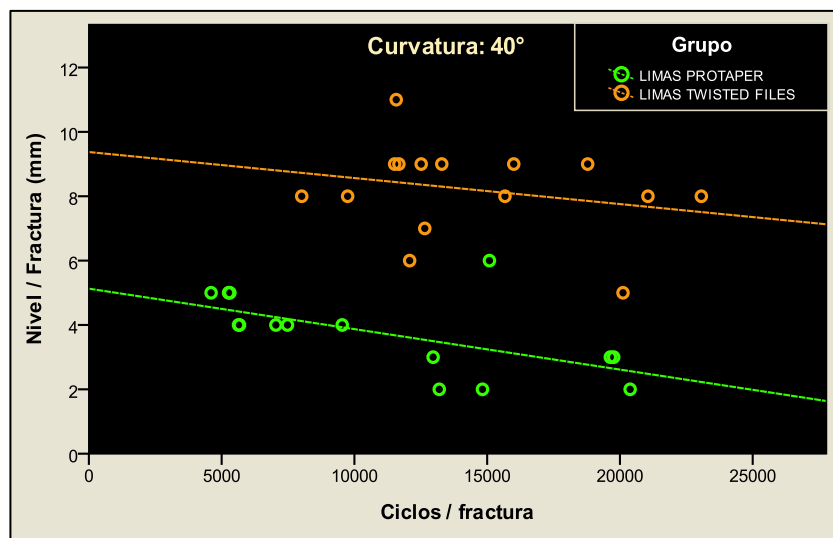


Fig. 49.- Correlación entre longitud del fragmento fracturado y los ciclos según grupo en limas con curvatura de 40°.

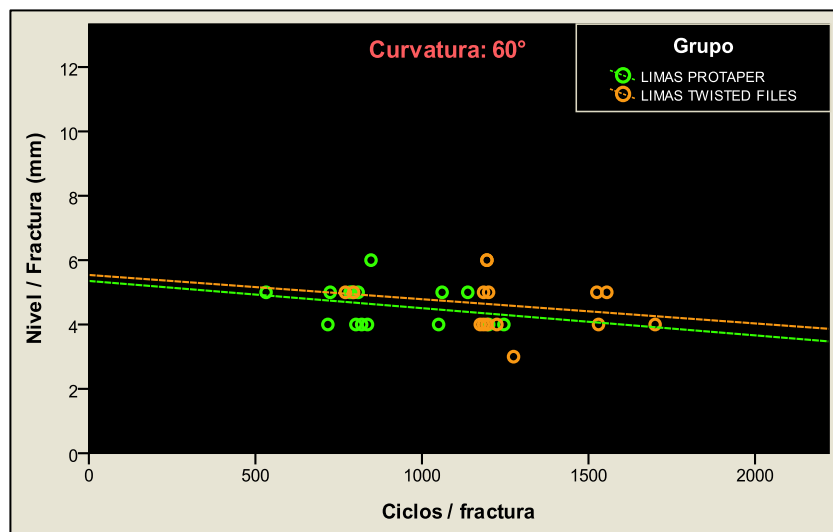


Fig. 50.- Correlación entre longitud del fragmento fracturado y los ciclos según grupo en limas con curvatura de 60°.

Como puede observarse, el resultado de la prueba de correlación es idéntico al obtenido al considerar los ciclos realizados hasta la fractura, esto se debe a que ambas variables son linealmente dependientes, pero si se presta atención, las figuras 51 y 52 difieren no sólo en la escala, sino también en las distribuciones relativas según sistema de limas, ya que las velocidades de giro en ambos sistemas eran diferentes.

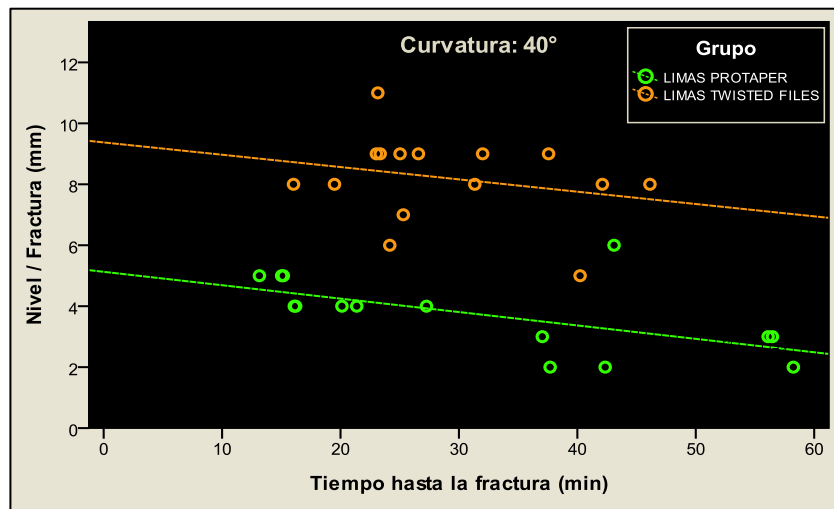


Fig. 51.- Correlación entre longitud del fragmento fracturado y el tiempo hasta la fractura según grupo en limas con curvatura de 40°.

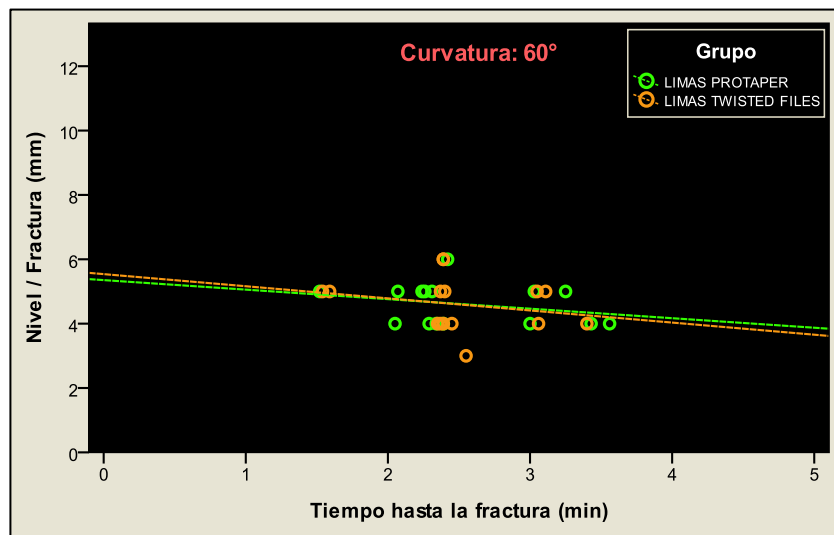


Fig. 52.- Correlación entre longitud de tramo fracturado y el tiempo hasta la fractura según grupo en limas con curvatura de 60°.

ESTUDIO 3:**ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE LOS INSTRUMENTOS**

Se efectuó bajo tres aspectos:

3.a.- Evaluación de la superficie externa de los instrumentos vecinas a la fractura.

3.b.- Evaluación de la superficie de fractura.

3.c.- Correlación entre el tiempo de fractura y las condiciones mecánicas para los instrumentos PTU y TF.

Los análisis se realizaron con alta resolución (FEG - SEM - Ultra Plus; Carl Zeiss, Alemania) perteneciente al Laboratorio de Microscopía electrónica y Análisis por Rayos X (LAMARX) de la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF) de la Universidad Nacional de Córdoba, y se efectuaron sobre instrumentos Protaper Universal (PTU) y Twisted File (TF) que previamente se ensayaron mecánicamente hasta su rotura en las condiciones que se detallan en el estudio 2, lo que permitió determinar el tipo o modo aparente de fractura y su posible mecanismo para cada caso.

Con el mismo microscopio y enfocado en algunos detalles microestructurales asociados al modo de fractura observado, se efectuó un análisis de composición a partir de espectros de Rayos X y se estimó el porcentaje de elementos químicos presentes. Las imágenes se obtuvieron mediante un detector de electrones secundarios con voltaje de aceleración de 10,00 kV.

3.a.- EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE EXTERNA DE LOS INSTRUMENTOS VECINAS A LA FRACTURA.

Se realizó en base a la clasificación utilizada en los estudios precedentes y tuvo como fin establecer, en instrumentos fracturados, la presencia de defectos en áreas de la superficie externa del instrumento adyacente a la superficie de fractura en limas de ambos sistemas analizados, considerando el grado de curvatura de los conductos (40° y 60°) donde se produjo la fragmentación.

Un minucioso examen con MEB de dichas áreas permitió establecer, a través de la presencia de ciertos defectos, la posible causa que originó la fractura del instrumento, como así también, aspecto del mecanismo de la misma.

Consideraciones generales

Los instrumentos analizados en este estudio son de NiTi súper elásticos. Fueron ensayados de manera tal que trabajaron curvados y rotando dentro de un tubo curvo, por lo tanto, estuvieron expuestos de manera permanente a esfuerzos de torcimiento y a una tensión-compresión cíclica debido a la flexión por curvado.

Cabe recordar que el área de la sección transversal de la lima decrece hacia la punta, motivo por el cual, el estado de tensiones se maximiza cerca del punto medio del arco de curva y no justo en él, aún así, la tensión máxima crece cuando decrece el diámetro.

En la Fig. 53 se muestran las imágenes de la superficie externa del sector vecino a la fractura de distintos instrumento del sistema PTU fracturados en conductos con curvaturas de 40°. Se ve claramente que las líneas de maquinado son perpendiculares al filo del instrumento y que existen pequeños microcracks (señalados por flechas negras) sobre el filo del mismo, que pueden ser preexistentes a la fractura o formados por efecto de la torcedura-flexión nucleando defectos preexistentes aún más diminutos.

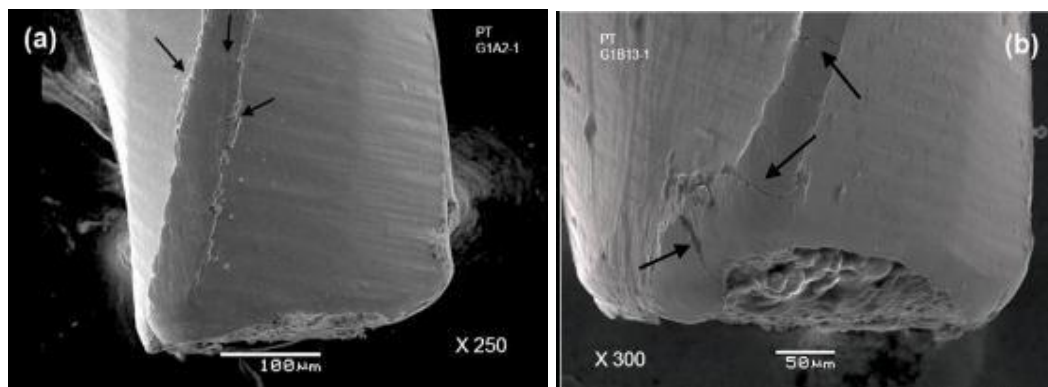


Fig. 53.- Limas PTU fracturadas (40°). Las flechas señalan la presencia de microcraks

En la Fig. 54, también correspondiente a un instrumento del sistema PTU que en este caso se fracturó curvado a 60°, la situación se exagera y se ve cómo los microcracks se han convertido en microgrietas secundarias a la fractura. En la Fig. 55 se aprecia con mayor amplitud la imagen 54. Esta evidencia permite sugerir que estos defectos son los responsables del inicio de la fractura por fatiga cíclica en instrumentos del sistema PTU.

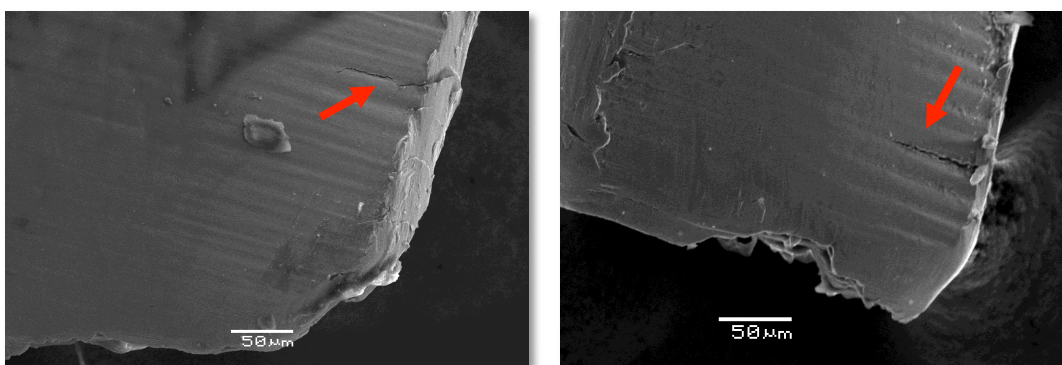


Fig. 54.- Las flechas rojas señalan la presencia de fisuras en limas PTU luego de su fractura en conductos con 60° de curvatura, coincidentes con las líneas de maquinado.

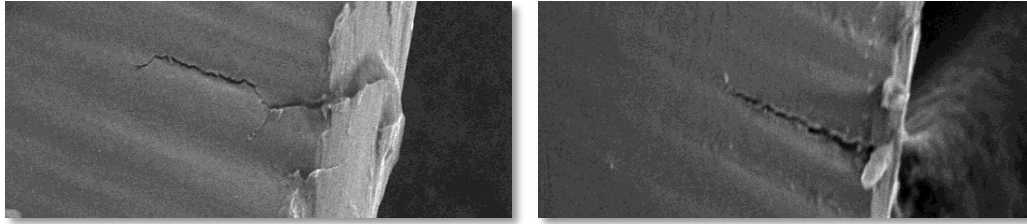


Fig. 55.- Limas PTU. Particular de las imágenes de la Fig. 54. En ambas se observa la presencia de fisuras donde se aprecia con claridad su coincidencia con una estría o surco de maquinado.

La Fig. 56 corresponde a una lima del sistema TF que se fracturó curvado a 40°. En ella se puede apreciar con claridad que las líneas de maquinado son axiales y que existen pequeños microcracks y abundantes poros (señalados por flechas negras) entre las líneas mencionadas. No se observan microcracks sobre el filo de la lima.

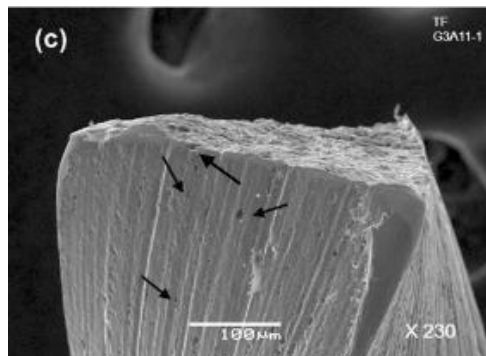


Fig. 56.- Área vecina a la fractura de un instrumento TF fracturado en curvas de 40°. Las líneas de maquinado son axiales. Existen abundantes poros (flechas) entre las líneas mencionadas. No se observan microcracks sobre el filo de la lima.

En la Fig. 57, correspondiente también al sistema TF que se fracturó curvado a 60°, se ve cómo se formaron sobre el filo, por efecto de una mayor concentración de tensiones por la torcedura-flexión, pequeños cracks secundarios de fractura (Flechas negras y rojas).

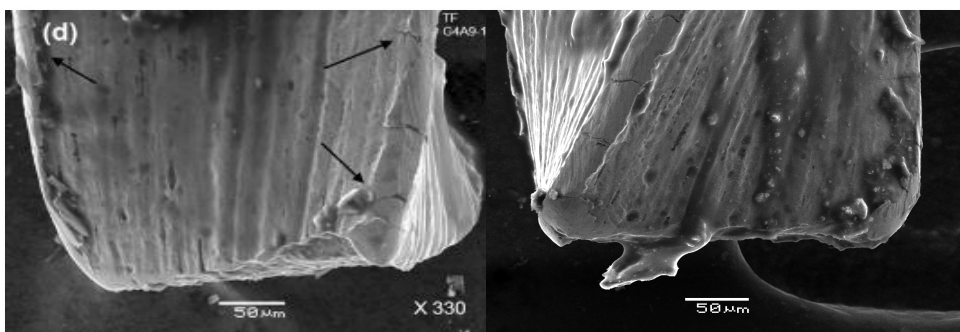


Fig. 57.- Área vecina a la fractura de un instrumento TF fracturado en curvas de 60°. Las flechas señalan pequeños cracks secundarios sobre los fillos.

Esta evidencia permite concluir que los defectos de maquinado para el sistema PTU y además los poros para el sistema TF, son los responsables del inicio de la fractura por fatiga cíclica. Por otra parte, el sistema TF requiere una mayor concentración de tensiones (menor radio de curvatura) para que se generen microgrietas visibles sobre el filo, lo que permite concluir que el sistema TF es más tenaz que el sistema PTU.

Ésta última observación es coherente con la resistencia a la fatiga de estos sistemas medida mediante el registro del número de ciclos o del tiempo transcurrido hasta la fractura.

Para muchos instrumentos la fractura del metal se inicia, preferentemente, en sitios cercanos a los vértices de la superficie del plano triangular de la fractura que coinciden con los filos del instrumento. En la Fig. 58 se aprecia que este plano es triangular convexo en las limas del sistema PTU y triangular plano en las del sistema TF, y en todos los casos resultó transversal al eje del instrumento. Por otra parte, los lados de este plano que como se dijo es triangular, miden aproximadamente 200 μm . Ese aspecto de las dimensiones de la lima es algo a tener en cuenta, porque en el volumen del sector final del instrumento que es cónico, podría alojarse una inclusión de tamaño semejante al plano de fractura y, entonces, la performance del instrumento podría verse afectada.

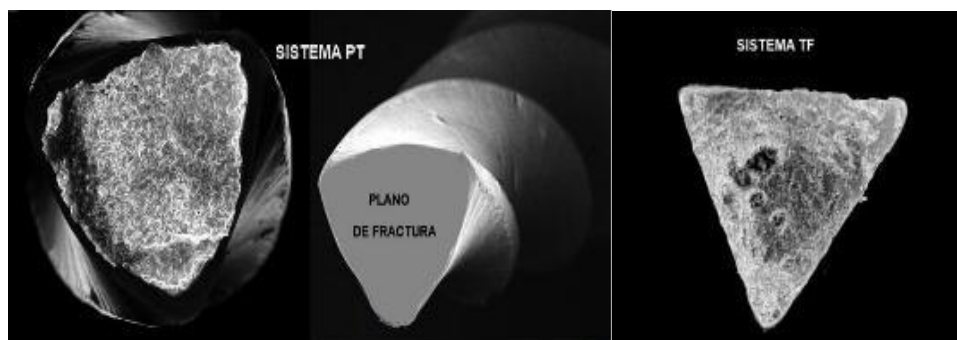


Fig. 58.- Plano de fractura del instrumento endodóntico cónico de aleación NiTi correspondiente a los sistemas Protaper Universal (PTU) y Twisted Files (TF).

Otra consideración importante que muestra este estudio y lo comparte con Kim y col.⁵⁶ y que se evidencia en la observación de los instrumentos fracturados y expresado en las figuras anteriores, es que *una deformación plástica macroscópica anterior a la rotura es imperceptible*, en contraposición a lo que ocurre con las limas usadas que se van deformando plásticamente por el uso antes de fracturarse.

3.b.- EVALUACIÓN DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA (Estudio fractográfico).

En algunos de los instrumentos estudiados, la fractura fue predominantemente frágil, en otros predominantemente dúctil y en otros una mezcla de ambas.

Para realizar el análisis de las fracturas, las muestras compuestas por limas de los sistemas PTU y TF se reunieron siguiendo la notación de capítulos anteriores:

- 1) GRUPO 2A.1: Sistema PTU ensayado hasta fractura a 350 rpm flexionado 40°.
- 2) GRUPO 2A.2: Sistema PTU ensayado hasta fractura a 350 rpm flexionado 60°.
- 3) GRUPO 2B.1: Sistema TF ensayado hasta fractura a 500 rpm flexionado 40°.
- 4) GRUPO 2B.2: Sistema TF ensayado hasta fractura a 500 rpm flexionado 60°.

Limas PT: Grupo 2A.1: Primer subgrupo Muestras 2, 3, 9 y 11.

En este grupo se observaron distintos comportamientos, tan así que se puede diferenciar un subconjunto de muestras dónde la fractura es parcialmente dúctil y frágil con una región de inicio dónde se define la propagación de la grieta por fatiga de manera tradicional, mientras que en el otro subgrupo, la fractura es preponderantemente frágil y la región de inicio y propagación de la grieta por fatiga no se define claramente o se manifiesta con componentes frágiles.

La fractura que es parcialmente frágil y dúctil se inicia sobre las esquinas dónde existen imperfecciones de maquinado e inclusiones (Fig. 59). La imagen muestra grandes zonas planas y bastante lisas en la fractura. Esto indica que aparentemente la tensión que dio inicio a la fractura es la componente de corte debido al retorcimiento de la lima, lo que produce la simple separación de una cara que se desliza respecto a la otra con el inconveniente de que este deslizamiento borra la apariencia de la falla. Los dimples que se forman sobre estas planicies no encuentran valores triaxiales de tensión y no pueden crecer plásticamente. Sin embargo, a medida que la grieta inicial de fatiga crece, algunas partículas más grandes son suficientes para desencadenar el crecimiento y coalescencia catastrófica de cavidades sin deformación plástica macroscópica asociada. Las cavidades crecen hasta la fractura por tensión-compresión, mostrando una leve geometría elíptica que evidencia que la componente de tensión cortante sigue influenciando al proceso de fractura (Fig. 60). En algunos casos la grieta inicial continúa propagándose un poco más rápido y se observan algunas facetas de “cuasiclivaje”. Sobre las facetas frágiles se observan estrías que evidencian la influencia del esfuerzo cíclico. Estas estrías son perpendiculares a la dirección de propagación de la grieta (Fig. 61).

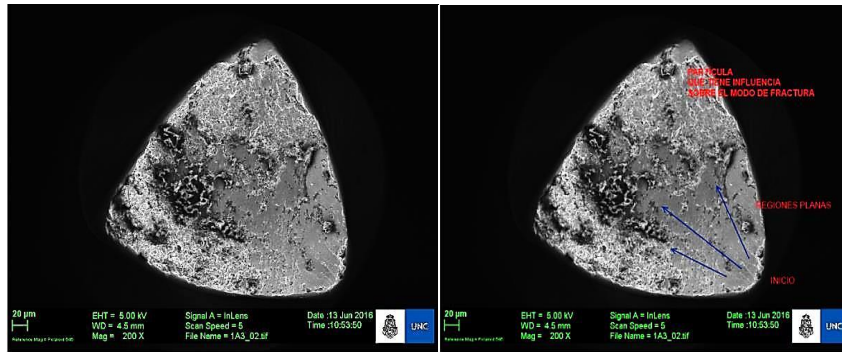


Fig. 59.- Apariencia de la superficie de fractura del 1er. subgrupo del Grupo 2A.1 (limas PTU flexionadas 40°). Inicio de la grieta por deslizamiento.

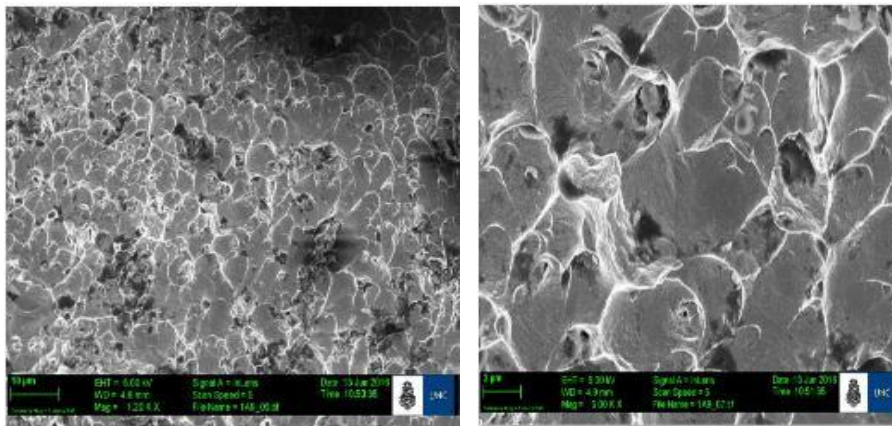


Fig. 60.- Apariencia de la superficie de fractura del 1er. subgrupo del Grupo 2A.1 (limas PTU flexionadas 40°). Región de crecimiento catastrófico de dimples con geometría levemente elíptica.

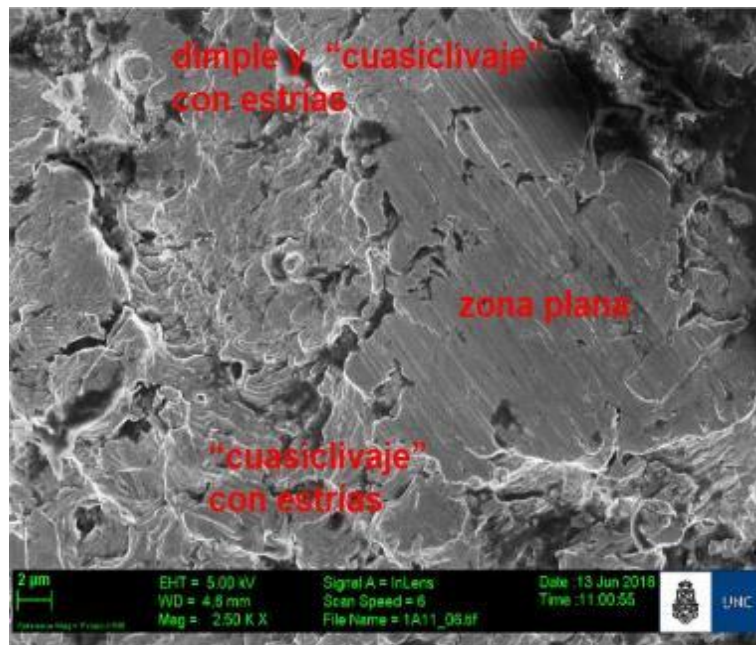


Fig. 61.- Apariencia de la superficie de fractura del 1er. subgrupo del Grupo 2A.1 (limas PTU flexionadas 40°). Detalle de zonas de dimples y "cuasiclivaje" con estrias.

Grupo 2A.1: Segundo Subgrupo - muestras 6, 7, 13, 15: La fractura es de una definición muy compleja, predominantemente frágil. Se inicia sobre las esquinas donde existen imperfecciones de maquinado e inclusiones como en el caso anterior, aparentemente sin deformación plástica previa.

En la Fig. 62 se observa un caso con el inicio simultáneo de fractura en dos esquinas del plano triangular convexo. Prestando atención se pueden apreciar los microcracks propulsores del daño. La fractura se propaga hacia el centro mayormente en forma de “cuasiclivaje” aunque muestra una compleja coexistencia de modos de fractura. La cantidad de fractura dúctil por coalescencia de pequeños dimples existe, pero es mínima. Los dimples (huecos producidos por la deformación plástica en una fractura dúctil) entrelazados con el cuasiclivaje parecen crecer más por desgarro que por tensión-compresión. Algunas facetas de la fractura muestran claramente ríos de clivaje y contienen diversas partículas que actúan como intermediarias en la propagación de la grieta. La disposición de los ríos de clivaje (paralelos y en abanico), sugiere que han actuado dinámicamente esfuerzos de corte y de torsión. La apariencia frágil de la fractura desde el inicio sugiere que la lima se sobrecargó simulando una rotura por impacto, dónde incluso podría existir fractura intergranular. Estos detalles se observan en la Fig. 63.

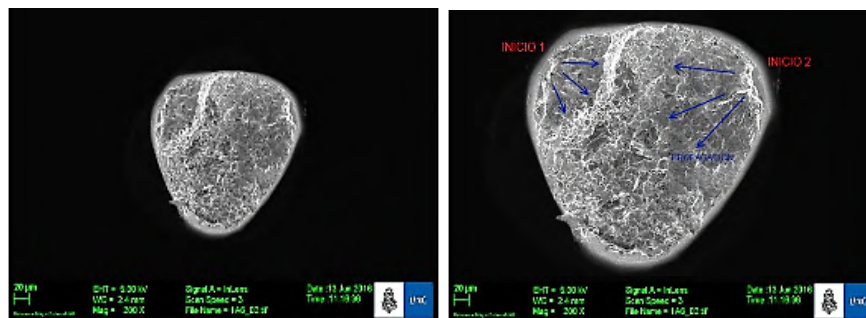
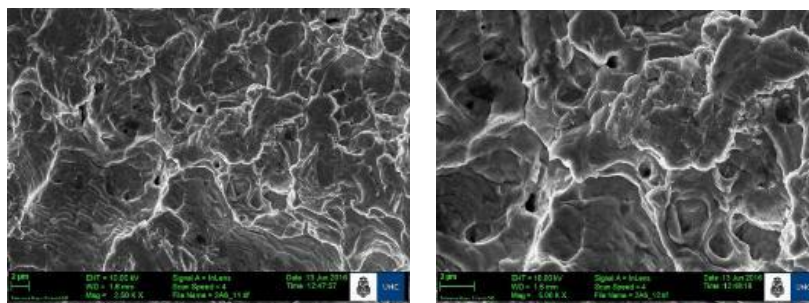


Fig. 62.- Doble inicio de fractura frágil. Apariencia de la superficie de fractura del 2do. subgrupo del Grupo 2A .1 (limas PTU flexionadas 40°).



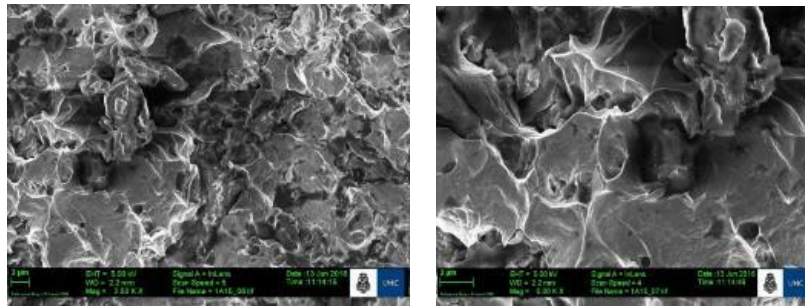


Fig. 63.- Apariencia de la superficie de fractura del 2do. subgrupo del Grupo 2A.1 (limas PTU flexionadas 40°) que muestra una compleja coexistencia de modos de fractura: clivaje, crecimiento de dimples por desgarro y posiblemente facetas intergranulares.

Grupo 2A.2: muestras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10.

La fractura es dúctil + frágil. En todas las muestras se observa el crecimiento y coalescencia de cavidades típicas de la fractura dúctil asociadas a una gran dispersión de partículas, siendo difícil encontrar el origen de la rotura, ya que puede estar en distintos puntos de la línea de maquinado paralela al plano de fractura y que le dio origen (Fig. 64). El daño se propaga por crecimiento rápido de cavidades que coexisten con pequeñas facetas de “cuasiclivaje”, crecen a expensas de una rápida y micro deformación plástica.

La forma levemente elíptica de las cavidades sugiere que ellas crecen por acción de la tracción-compresión flexiva más una componente de corte, detalle que se observa en la Fig. 65. La presencia de estrías, signo de la fatiga cíclica, se puede ver en las cavidades y en las facetas de “cuasiclivaje”, también una cavidad elíptica asociada al rompimiento dúctil (Fig.66).

La geometría de la cavidad se debe a que la sobrecarga de fractura contiene una componente de cizallamiento y el anillado al esfuerzo cíclico. En la Fig. 66 se observan las estrías transversales al crecimiento de las facetas de clivaje.

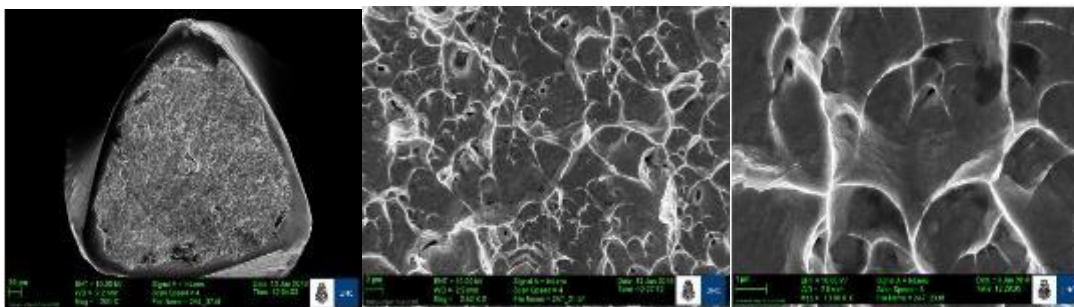


Fig. 64.- Apariencia de la superficie de fractura de muestras del Grupo 2A.2 (limas PTU flexionadas 60°).

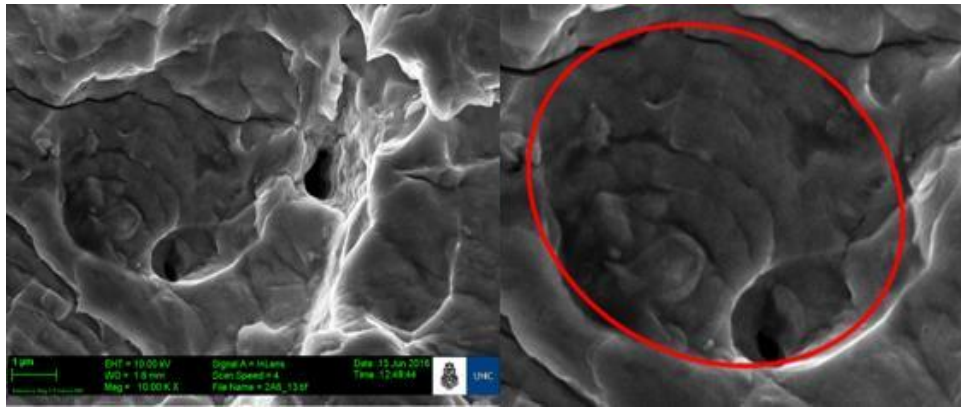


Fig. 65.- Cavity en la superficie de fractura de una muestra del Grupo 2A. 2 (limas PTU flexionadas 60°).

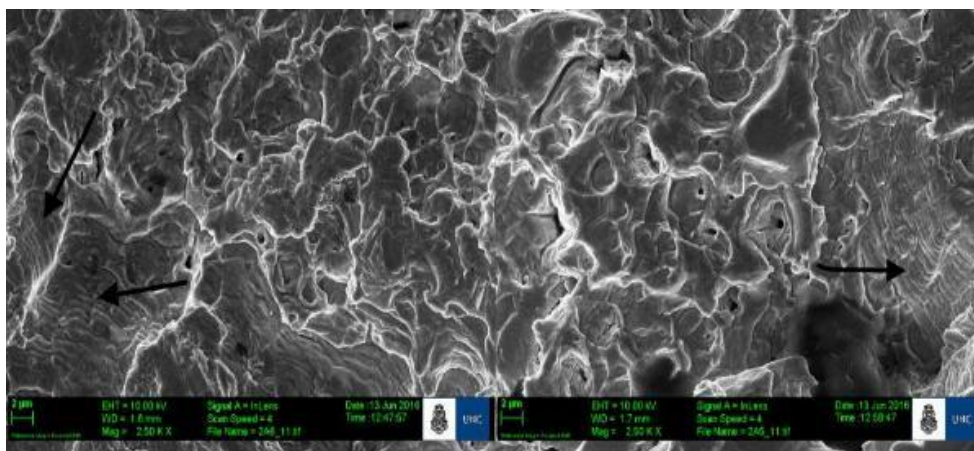


Fig. 66.- Estrías transversales al crecimiento de las facetas de clivaje en la superficie de fractura de una muestra del Grupo 2A.2 (limas PTU flexionadas 60°) (flechas negras).

La presencia de zonas de fractura frágil en las limas PTU se puede explicar por el estado triaxial de tensiones en la punta de las grietas superficiales que aparecen en estos instrumentos.

La resistencia a la fractura de un material sólido es función de las fuerzas cohesivas que existen entre los átomos. En 1920, Griffith (1921) propuso que la diferencia entre la resistencia cohesiva teórica y la resistencia a la fractura real de un material, se puede explicar por la presencia de grietas muy pequeñas (microscópicas) que siempre existen en condiciones normales en la superficie y en el interior del cuerpo del material. Estos defectos amplifican la magnitud de las tensiones aplicadas, concentradas en la punta del defecto. Esta amplificación depende de la orientación y geometría de la grieta.

En un material con una población de pequeñas grietas, de diferentes formas, geometrías y orientación, la fractura ocurrirá cuando se exceda la tensión cohesiva en las puntas del defecto. Esto lleva a la formación de una grieta que se propaga en forma rápida, con características frágiles (de clivaje).

Durante la propagación de la grieta, sucede una relajación de la energía elástica acumulada durante la deformación elástica. A medida que la grieta progresa, se crean nuevas superficies (caras de la grieta), lo que lleva a un aumento de la energía superficial del sistema. Griffith (1921) desarrolló un criterio para la propagación de una grieta haciendo un balance entre la energía elástica acumulada y la energía superficial de la grieta y llegó a definir un parámetro conocido como tensión crítica, σ_c , que indica la tensión necesaria para que una grieta se autopropague en forma frágil:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2 E \gamma}{\pi a}}$$

Donde E: es el módulo de elasticidad del material

γ : es la energía superficial específica

a: es la longitud de grieta.

La tensión en la punta de los defectos superficiales de las limas PTU, aumentadas por el efecto de concentración de tensiones por la geometría de los mismos, genera que aparezcan características frágiles en las fracturas.

Muestras de Limas TF

Grupo 2B.1: Todas las muestras

La fractura es dúctil asociada a la dispersión de partículas. Su inicio es diverso. Comienza en los bordes del plano triangular de fractura (esto es sobre un filo del instrumento), probablemente por la presencia de un poro, y se propaga hacia el interior por crecimiento de cavidades. En algunos casos el inicio de la fatiga es por tensiones de corte por el efecto de la torsión. La superficie de la fractura es compuesta por facetas planas que evidencian cómo una cara ha deslizado sobre la otra despegándose rápidamente. En otros casos inicia por cuasiclivaje, tal como se observa en la Fig. 67. Para todos los casos el modo de propagación es el crecimiento y coalescencia catastrófica de cavidades donde la pérdida de simetría de estas cavidades muestra que existe una componente de corte en la propagación de la falla (Fig. 68). En algunos casos se nota cómo la presencia de inclusiones grandes provoca un cambio en el micromecanismo de propagación formando sobre la superficie de fractura regiones menos dúctiles. Estas pequeñas regiones están compuestas por facetas de “cuasiclivaje” con estrías que, en este caso se presentan muy marcadas, más que para el sistema

PTU, lo que indica una periodicidad de tensión-compresión con amplitudes más acentuadas, lo que sugiere que el sistema TF es más flexible que el PTU, detalle que se aprecia en la Fig. 68. El tamaño microscópico, tanto de los dimples como de las facetas de cuasi clivaje, es coherente con la inexistencia de deformación plástica macroscópica.

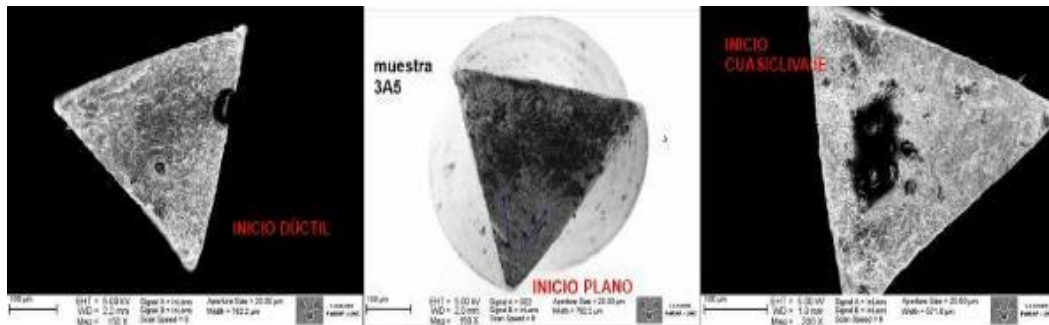


Fig. 67.- Superficie de fractura de muestras del Grupo 2B.1 (limas TF flexionadas 40°), donde se observan diversos modos de inicio de la fatiga cíclica.

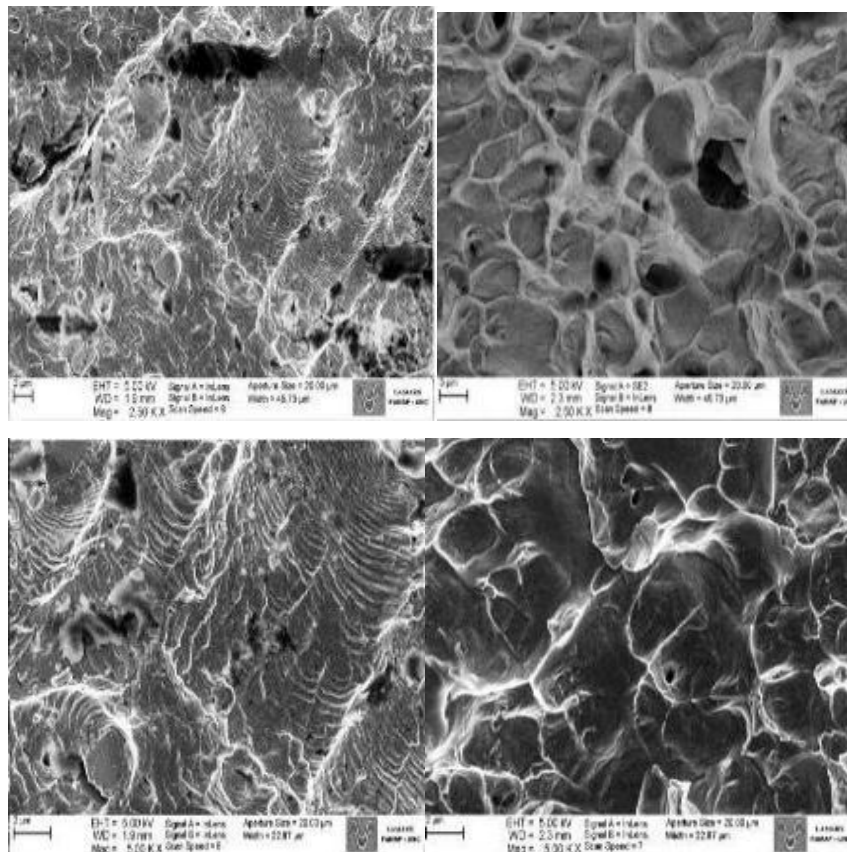


Fig. 68.- Superficie de fractura de muestras del Grupo 2B.1 (limas TF flexionadas 40°). A la derecha cavidades que han crecido hasta la ruptura, a la izquierda regiones con facetas de clivaje con estrías perpendiculares a su dirección de propagación.

Grupo 2B.2: muestras 9, 10, 12, 13 y 14

La fractura es dúctil asociada a dispersión de partículas más algún componente frágil. La fractura se inicia con facetas de cuasiclivaje. La zona de inicio es pequeña y se ubica en los vértices del plano de fractura (Fig. 69). Luego se propaga hacia el centro de modo tal que se define el crecimiento y coalescencia de dimples muy pequeños algo deformados por el retorcimiento. Estos dimples son más pequeños que en el caso anterior e indica que la micro plasticidad en este caso es menor. En algunas pequeñas regiones se observan facetas frágiles que muestran estrías de carga cíclica. Estas estrías son menos visibles que en el caso anterior. El detalle se observa en la Fig. 70.

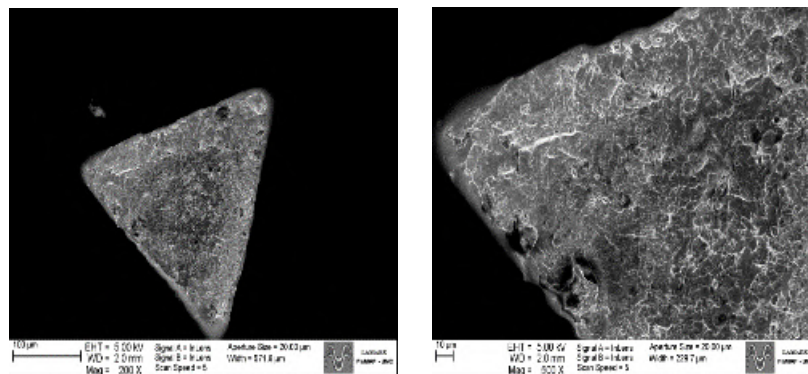


Figura 69.- Detalles de la superficie de fractura de muestras del Grupo 2B.2 (limas TF flexionadas 60°). Se muestra en particular que la zona de inicio es frágil.

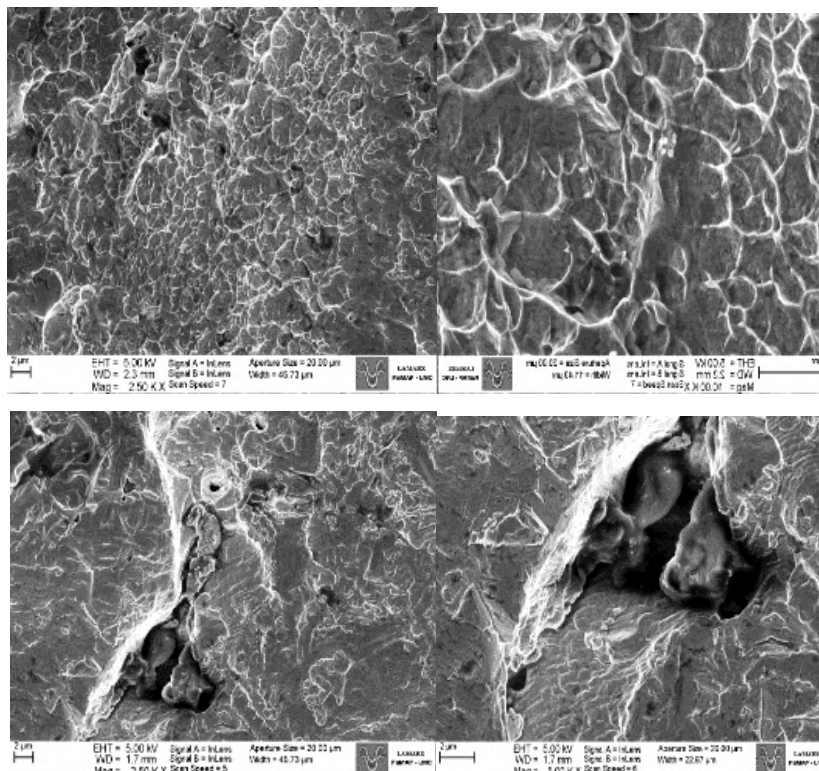


Fig. 70.- Detalles de la superficie de fractura de muestras del Grupo 2B.2 (limas TF flexionadas 60°). Dimples en la parte superior y facetas frágiles con estrías en la parte inferior.

En la **Tabla 10** se resumen aspectos referidos a la fractura del instrumento por fatiga cíclica.

Origen	Sistema	Modo fractura	Inicio de la fractura	Propagación
Sistema Protaper Universal (PTU)	PTU 40° Grupo 2A.1	Dúctil + frágil	Sobre las esquinas (filo) por acción de una tensión de corte siendo la grieta lisa y plana.	Luego de avanzar hacia el centro del plano de fractura se produce el crecimiento y coalescencia de cavidades más algo de cuasiclivaje
		Frágil	Sobre las esquinas (filo) debido a inclusiones o imperfecciones.	Desde el inicio es cuasiclivaje dónde se observan partículas que hacen de intermediarias en la propagación.
	PTU 60° Grupo 2A.2	Dúctil + frágil	No se puede localizar el inicio. Probablemente nuclean huecos asociados a partículas en distintos puntos a la vez.	Las cavidades crecen y coalescen. Se evidencia esfuerzo de corte + cíclico
Sistema Twisted File (TF)	TF 40° Grupo 2B.1	Dúctil	Sobre las esquinas (filo) de manera frágil y diversa.	Luego de avanzar hacia el centro del plano de fractura se produce el crecimiento y coalescencia de cavidades.
	TF 60° Grupo 2B.2	Dúctil + frágil	Es difícil determinar el inicio de la fractura. Probablemente se inicia cerca de las esquinas dónde existen defectos de maquinado e inclusiones.	Luego de avanzar hacia el centro del plano de fractura se produce nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades más algo de cuasiclivaje.

3-C.- CORRELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE FRACTURA Y LAS CONDICIONES DE ENSAYO MECÁNICO PARA LOS INSTRUMENTOS PTU Y TF.

Al fracturarse un material se producen dos nuevas superficies. La energía necesaria para producir estas superficies es provista por el esfuerzo externo. Esta energía mecánica se consume parte en el inicio y parte en la propagación de la grieta. Según Griffith⁷⁸ la fractura rápida ocurrirá cuando se establezca una condición crítica entre el estado de tensiones y el tamaño de una grieta preexistente o que ha crecido por el esfuerzo mecánico.

En este caso (fatiga cíclica) la energía provista por el esfuerzo externo produce un crecimiento de la rotura hasta un cierto tiempo en el que comienza la fractura rápida,

catastrófica o frágil que no consume energía. Este modo de fractura se propaga rápidamente y termina dividiendo en dos partes al material, por lo que es posible presumir una correlación entre el tiempo de rotura y los siguientes factores entre otros:

1. Tamaño de la primera etapa de la fatiga.
2. Modo de fractura.
3. Intensidad de tensiones sobre el material.

El tamaño de la primera etapa de la fatiga (inicio del rompimiento) es prácticamente imperceptible en la mayoría de los casos estudiados, aunque sí se observa, claramente, como la fractura avanza hacia el centro ya en el modo de la etapa rápida.

Como era de esperar, resulta notable la influencia de la intensidad de tensiones sobre el tiempo de rotura. No sólo se advierte la disminución de este tiempo al aumentar la flexión (tiempo medio de rotura de 30 minutos para una flexión de 40° contra un tiempo medio de rotura de 2,5 minutos para una flexión de 60°), sino también asociado al lugar dónde ocurre la fractura en cada uno de estos casos. Si suponemos que demandará un tiempo infinito romper una lima sin torcer, es coherente esperar tiempos mayores para fracturas más cercanas a la punta del instrumento. Esta tendencia se verifica en todos los casos. De las figuras 71 a la 74, se muestra esta tendencia dónde el nivel se define como la distancia entre la punta del instrumento y la fractura. El nivel se mide en mm y el tiempo a la fractura en minutos.

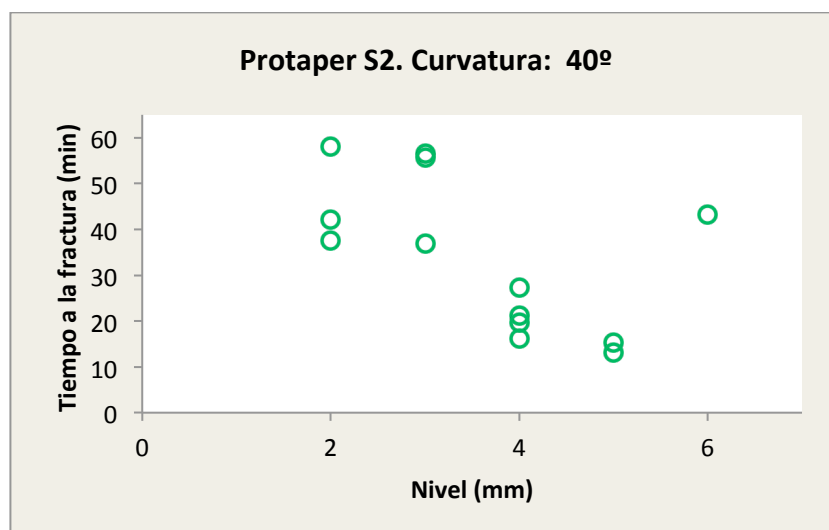


Fig. 71.- Muestra el tiempo (minutos) vs el nivel (mm), dónde se produjo la fractura de limas PTU en conductos con 40° de curvatura. El nivel está definido como la distancia entre la punta del instrumento y la fractura (mm).

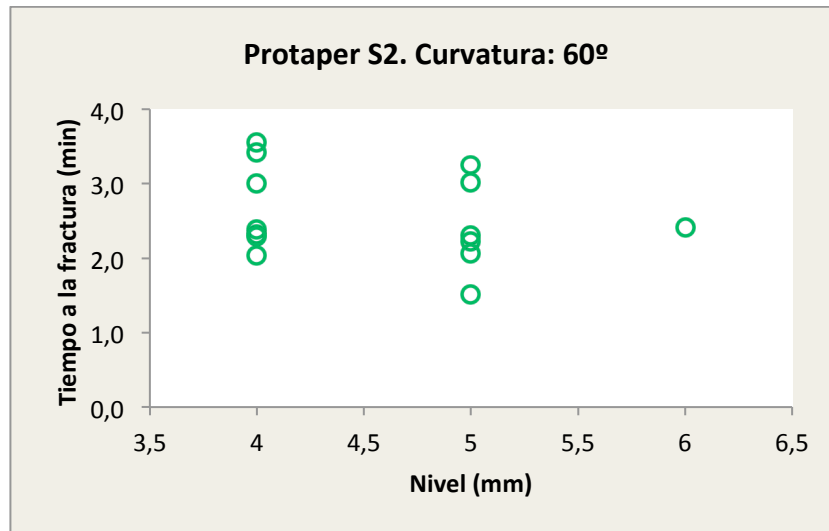


Fig. 72.- Muestra el tiempo (minutos) vs el nivel (mm), dónde se produjo la fractura de limas PTU en conductos con 60° de curvatura. El nivel está definido como la distancia entre la punta del instrumento y la fractura (mm).

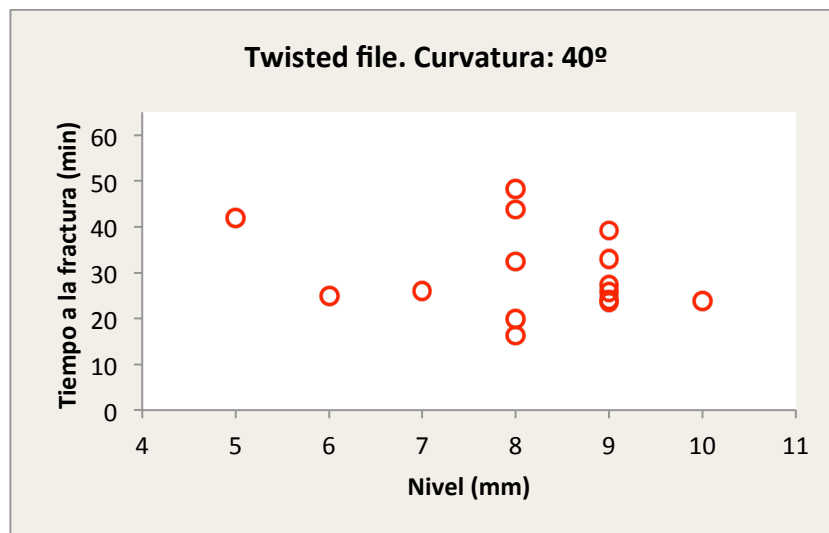


Fig. 73.- Muestra el tiempo (minutos) vs el nivel (mm), dónde se produjo la fractura del instrumento TF en conductos con 40° de curvatura. El nivel está definido como la distancia entre la punta del instrumento y la fractura (mm).

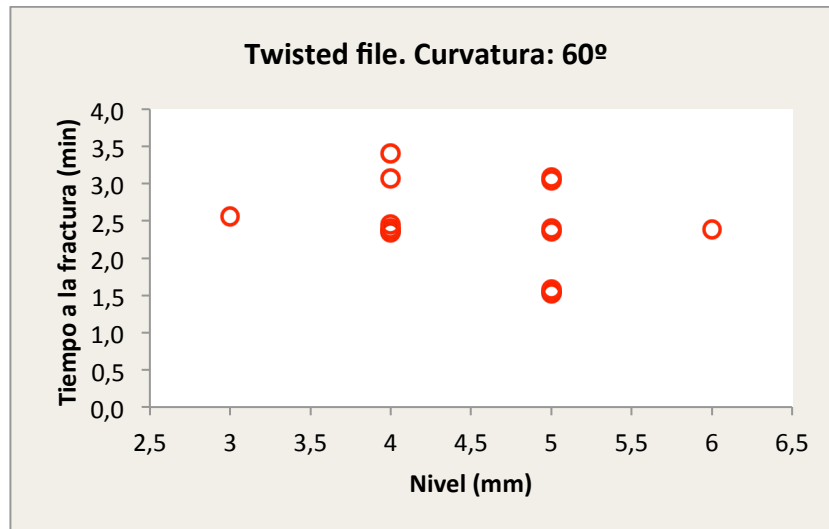


Fig. 74.- Muestra el tiempo (minutos) vs el nivel (mm), dónde se produjo la fractura del instrumento TF en conductos con 60° de curvatura. El nivel está definido como la distancia entre la punta del instrumento y la fractura (mm).

Cabe aclarar que esta tendencia es afectada por el acabado superficial de la pieza que provee los defectos iniciadores de la fractura. A decir de Griffith⁷⁸, el tiempo de fatiga está condicionado por la relación tensión – defecto. Por esta causa el sistema PTU muestra una mayor dispersión en tiempos y niveles que el sistema TF cuando el instrumento trabaja flexionado a 40°. Si la flexión es mayor, caso de 60°, la intensidad de las tensiones se incrementa a un punto tal que se uniformiza la zona de rotura e incluso el modo de fractura para ambos instrumentos.

El modo de fractura debería ser coherente con los resultados anteriores y así parece serlo según los resultados que se muestran a continuación.

Es importante aclarar que el tiempo de propagación de la fractura rápida es infinitamente menor al tiempo que demanda alcanzar ese modo. Pero se espera consistencia entre las modalidades de fractura y los distintos tiempos y niveles.

Se observó una notable dispersión sobre los tiempos que las limas PTU emplean en romperse cuando son flexionadas a 40°. En las figuras 75, 76 y 77 se muestran fracturas correspondientes a este caso. En la muestra 13 (Fig. 75), se observa un tiempo de fractura superior a los otros. Este hecho es coherente con el nivel de fractura (más cerca de la punta) que indica una intensidad de tensiones menor a los otros. La fractura es una mezcla de dúctil y frágil, siendo predominante el modo frágil en forma de cuasiclivaje. Esta apariencia de la fractura es similar a la de la muestra 7 (Fig. 76), que ocurre en un tiempo menor debido a que también el nivel es menor. Sin embargo, cuando se observa la muestra 9 (Fig. 77), se nota que la rotura, aún cuando los niveles coinciden, se produce en un tiempo considerablemente superior al de la muestra 7, lo que muestra

una mayor resistencia a la fatiga. Esta muestra parece ser más tenaz (su acabado superficial es menos defectuoso) y este hecho es consistente con el modo de romperse. En este caso (fotografía con menor aumento), se aprecia que la apariencia macroscópica tiene regiones planas consistentes con un modo de fractura distinto a los anteriores y de tipo dúctil, y que el modo de fractura rápida consiste en la nucleación y coalescencia de pequeñas cavidades. Cabe aclarar que pese a que se muestra como fractura dúctil, esta modalidad de rompimiento es rápida ya que no se aprecia una deformación plástica macroscópica.

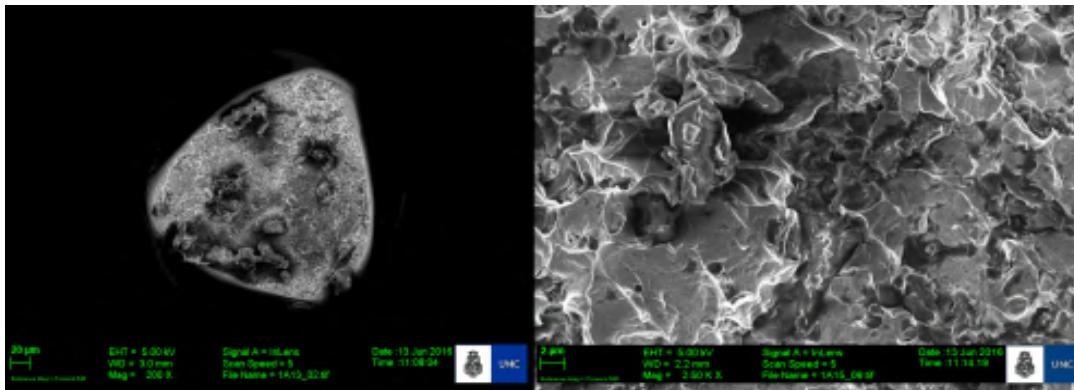


Fig. 75: Lima PTU (40°) muestra 13 tiempo 37,70 - nivel 2.

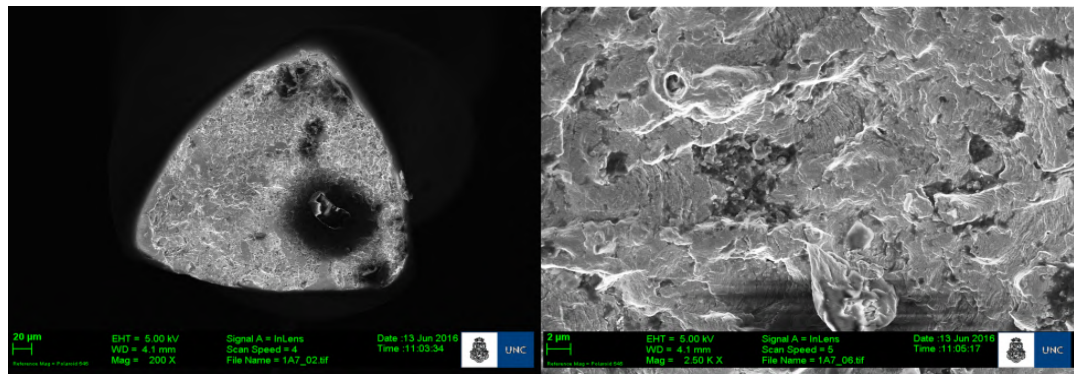


Fig. 76: Lima PTU (40°). Muestra 7. Tiempo 16,10 min. Nivel 4.

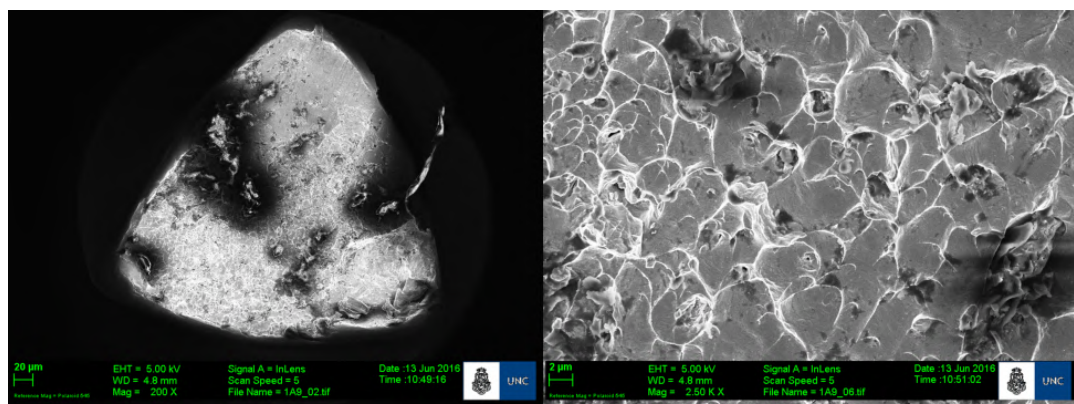


Fig. 77: Lima PTU (40°). Muestra 9. Tiempo 27,26 min. Nivel 4.

Cuando se intensifican las tensiones debido a que la lima se tuerce a un ángulo mayor, tanto los tiempos y niveles como el modo de fractura se uniformizan. Aún así, la consistencia entre tiempos, niveles y modo de fractura se mantiene. En las Fig. 78 y 79 se observa que la muestra 6 se rompe a un tiempo mayor que la muestra 9 con nivel menor y con más presencia de cavidades. Incluso se muestran más claramente estrías sobre estas cavidades o facetas del clivaje que son huellas de la tensión dinámica y cíclica que fuerzan el crecimiento de la rotura.

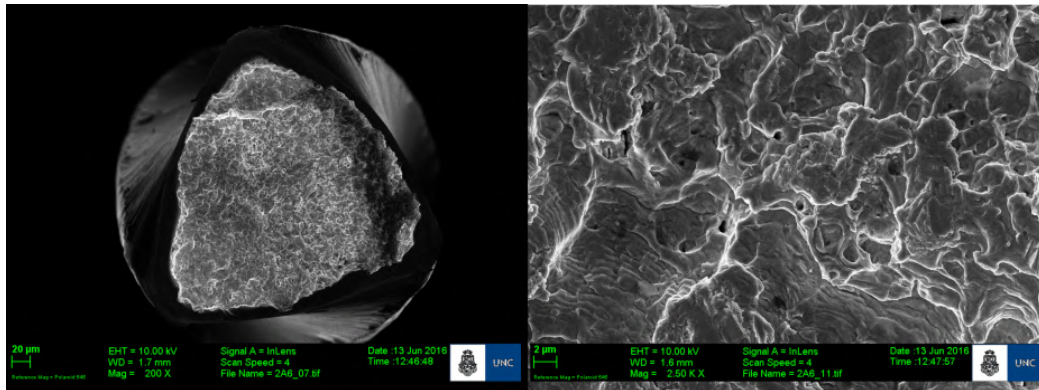


Fig. 78: PTU (60°). Muestra 6. Tiempo 3,56 min. Nivel 4.

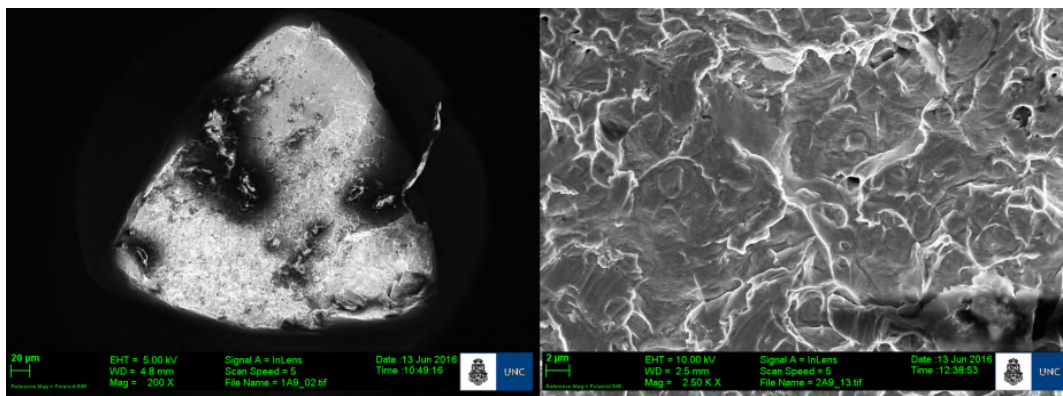


Fig. 79: PTU (60°). Muestra 9. Tiempo 2,42 min. Nivel 6.

En cuanto al tiempo de fractura e intensidad de tensiones aplicadas, los instrumentos TF muestran que su resistencia a la fatiga es similar a los de las limas PTU.

Sin embargo, en curvaturas menores (40°), las limas TF muestran menos dispersión, tanto en los tiempos de rotura como en los niveles, e incluso el nivel de fractura promedio se aleja de la punta, duplicando el valor correspondiente al instrumento PTU, hecho consistente con un acabado superficial que mejora la relación tensión – defecto necesaria para la fractura.

Cuando se flexiona a 60° y se intensifica la tensión aplicada, los instrumentos PTU y TF se comportan de manera similar.

Las Fig. 80 y 81 muestran dos fracturas de instrumentos TF flexionados a 40° que rompen a un nivel similar, pero en tiempos notablemente distintos. En este caso el factor modo de fractura influye sobre el resultado. Es claro cómo la apariencia de la fractura es mayormente dúctil para la muestra que rompe luego de un tiempo mayor, (muestra 14, Fig. 81), incluso se observan regiones planas de fractura. En la muestra 3 (Fig. 80) la fractura también es dúctil aunque algunos dimples nuclean y luego inician facetas de cuasiclívaje.

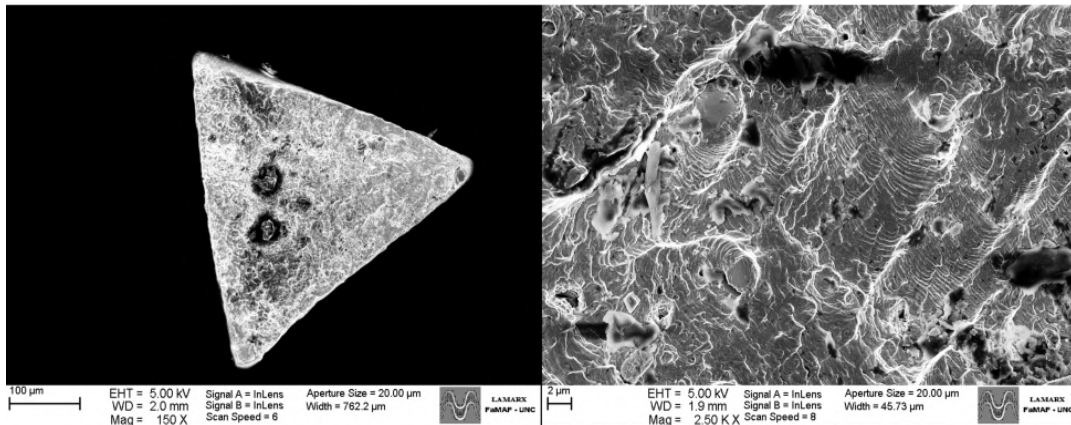


Fig. 80: TF (40°). Muestra 3. Tiempo 25,30 min. Nivel 7.

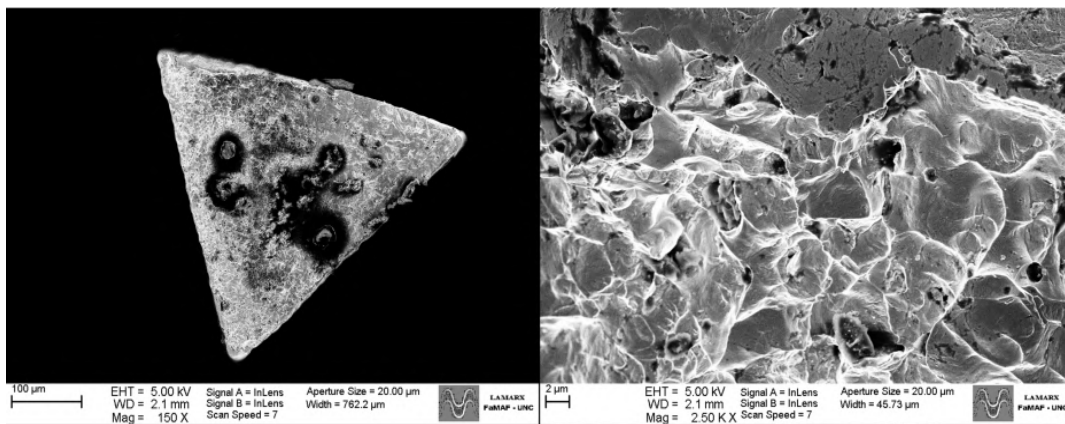


Fig. 81: TF (40°). Muestra 14. Tiempo 46,13 min. Nivel 8.

Lo mismo ocurre en muestras que se han roto flexionadas a 60°. La muestra 6 (Fig. 82) y la muestra 14 (Fig. 83) rompen a niveles similares, pero el tiempo en que rompe la muestra 6 es el doble que la muestra 14. También aquí encontramos la correspondencia con el modo de fractura asociado. En la muestra 6 se definen con claridad regiones de pequeñas cavidades que crecen y coalescen, mientras que en la muestra 14 se observan regiones de cuasiclívaje.

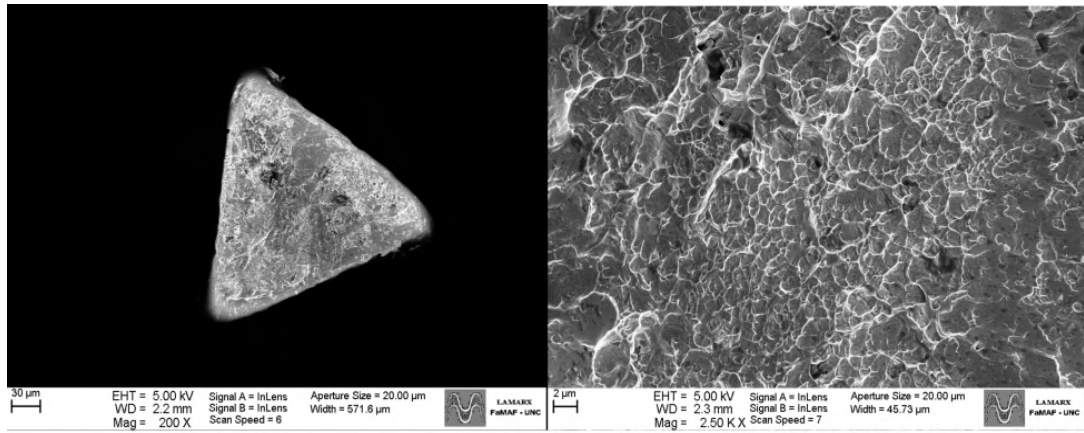


Fig. 82: TF (60°). Muestra 6. Tiempo 3,06 min. Nivel 4.

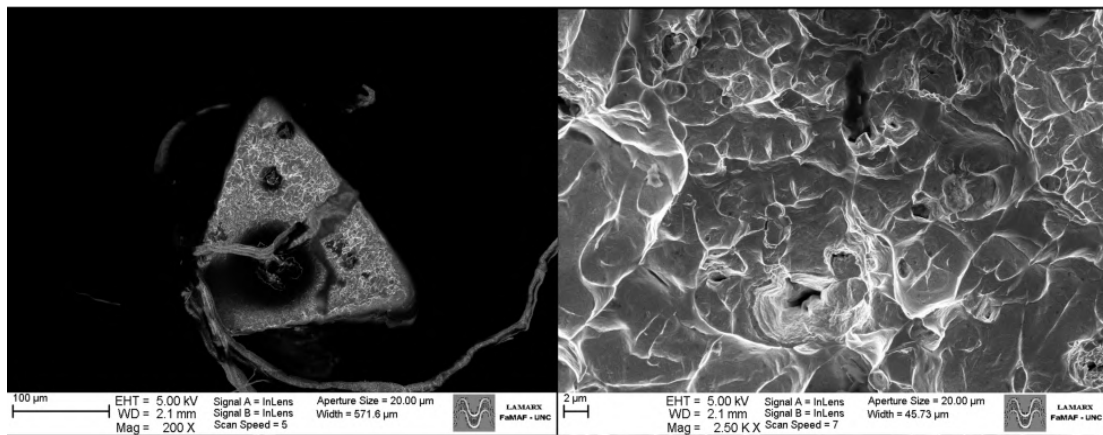


Fig. 83: TF (60°). Muestra 14. Tiempo 1,54 min. Nivel 5.

ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DE LA ALEACIÓN NITI A PARTIR DE ESPECTROS DE RAYOS X

Se analizaron espectros correspondientes al sistema Protaper Universal. Los resultados muestran que la variación de la concentración de los elementos que componen la aleación se debe a la formación de pequeñas partículas o inclusiones como de carburos de titanio y/o intermetálicos formados por NiTi u óxidos.

El análisis metalográfico ayuda a dar precisión a este aspecto del material.

En la Fig. 84 se muestra un ejemplo de una de las superficies de fractura analizada.

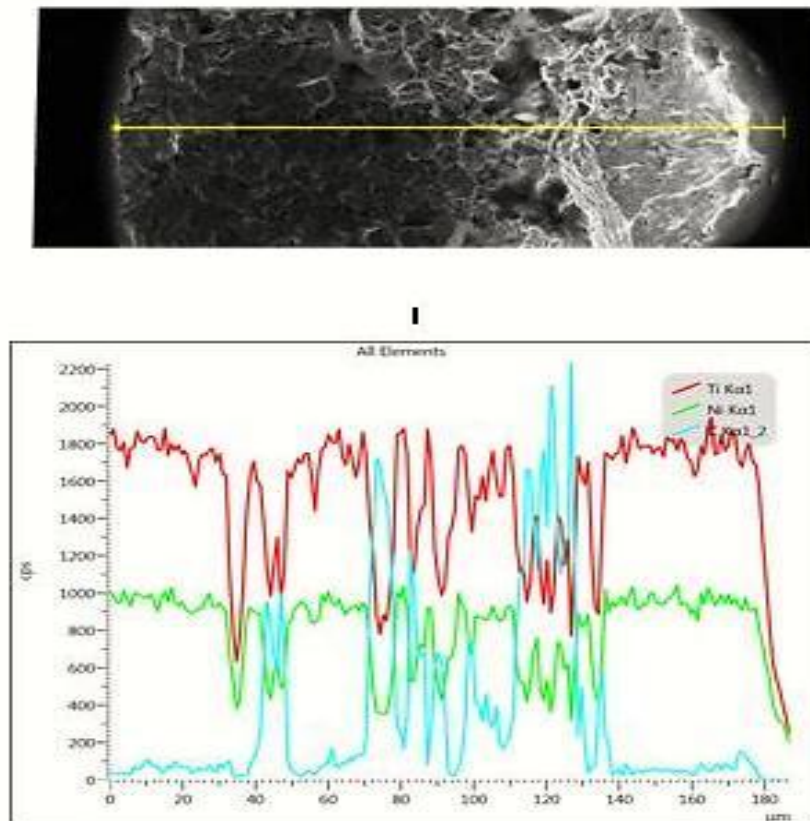


Fig. 84.- Variación de la concentración de elementos en las muestras obtenidas por barrido lineal sobre la superficie de fractura.

Cuando la línea de barrido atraviesa una partícula, el porcentaje de Ti y Ni decae y sube el de C. Esta información sugiere que las partículas son carburos de Titanio.

DISCUSIÓN

Mejorar la calidad de la instrumentación de los conductos radiculares ha sido, sin duda, una de las principales preocupaciones de los investigadores, motivo por el cual, son numerosas las innovaciones técnicas que a través del tiempo enriquecieron a esta etapa que es crucial en la terapia endodóntica. Sin embargo, llegado el momento de establecer situaciones coyunturales que caractericen su evolución, son dos las que por su impacto se destacan: La estandarización en la técnica propuesta por Ingle en el año 1959⁶⁰ y aún vigente, y particularmente la incorporación de la aleación níquel-titanio (NiTi) acaecida en la década del 80 del siglo pasado³, lo que no sólo constituyó la introducción de un nuevo metal en la fabricación de los instrumentos sino que fue aún más allá, al punto que provocó una verdadera transformación en su diseño y mecánica y un significativo cambio en el direccionamiento general de las prácticas endodónticas.

En efecto, por su alta flexibilidad, 2 a 3 veces por encima de las limas de acero inoxidable, y por su resistencia a la fractura, también superior a la del acero, (Walia y col.³; Kuhn y col.,¹¹) -aunque no pareciera ser tanto-, la incorporación de la aleación NiTi llegó integrada a una nueva generación de instrumentos que permiten, no sólo recorrer con mayor facilidad la curvatura de los conductos, sino también, que lo hacen sin provocar las deformaciones que los instrumentos de acero habitualmente producen en conductos curvos. Por otra parte, los instrumentos NiTi permitieron mecanizar la instrumentación -hasta entonces manual- aplicando técnicas rotacionales que mejoraron la calidad del trabajo, acortaron los tiempos operatorios y redujeron la fatiga del operador, aún en conductos curvos^{11,41,61,62}.

Según Leonardo y col.¹⁰, la preparación de los conductos radiculares se puede realizar indistintamente con las clásicas limas manuales de acero inoxidable o con instrumentos rotatorios de aleación NiTi. Sin embargo, coincidimos con Braga y col.⁷ en cuanto a que estos últimos, por su alta flexibilidad y elasticidad, no sólo brindan un valioso aporte a la conformación de los conductos, sino también, que en efectividad superan a los de acero, aunque, al igual que estos, llevan consigo el siempre latente problema de la fractura.

Hapassalo y col.¹ consideran que desde su aparición los instrumentos NiTi han cambiado permanentemente su diseño y que su capacidad de corte ha evolucionado considerablemente. Sostienen, además, que tales cambios se basaron en las innovaciones introducidas en el procesamiento de la aleación y en los procedimientos de su manufactura. Efectivamente, los autores citados señalan que las mejoras introducidas han perfeccionado la metalurgia de la aleación mediante el empleo de nuevas tecnologías en su fabricación, sobre todo, con el fin de optimizar su microestructura. Para Sharma y col.⁹, los sucesivos cambios introducidos en el diseño de los instrumentos,

buscaban, entre otros beneficios, mejorar la efectividad del corte y disminuir su tendencia al atascamiento y atornillamiento en las paredes del conducto durante su uso.

Para interpretar el comportamiento de los instrumentos analizados, como así también los resultados obtenidos en el presente estudio, es necesario tener en cuenta el procedimiento utilizado en su fabricación, ya que según Thompson y col.⁴ puede ser por tallado o maquinado o bien mediante retorcido de un vástago de alambre^{1,15}, para luego, como ocurre en algunos sistemas de última generación, ser sometidos a tratamientos muy específicos con el fin de aumentar su resistencia y efectividad.

Thompson y col.⁴ señalan que las limas rotatorias Protaper Universal (PTU), fabricadas mediante un proceso de tallado o maquinado, requieren pasar por etapas de laminado, trefilado, recocido, tallado o modelado de su sección transversal y finalmente por la de limpieza y acondicionamiento de su superficie. En cambio, según Gambarini y col.¹⁵, las limas TF presentan una estructura muy distinta, ya que a partir de un alambre con forma de pirámide triangular, son fabricadas mediante un proceso de retorcido que requieren, además, pasar por una fase de calentamiento y enfriado y recibir por último un tratamiento de electropulido, a los efectos de eliminar las fallas que el procedimiento de fabricación deja en los instrumentos, fallas que numerosos autores^{9;55;63;64;65;66}, y con distintas miradas, no sólo consideraron, sino que coinciden también en calificarlas como posibles causas de fractura si el instrumento es sometido a un esfuerzo.

En efecto, como parte del proceso de fabricación de los instrumentos de últimas generación -entre los que cuenta las limas TF- se incluye un tratamiento térmico y otro electroquímico que tienen como fin aumentar su tenacidad y reducir y aún eliminar de su superficie defectos que la fabricación produjo, puesto que afectarían su resistencia a la fatiga, flexión y/o torsión^{1;8;16}. Sin embargo, según lo observado en este estudio, las limas TF, que reciben dicho tratamiento, se caracterizan por presentar, aún en los instrumentos sin uso, una superficie que supera ampliamente a la de las limas PTU en cuanto a la presencia de irregularidades, sobre todo, por la cuantiosa presencia de líneas o estrías que, asociadas a numerosos poros, afectan todo el sector activo del instrumento, incluidos los filos. En este aspecto, también merece particular atención la opinión de Schafer y col.¹⁸, ya que consideran que dicho tratamiento no aporta beneficios que resulten significativos en cuanto a las mejoras pretendidas. Del mismo modo, también Cheung y col.¹⁷, se refieren a dicho tratamiento y si bien aceptan que el procedimiento suaviza las superficies de los instrumentos, consideran que carece de efectos sobre la resistencia a la fatiga cíclica y en consecuencia sobre la fractura, lo que sin duda genera una controversia que en el futuro cercano deberá ser dilucidada por los investigadores.

Reconsiderando los resultados obtenidos por distintos autores^{9;55;63;64;65;66}; respecto a la presencia de estos defectos y a sus posibles consecuencias, se consideró

conveniente, como primer estudio, examinar el sector activo o cortante de instrumentos, aún sin uso, pertenecientes a los Sistema PTU y Sistema TF analizados en este estudio, puesto que, tal como lo señalan los autores antes citados, una falla en su superficie, cualquiera que ella sea, puede ser el punto de partida que lleva a la fractura cuando es sometido al estrés del trabajo.

Se optó como método de evaluación de estos defectos el examen con MEB, ya que posee la capacidad de captar imágenes de alta resolución. Por otra parte, este método ha sido utilizado en otros estudios^{63,65,64,66}, y aceptado por la precisión de la información que brinda.

Para definir los aspectos a considerar en dicha evaluación se tuvieron presente algunos de los criterios considerados por los autores antes citados, que también recurrieron al empleo del MEB para detectar fallas microscópicas en la superficie de los instrumentos. Sin embargo, en el presente estudio, y a los efectos de definir conceptos y circunscribir el análisis, se utilizó una clasificación elaborada con ese fin, de modo tal que estuviera enfocada sólo al análisis de instrumentos sin uso para poder así detectar aquellos defectos originados durante el proceso de fabricación, ya que las clasificaciones utilizadas por otros autores (Sharma y col.⁹; Kim y col.⁵⁶; Tripi y col.⁶⁴; Luzy y col.⁶⁵; Caballero y col.⁶⁶; Troian y col.⁶⁷), no sólo incluyen este tipo de defectos, sino también los que se originan por su uso e inclusive los provocados por la fractura, lo que a nuestro entender genera confusiones.

En la elaboración de dicha clasificación se tuvieron en cuenta aquellas imperfecciones que se manifestaban con cierta frecuencia, como así también, las que los autores describen sin darle una designación concreta o bien cuando sus definiciones generaban dudas en su interpretación. Se adoptó el término **microgrietas**, utilizado por Caballero y col.⁶⁶ entre otros autores, puesto que coincide con la presencia de aquellos defectos que generalmente se presentan como diminutas fracturas en los filos del instrumento. No se incluyeron las características de “cráteres” o de “grandes hoyos” consideradas por los autores antes citados ya que no se condicen con la topografía que ofrece la superficie de los instrumentos analizados. Se introdujeron otras designaciones como la de **rebabas** con la que se identificaron sobrantes del material maquinado que permanecían adherido al filo, a veces sobresaliendo y otras plegados sobre la superficie metálica y también sueltos, los cuales, si bien no fueron considerados por otros autores, se detectaban con bastante frecuencia. Se introdujo, también el término **melladuras** para incluir lo que Tripi y col.⁶⁴ definen como “*pérdida de continuidad regular de la forma de los filos*”; y que Luzy y col.⁶⁵, describen como “*bordes desafilados que se manifiestan con pérdida de nitidez en los bordes cortantes*”. Se incluyó, además, la calificación de **poros** para destacar aquellos defectos que se manifiestan como pequeñas cavidades de

contorno circular, oval y a veces muy irregular, aisladas, unidas y aún fusionadas, para diferenciarlas de las que Caballero y col.⁶⁶, al igual que otros autores, identifican como “hoyuelos” y describen tanto en la superficie del instrumento sin uso como en el área de la fractura, y por último, se incorporaron los trazados lineales que cubren la superficie del sector activo de los instrumentos, defectos que por sus características se identificaron como **estrías o surcos**.

El análisis en ambos tipos de instrumentos (PTU y TF) sin uso tuvo como fin identificar los defectos que se produjeron durante el proceso de fabricación y también aquellos que aportó la aleación metálica con la que fueron fabricados.

El aspecto que más atrajo la atención en el momento de efectuar el análisis microscópico, fue la presencia de líneas o rayas que surcaban toda el área activa o cortante de ambos instrumentos y que identificamos como estrías o surcos, las cuales, por ser el producto del proceso de fabricación⁹, se detectaron en todos los instrumentos y por sus características y frecuencia requerirían, a nuestro entender, mayor atención y un análisis más profundos. Por otra parte, y según lo observado en este estudio, estas líneas, estrías o surcos difieren sustancialmente de un tipo de instrumento al otro, ya que se presentan como huellas que dejaron sobre la superficie del instrumento los respectivos mecanismos de fabricación, y si bien queda en claro que en las limas PTU son horizontales y producto del maquinado⁵⁵, no sucede lo mismo en la TF, ya que los autores, en general^{1,15,54,67,68}, de un modo u otro las atribuyen “*al efecto de la torsión a la que es sometido un alambre de NiTi con forma de pirámide triangular*”, razón por la cual, son dos las incógnitas que quedan, ya que los autores no hablan sobre el procedimiento que se utiliza para obtener un alambre de NiTi con forma de pirámide triangular, y tampoco se refieren al mecanismo por el cual la torsión genera las estrías o surcos.

Sin embargo, y aún cuando los autores sostengan que limas TF “*no están sujetas a las limitaciones del maquinado*”^{49,51}, consideramos que la presencia de estrías longitudinales en las limas TF, que a veces adquieren las características de verdaderos surcos, se deben, al igual que en las limas PTU, a un agente devastador que actuó antes de la torsión y que dio al alambre la forma piramidal y labró las estrías o surcos que expusieron los poros que el metal encerraba en el interior de su volumen.

Según se pudo apreciar en este estudio, en las limas PTU las estrías se muestran, por lo general, poco definidas sobre la superficie lisa y homogénea del metal donde la presencia de poros es extremadamente escasa. Además, por el mecanismo del tallado y por la dirección del maquinado, las estrías tienen un trazado horizontal que va del eje axial al filo del instrumento, respetando una equilibrada separación y un equidistante paralelismo, concepto que de algún modo coincide con el expresado por Kim y col.⁵⁵, aunque estos autores lo único que destacan en ellos es que “*recorren el instrumento con*

una dirección casi perpendicular a su eje longitudinal". En cambio, en los instrumentos TF el trazado de las estrías o surcos es muy distinto, no sólo porque son más nítidas y definidas, sino también, porque guardando una estrecha aproximación y un neto paralelismo entre sí, se las observa abundantemente en toda la longitud del sector activo del instrumento.

Resulta de interés considerar que por efecto de la conicidad y, en consecuencia, por la convergencia de los tres vértices de los respectivos planos de su estructura piramidal hacia la punta del instrumento, en ciertos casos las aristas terminan oblicuamente en algún punto de uno de sus filos, y sólo las centrales llegarían hasta su extremo o punta, al parecer, sin solución de continuidad.

Cabe destacar que este detalle tan simple como es la terminación de una estría sobre el filo del instrumento, puede adquirir una preocupante importancia si en el fin del trayecto, sobre el filo, coincide con un poro o una cadena de poros, ya que en conjunto pueden configurar un defecto que en forma de pequeña fisura sigue la dirección oblicua de la estría, hecho que puede convertirse en un defecto de fabricación de inesperada repercusión y que fue observado con total claridad en limas TF aún sin uso,

Otro aspecto a considerar en las líneas o estrías que surcan la superficie de los instrumentos TF es el estrecho vínculo que guardan con los numerosos poros que se distribuyen sobre el sector activo de estos instrumentos, al extremo que Kim y col.⁵⁶ los describen como si fuesen parte de los surcos longitudinales ya que hablan "*de un tipo de surco de mecanizado que recorren a lo largo de la lima con múltiples hoyos*".

La presencia de poros también fue advertida por Sharma y col.⁹, e identificándolos como burbujas, informan que en la mayoría de los casos se disponen en forma de cadenas, un fenómeno que en metalurgia también se lo conoce como sopladuras⁷⁷ y que se produce durante la solidificación de un metal, puesto que su tiempo de fluidez es insuficiente para que los gases, en forma de burbujas, puedan escapar hacia la superficie y quedan incluidos en la intimidad del metal ya solidificado como columnas o cadenas de pequeñas cavidades.

Aun cuando Caballero y col.⁶⁶ consideran a los poros como simples "hoyuelos" y los detecten sólo en algunas limas TF nuevas y que Kim y col.⁵⁶ los describan como "hoyos" que alteran la suavidad de la superficie del metal, la presencia de estos defectos como fallas estructurales merecen, por su extremada frecuencia y por sus posibles consecuencias, mayor atención y análisis, tanto por parte de los investigadores como de los fabricantes. En efecto, su frecuente disposición arrosariada o en cadenas como si fuesen parte de las líneas o de los surcos de fabricación como los consideran Kim y col.⁵⁵, sugiere, tal como lo expresáramos en párrafos anteriores, que son burbujas de gases que quedaron atrapadas en el interior de la masa metálica durante el proceso de

solidificación del metal fundido, y que luego, en una de las etapas del proceso de fabricación, quizás en el tallado piramidal del alambre, quedaron expuestas. Un ejemplo que sustenta este supuesto se manifiesta en la punta de los instrumentos donde los poros, debido a que la sección del metal es en parte oblicua y en parte redondeada, se muestran siempre aislados o agrupados pero no unidos entre sí y con formas que tienden a la circular, según el declive del corte.

Corresponde finalmente señalar que existe total coincidencia con lo expresado por Luzi y col.⁶⁵ cuando señalan que al examen con MEB todas las limas sin uso presentaban algún defecto, y más aún, ya que de acuerdo a lo observado en este estudio, se puede decir que hay defectos como las **rebabas** que se detectan con bastante frecuencia, y si bien parecieran ser poco trascendentes, merecen un detenido estudio; que hay otros defectos como las **melladuras** que por sus características requieren mayor atención y un análisis más profundo; que la presencia de **estrías** y de **poros**, aislados o en conjunto, juegan un importante papel en cuanto al origen de la fractura, motivo por el cual ameritan ser consideradas con especial cuidado y dedicación, y por último, que la presencia de **microgrietas**, el defecto que más preocupa y el más difícil de observar en instrumentos sin uso, requieren, por lo tanto, estudios muy específicos y análisis muy minucioso.

Por otra parte, y siempre según nuestras observaciones, es necesario aclarar que las características de tales imperfecciones varían según el sistema al que pertenece el instrumento analizado. Un ejemplo lo brinda la marcada pequeñez (entre 5 μm y 20 μm) de los poros y su escasa frecuencia en las superficie de las limas PTU y, por el contrario, la llamativa abundancia y variedad de dimensiones que ofrecen estos defectos en las limas TF, como así también, el aspecto que ofrecen las líneas producidas por el maquinado: horizontales, tenues y espaciadas en las primeras y longitudinales, abundantes, nítidas y muy próximas entre sí en las segundas, al punto que la sola observación de tales características bastaría para diferenciar un instrumento del otro. No obstante, y pese a que se trata de aspectos estructurales que sin duda pueden llegar a tener activa participación en la fractura de los instrumentos, estos defectos, en general, aún no han sido suficientemente valorados.

La evaluación del metal desde su volumen realizada sobre secciones transversales y longitudinales de ambos instrumentos, permitió obtener una visión de las fallas desde una perspectiva hasta el momento poco y nada valoradas por los autores. Efectivamente, dicho examen permitió analizar en el interior del metal la disposición de los poros, sin dudas preexistentes al mecanizado de la pieza y generados por las condiciones de colada y tratamiento térmico de la aleación. Permitted, a su vez, comprobar que en las limas PTU los poros se agrupaban y formaban un compacto puntillado que tendía a ocupar el área central del corte, motivo por el cual, el contorno se presentaba

liso y despejado, salvo en algunos sectores donde el puntillado llegaba hasta los bordes. Esta particular disposición brindaría una posible explicación respecto a lo observado en el Estudio 1, ya que, como en su momento se dijo, la presencia de poros en la superficie activa de estos instrumentos es muy escasa, y si se los visualiza, son muy pequeños y generalmente se muestran formando pequeños y muy aislados grupos distribuidos dentro de amplias áreas desprovistas de estos defectos. En cambio, en las limas TF la distribución de los poros -regular y generalizada- cubría uniformemente toda la superficie de la sección del instrumento, aún en los bordes, lo que explica la extendida presencia del defecto sobre la totalidad de la superficie externa del instrumento analizado.

Lo que hasta el momento queda en claro, ya que los estudios requieren ser profundizados, ya que es muy poco lo que al respecto se conoce, es que los poros son comunes a ambos instrumentos, aún cuando los autores cuando se refieren a este defecto, lo hacen muy superficialmente y como si fueran exclusivos de las limas TF^{9:55} ya que no se habla de poros en las limas PTU. Las diferencias que en este aspecto ofrecen ambos instrumentos radica en que en las limas PTU los poros tienen un amplio predominio en el volumen del metal y una escasa presencia en su superficie, mientras que en las TF abundan tanto en su superficie como en su interior.

No se puede no tener presente en este análisis las cadenas de poros que, sin entrar en detalles, los autores antes citados describen sólo en la superficie externa del sector activo de las limas TF, y que según nuestras observaciones, aislados o fusionados y generalmente en cadenas o hileras, en ambos instrumentos siguen el eje longitudinal de la masa o volumen del metal como consecuencia de la deformación plástica que sufren durante su manufactura y que desde el punto de vista mecánico, de algún modo actúan como si fueran grietas donde se concentran las tensiones.

Por otra parte, el análisis comparativo de la sección transversal de ambos instrumentos permitió establecer importantes diferencias en sus contornos, sobre todo en sus perímetros, ya que generalmente es liso y sin alteraciones en las limas PTU y muy irregulares en las TF. Efectivamente, en estas últimas, la línea perimetral mostró un aspecto zigzagueante debido a la presencia de las estrías o surcos que dejó el maquinado y que en estos instrumentos tienen un recorrido longitudinal, defectos, que sumados a los poros que se distribuyen en la superficie del corte y sobre todo a los ubicados en su perímetro o vecindades, actuarán como posibles puntos de debilitamiento.

La presencia de poros cerca de un borde o filo o coincidente con él, pareciera ser muy frecuente en las limas TF, no así en las PTU. El examen -en este caso con microscopía confocal - permitió visualizarlos con total claridad en los bordes o fillos como pequeñas concavidades en sacabocados o como diminutos sacos o bolsas, los cuales,

sumados a las estrías o surcos pueden convertirse en núcleos concentradores de tensiones cuando la lima es expuesta al esfuerzo mecánico.

No quedan dudas de que los poros presentes en las limas TF, tanto los atrapados en su volumen como los abiertos en su superficie, actúan como muy posibles agentes desencadenantes de la fractura, más aún si se suman a las estrías del mecanizado, puestos que sus efectos concentradores de tensiones se potencian. En cambio, en los instrumentos PTU, los poros, por su exigua presencia en la periferia y bordes de la superficie del metal, pierden protagonismo, mientras que las estrías, por su recorrido perpendicular a los filos y paralelo al plano del corte, adquieren significativa importancia, ya que pueden actuar como entallas concentradoras de tensiones y eventuales iniciadoras de la fractura.

Son varios los autores que han intentado establecer el momento en que se produce la fractura de los instrumentos mecanizados NiTi y lo hicieron a través de distintos medios. En este caso, se tomó como base el modelo experimental diseñado por Pruett y col.³², al que se le introdujeron algunas variantes. Una de ellas fue la curvatura de los tubos que simulaban los conductos, ya que basados en sus resultados, donde comprueban que el número de ciclos hasta la fractura disminuía paulatinamente, de las tres graduaciones que ellos utilizaron (30°, 45°, 60°), se propusieron, dentro de ese rango, sólo dos (40° y 60°).

Por otra parte, y a los efectos de que el accionar del sistema reprodujera, en lo posible, el que el instrumento desarrolla en la actividad clínica, se incorporó un movimiento comúnmente llamado de “picoteo”, ya que permite que el instrumento - mientras rota- repita constantemente un movimiento de entrada y salida al conducto, de modo tal que con discontinuidad, lo recorriera en toda su longitud. Según Li y col.³⁶ este movimiento influye de manera significativa sobre la fatiga cíclica del instrumento, ya que su repetido movimiento de introducción y retiro de la curvatura del conducto, zona considerada de estrés, prolonga el tiempo de la fractura, puesto que intercala intervalos en el tiempo de trabajo que interrumpen periódicamente el esfuerzo y la fatiga en el instrumento.

En cuanto a la determinación del tiempo transcurrido hasta que se produjo la fractura en cada uno de los instrumentos, los resultados muestran que con un ángulo de curvatura de 40° y respetando las condiciones propuestas para su estudio, el tiempo promedio para las limas PTU fue de **31,7 ± 16,6** min, mientras que en curvaturas de 60° el tiempo promedio para las mismas limas se redujo a **2,5 ± 0,6** min. En cuanto a las limas TF estos tiempos fueron, según el grado de curvatura del conducto, de **29,0 ± 8,9** min y **2,5 ± 0,5** min respectivamente para curvaturas de 40° y 60° (en todos los casos se expresa la media ± desviación estándar).

El contraste estadístico de los resultados referidos al número de rotaciones por minuto muestra, en total coincidencia Al-Hadlaq y col.⁵⁵, que entre ambos instrumentos las diferencias no fueron significativas, en cambio, quedó en claro que cuanto mayor es la curvatura del conducto, más notoria es la reducción de los tiempos que se requiere para que se produzca la rotura del instrumento, situación que se evidenció tanto en las limas PTU como en las TF.

En las experiencias efectuadas en conductos con una curvatura de 60°, la dispersión en el número de ciclos fue reducida, razón por la cual, también lo fueron en los tiempos de fractura. En cambio, en conductos con curvaturas de 40°, donde los tiempos promedios hasta la fractura fueron aproximadamente 12 veces mayor que los registrados en conductos con curvatura de 60°, la dispersión de valores de resistencia estructural fue más alta, particularmente en el grupo del PTU donde el tiempo transcurrido hasta que se produjo la fractura fue más prolongado.

Si bien el modelo experimental utilizado en esta experiencia fue el propuesto por Pruett y col.³², los resultados obtenidos sólo concuerdan con los de dichos autores en cuanto a que el tiempo de fractura disminuye en la medida en que aumenta el ángulo de la curvatura. La falta de coincidencia en otros aspectos quizás se deba a las distintas mejoras introducidas en el sistema, fundamentalmente a la incorporación del mencionado movimiento de “picoteo”, ya que su influencia, en cuanto a los resultados, pareciera ser significativa³⁵.

En un estudio con estas características donde lo que se busca es establecer el tiempo de rotación que transcurre hasta su rotura, entran en juego distintas variables que deben ser tenidas en cuenta, motivo por el cual, para evaluar la influencia del “**ángulo de curvatura**” y del “**tipo de instrumento**” como variables independientes sobre el “**tiempo**” que el instrumento soportó hasta su fractura como variable dependiente, se utilizó un modelo lineal general univariante.

Conforme a los resultados obtenidos, sólo el ángulo de curvatura del conducto demostró tener un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el tiempo transcurrido hasta la fractura, ya que la influencia del factor “**sistema de limas**”, no fue significativo ($p > 0,05$) respecto a aquel. Tampoco se verificó interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo; $p > 0,05$).

Otro método de evaluación para determinar cuándo se produce la fractura del instrumento es, según Plotino y col.⁷⁰, Aminsobhani y col.⁷¹, Oh y col.⁷⁴, estableciendo el número de ciclos acumulados en el momento de la fractura (**NCF**), siglas que representan un valor que se obtiene multiplicando el tiempo (minutos) transcurrido hasta la fractura, por la velocidad de rotación expresada en revoluciones por minuto (**RPM**), en contraposición a la velocidad de rotación. Incide, además, la velocidad de operación,

aunque Kitchens y Liewehr³⁵ señalan que la fatiga cíclica no tiene relación con la velocidad operatoria.

El análisis de los resultados obtenidos en este ensayo muestra que las limas PTU realizaron un número menor de ciclos antes de su fractura que las limas TF. En efecto, con ángulo de curvatura de 40°, los instrumentos del sistema PTU registraron valores en un rango de 13,15 min a 58,24 min ó 4602 a 20384 ciclos y las limas TF, con curvaturas de igual graduación (40°), mostraron valores que iban de 16,03 min a 46,13 min u 8015 a 23065 ciclos. En cambio, con curvaturas de 60°, en el sistema PTU el rango de valores fue de 1,52 min a 3,56 min o 532 a 1246 ciclos, mientras que para las limas TF fue de 1,54 min a 3,40 min o 770 a 1700 ciclos.

A manera de resumen de este análisis se puede decir que la dispersión de valores de ciclos en ambos sistemas fue mayor en limas que actuaron en conductos de 40° de curvatura que en los de 60°, como así también, que es notoria la marcada disminución del número de ciclos registrados hasta el momento de la fractura en los instrumentos que actuaron en conductos con curvaturas de 60°, pertenecieran al sistema PTU o al TF. Por otra parte, las limas del sistema TF se caracterizaron por soportar el mayor número de ciclos respecto a los otros grupos en conductos con una angulación de 40°.

Al igual que en el análisis anterior también aquí se utilizó un modelo lineal general univariante con el fin de evaluar la influencia de los factores “**ángulo de curvatura**” y “**sistema de limas**” sobre el **NCF** donde la variable dependiente es el **número de ciclos** registrados y las independientes el **ángulo de curvatura** (40° o 60°) y **Grupos o sistemas de limas** (PTU o TF).

Según los resultados obtenidos, sólo el ángulo de curvatura tuvo un efecto significativo ($p < 0,05$) respecto al número de giros registrados por el instrumento antes de la fractura. En cuanto al factor **grupo o sistema de limas**, el valor de **p** o nivel de significación estadística de la prueba fue de 0,05; exactamente igual al límite de significación estadística fijado, por lo que se sugiere aceptar la hipótesis nula, ya que por rigurosidad científica, el valor de **p** no es menor a 0,05 ($p = 0,05$), aunque la tendencia muestra que las limas TF soportaron mayor número de ciclos antes de fracturarse. La interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo) no resultó significativa ($p = 0,110$; $p > 0,05$).

Comparando los resultados obtenidos en este estudio con los que presentan otros autores, lo primero que se aprecia es que entre ellos existe una gran diferencia. Bahía y col.²⁴ contrastaron en conductos con una curvatura de 45° la resistencia a la fatiga cíclica que presentaban los instrumentos de distintos sistemas rotatorios (K3, ProFile y GT Series X) y establecieron que el **NCF** en los tres sistemas estaba dentro de un rango de 1.32 min a 2.43 min o 330 a 610 ciclos. También Plotino y col.⁷⁰ calcularon el **NCF** en 2

sistemas NiTi, utilizando un ángulo de curvatura de 90°. El **NCF** promedio en las limas PTU fue de 29 ciclos y en las limas de NiTi Mtwo de 124 ciclos, los cuales, comparado con los estudios mencionados, señalan que el número de ciclos disminuye significativamente en los instrumentos rotatorios NiTi cuando el ángulo de curvatura es mayor, observación que ya hicieran Pruett y col.³² y que también quedó demostrado en este estudio.

También Aminsobhani y col.⁷¹ realizaron un estudio con características similares al que nos ocupa. En él analizaron distintos sistemas y entre ellos las limas de los sistemas PTU y TF -ambos de sección transversal triangular- y el Neo-NiTi de sección transversal rectangular, donde comprueban que el tiempo promedio de fractura más alto fue en limas Neo-NiTi (mayor volumen de metal) con un valor en la media de 6.6 min, le siguieron las limas TF con 4.5 min y las PTU con 1.8 min. Con el mismo fin, Kim y col.⁵⁶ compararon las limas de los sistemas Twisted File, RaCe, Helix y Protaper y comprueban que el NCF en las limas TF fue significativamente mayor que en los otros sistemas.

Ante estos resultados surge, inevitablemente, un interrogante: Si hasta el presente se dijo que a mayor cantidad de defectos mayor posibilidad de fractura, porque instrumentos con tantos defectos como son las limas TF muestran un tiempo promedio de fractura que supera el de otros -como es el caso de las limas PTU- que los poseen en menor grado, pero no tenemos respuesta para ello, tampoco, al parecer, la tienen los autores. Quizás se la encuentre en los tratamientos térmico y de electropulido que reciben los instrumentos de última generación, entre los que se hayan las limas TF, aunque para algunos autores^{17,18}, dichos tratamientos carecen de efectividad, lo que genera dudas que, tal como ya lo dijéramos, es necesario que los investigadores aclaren.

Otro aspecto analizado en el presente estudio consistió en establecer el nivel de la fractura o longitud del fragmento fracturado. En el caso de las limas PTU, accionadas en conductos con una curvatura de 40°, la media fue de 3,73 mm y en los de 60° hubo un cierto incremento, ya que la media fue de 4,60 mm; en cambio en las limas TF fue de 8.20 mm en curvaturas de 40° y de 4,60 mm en las de 60°, valor este último que coincide exactamente con el que se obtuvo en la misma situación en las limas del sistema PTU.

Lo que estos resultados evidencian es que las limas TF que actuaron en conductos con curvaturas de 40° se diferenciaron de los otros grupos, ya que en él la media de los fragmentos fue la más alta (8,20 mm), situación que coincide con el grupo donde el **NCF** fue el más elevado. En cambio, los niveles de la fractura en conductos con una curvatura de 60°, la longitud media de los fragmentos fue la misma (4,60 mm) en ambos sistemas rotatorios.

Al igual que en las valoraciones precedentes, también aquí se aplicó un modelo lineal general univariante para evaluar la influencia que los factores “**ángulo de curvatura**” y “**sistema de limas**” tuvieron sobre el “**nivel de la fractura**”,

Según los resultados obtenidos, tanto el “**ángulo de curvatura**” como el “**sistema de limas**” demostraron tener un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre la longitud del fragmento fracturado. Por otra parte, también la interacción entre los factores introducidos en el modelo (Grupo * Ángulo) resultó significativa ($p < 0,05$), lo que indica que la curvatura del conducto generó respuestas que difieren entre ambos “**sistemas de limas**” en cuanto a la medida del fragmento resultante, ya que las medidas de los trozos en las limas TF fueron, según la curvatura del conducto, muy diferentes entre sí, mientras que en las limas PTU fueron similares en ambos grados de curvatura.

Efectuado un análisis complementario respecto a la correlación que existe entre la **cantidad de ciclos y longitud del fragmento resultante**, en los cuatro subgrupos se observó una tendencia a la disminución de la longitud de los fragmentos cuanto mayor era el número de ciclos, sin embargo, tal correlación entre estas dos variables se validó como estadísticamente significativa sólo al considerar los valores obtenidos en el sistema PTU con una angulación de 40°.

La diferencia entre estos resultados y los que ofrecen otros autores radica en que no son tan regulares. Elnaghy y col.⁵², en un estudio en el que también ensayaron limas TF y PTU en conductos con un ángulo de curvatura de 45°, comprobaron que la media en el fragmento en limas TF era de 5,20 mm y en las PTU de 5,23 mm, cuyas diferencias carecían de significación ($p > 0,05$). En cambio, en el presente análisis la media del fragmento que se obtuvo de una lima TF en un conducto con 40° de curvatura fue de 8,20 mm, una medida que supera ampliamente a las antes mencionadas, y que en conductos con una curvatura de 60°, se redujo a 4,60 mm. En cuanto a las limas PTU, los resultados fueron muy distintos, ya que la media del fragmento en curvaturas de 40° fue de 3,73 mm y de 4,60 mm en conductos con curvas de 60°, la misma longitud que se obtuvo en las limas TF en un conducto de igual graduación.

Un aspecto a tener en cuenta en estudios de este tipo cuando llega el momento de contrastar los resultados obtenidos con los que presentan otros autores, es lo difícil que resulta encontrar coincidencias. Según Bhagabati y col.⁷², Elnaghy y col.⁵², Testarelli y col.⁵¹, las variantes en los resultados pueden ser atribuidas a múltiples circunstancias, aunque para ellos es el aspecto metodológico el que predomina. Por otra parte, y si bien consideran que entre los instrumentos ensayados no deben haber diferencias morfológicas y funcionales para que el contraste no sea cuestionado, poco valoran otros aspectos que a nuestro entender son fundamentales en el análisis. Llegado el momento de evaluar, los autores, en general, se basan en el tiempo y el número de ciclos

registrados hasta la fractura, y poco cuentan aspectos tan importantes como son el proceso de fabricación de los instrumentos y el tipo de la aleación utilizada, como así también, las secuelas que ambos dejan, ya que además de generar el accidente, también ayudan a entender el porqué de la fractura. Poco cuenta también el aspecto anatómico, la cinética de los instrumentos, y otros agentes coadyuvantes del trabajo mecánico.

Si bien hasta el momento los defectos se consideraron sólo como fallas de fabricación, falta aún analizar el rol que ellos juegan como posibles generadores del problema cuando luego, en situaciones de trabajo forzado, el instrumento actúe, razón por la cual, bien puede considerarse que aquellos que presentan mayor cantidad de defectos en la zona de estrés (la de mayor curvatura o de mayor fricción), aumenten su vulnerabilidad y disminuyan su tiempo fractura, ya que, como lo señala Kim y col.⁷³, el proceso de fatiga que el instrumento experimenta bajo cargas dinámicas cíclicas, se inicia a partir de alguna falla en el metal que origina un microcrack que luego se propaga hasta provocar la rotura del instrumento.

Sin embargo, y como ya lo anticipáramos en párrafos anteriores, los resultados obtenidos en este estudio se contraponen a conceptos ya establecidos y que a todas luces parecieran ser lógicos, lo que hace suponer que en este estudio median factores que están fuera del análisis, y que bien podrían atribuirse a los tratamientos que en la actualidad reciben los instrumentos de nueva generación, ya que sus efectos aún no han sido suficientemente estudiados.

El análisis de la fractura mediante MEB se efectuó en instrumentos que en una experiencia previa -Estudio 2- rotaron hasta la fractura dentro de tubos curvos de acero que simulaban conductos radiculares con angulaciones de 40° y 60° y se realizó bajo tres aspectos, ya que por un lado se evaluó la superficie externa del instrumento cercana a la fractura y por otro el área de fractura propiamente dicha.

El primero tuvo como fin establecer en la superficie externa del instrumento vecina al plano de la rotura, la presencia de defectos que resultan de la concentración de estrés que el instrumento sufre en el sector y que culmina con la fractura.

Lo más relevante en el análisis del área cercana a la fractura en limas PTU que actuaron en conductos con curvaturas de 40° fue, como es natural, la presencia de las líneas de maquinado -perpendiculares al filo del instrumento- como así también, la presencia de deformaciones y aplastamientos en los filos. Esto es una consecuencia inevitable de la fricción sobre las paredes del tubo de acero, y además, con relativa frecuencia y significativa presencia, escasos microcracks coincidentes con las líneas de maquinado. Los mismos pudieron haber existido como inapreciables defectos antes de que el instrumento entrara en acción y que luego, por efecto de la torsión y flexión, se unieron y se hicieron visibles. En el caso de fracturas en curvaturas de 60°, la presencia

de microcracks fue un tanto más frecuente y no siempre respetaron la dirección horizontal del maquinado, ya que a veces eran oblicuas y otras longitudinales, lo que indica que estas microgrietas no eran preexistentes a la experiencia, sino defectos secundarios a la fractura.

En cuanto a las limas TF fracturadas tanto en curvaturas de 40° como de 60°, también se pudo observar la presencia de defectos, entre ellos, al igual que en las limas PTU, aplastamientos en los filos como consecuencia del forzado roce del instrumento sobre el acero, y además, las siempre presentes líneas de maquinado asociadas a los poros con todas sus variables, como así también la de algunos microcracks sobre los filos que se hicieron más evidentes en instrumentos fracturados en curvaturas de 60°.

De acuerdo a este análisis se puede decir que la observación de microcracks no sólo fue más frecuente y más evidente en instrumentos fracturados que en los sin uso, sino también, más numerosos y evidentes cuando la fractura se produjo en conductos con curvaturas muy pronunciadas. Por otra parte, quedó en claro que las limas del sistema TF requieren una mayor concentración de tensiones, y esto significa que el radio de curvatura debe ser muy reducido para que se originen microcracks en la superficie del metal y en los filos, lo que permite aseverar que el sistema TF es más tenaz que el PTU.

Tales observaciones concuerdan con los conceptos de Elnaghy y col.⁵² quienes, en un estudio efectuado mediante MEB en el mismo tipo de limas y aplicando un método similar, reportaron que las limas PTU presentaban microgrietas y defectos a lo largo de su superficie que se convertían en puntos de concentración de estrés del instrumento, y que las limas TF presentaban menos microgrietas de iniciación y propagación.

Es evidente que la incorporación de la aleación NiTi en el campo de la Endodoncia aportó invalorable beneficios, sin embargo, y en concordancia con lo que señalan Braga y col.⁷, no eliminó al problema de la fractura del instrumento cuando actúa en conductos curvos, siendo que esta era y sigue siendo una de las principales preocupaciones del profesional Odontólogo, de los investigadores y fabricantes.

Kuhn y col.¹¹, sugieren que la duración del instrumento depende fundamentalmente de la micro estructura del material, del nivel de endurecimiento por deformación plástica o permanente, de las condiciones de maquinado, del daño superficial previo que posea, como así también de su diseño, puesto que pueden afectar el comportamiento mecánico del instrumento y conducirlo a la fractura. Estos autores parecieran centrar el problema sólo en las características de los instrumentos ya que no consideran otros factores que sin duda son también muy importantes, fundamentalmente la curvatura de los conductos³¹, tal como quedó demostrado en este estudio.

Kim y col.⁵⁶ también ponen su punto de mira en el instrumento, puesto que consideran que el inicio de la fractura ocurre, habitualmente, a partir de defectos

presentes en su superficie y poco cuentan para ellos otros factores. Para Schäfer y col.¹⁸, la resistencia a la fractura no guardaría relación con el tratamiento que los instrumentos reciben durante su fabricación, ya que a su parecer, no aportan beneficios significativos. Para estos autores la diferencia está dada principalmente en el diseño del instrumento, es decir, en la forma de su sección transversal, en ángulo helicoidal, el número de hojas o filos, el ángulo y condición de corte, etc.

Viendo el problema desde la clínica, preocupa que los autores pocas veces asocian las características de los instrumentos con un factor que sin duda es determinante en la fractura y es el grado de curvatura del conducto^{30,31}. Es oportuno destacar que la falta de valoración anatómica también llega al profesional, ya que si bien opta por un sistema rotatorio en base a la curvatura del conducto que la imagen bidimensional de la radiográfica le muestra, generalmente no considera la tercera dimensión -la buco-lingual o buco-palatina- que la radiografía no le brinda, siendo que es en ella donde a menudo se encuentran las curvaturas más pronunciadas y complejas (acodamiento, curvaturas en “s” o “en bayoneta”, etc.)⁷⁶.

El segundo aspecto considerado en este estudio referido a la rotura de los instrumentos fue el análisis de la superficie de fractura propiamente dicha.

El examen fractográfico, efectuado en los mismos instrumentos del análisis precedente, permitió determinar que hubo diferencias en el tipo o modo de fractura debido a los diferentes estados de tensiones a los que se expusieron los instrumentos, ya que la curvatura en uno de los conductos era más pronunciada que en el otro (40° y 60°). Sin embargo, en ambos instrumentos el mecanismo de fractura fue la fatiga cíclica del material.

Cabe recordar que los instrumentos en estudio se caracterizan por su marcada elasticidad, como así también, que trabajaron forzados en conductos curvos hasta que se produjo la fractura, lo que significa que fueron sometidos a un esfuerzo permanente de torcimiento y a una tensión-compresión cíclica atribuida a la flexión por curvado. Por otra parte, se debe tener presente que por influencia de la conicidad o taper, el volumen de metal, y por tanto el área de la sección transversal de la lima, decrecen hacia la punta, motivo por el cual, el estado de tensiones se acentúa cerca del punto medio del arco de la curva y no justo en él. Aún así, la tensión máxima crece en la medida que aumenta el grado de curvatura.

La forma que ofrece el plano de fractura transversal (triangular convexo en las limas del sistema PTU y triangular plano en las del sistema TF), es un aspecto a tener muy en cuenta en el estudio fractográfico, ya que a la forma triangular la define la disposición de los tres filos del instrumento y estos, a su vez, conforman los vértices del triángulo que es equilátero, y es preferentemente cercano a ellos el lugar donde

generalmente se inicia la fractura³⁰. Es importante tener en cuenta que las dimensiones de la lima en la zona de fractura es un aspecto a considerar ya que a ese nivel podría alojarse una inclusión de tamaño aproximado al del plano de fractura, afectando la performance del instrumento.

Otro aspecto a destacar y que coincide con lo que Anderson y col.⁸, Kim y col.⁵⁶ y Oh y col.⁷⁴ señalan, es que en ninguno de los instrumentos fracturados analizados se evidenció un signo de deformación plástica macroscópica previa a la rotura, en contraposición a lo que a menudo ocurre con las limas de acero que se van deformando por el uso.

En términos generales se puede decir que en los instrumentos estudiados las fracturas fueron a veces predominantemente frágiles, en otras predominantemente dúctiles y en ocasiones la presencia de ambos mecanismos de fractura (dúctil-frágil).

En efecto, en las limas PTU que rotaron en conductos con una curvatura de 40°, el comportamiento de la fractura no siempre fue el mismo, al punto que se puede diferenciar un subgrupo de muestras donde la fractura se manifestó como parcialmente dúctil y parcialmente frágil, con una región de inicio donde se define la propagación de la grieta por fatiga de manera clásica, mientras que en el otro subgrupo, la fractura fue eminentemente frágil y la región de inicio y propagación de la grieta por fatiga no se pudo definir con claridad. La teoría de los mecanismos de fractura por fatiga asume la existencia de una falla o crack en la superficie del sólido que es capaz de crecer o propagarse hasta causar la fractura. El crack se propaga cuando alcanza el valor de estrés crítico que supera las fuerzas de cohesión y la propagación de una fractura por fatiga va desde la periferia del instrumento hacia el centro^{22,75}.

La fractura que se manifiesta como dúctil-frágil tuvo su inicio en los vértices del triángulo donde se observó que ya existía alguna imperfección de maquinado o una inclusión. En la superficie de fractura se observaron amplias zonas planas y lisas, lo que pareciera indicar que su inicio se debió a la tensión generada por el retorcimiento de la lima mientras trabaja, lo que se traduce, sencillamente, en una separación por deslizamiento de dos superficies sin dejar huellas del defecto. La apariencia está directamente relacionada con los micromecanismo de fractura y por lo tanto su análisis es de fundamental importancia^{25,27}.

La diferencia entre los sistemas PTU y TF en cuanto al comportamiento se evidencia si se contrastan dos casos extremos: el grupo PTU ensayado con una curvatura de 40° y el TF ensayado con una curvatura de 60°. En el grupo PTU 40° la fractura fue en su totalidad del tipo frágil como lo evidencia el estudio con MEB. Esto no ocurrió en el grupo TF 60° donde se presentaron inicios de grieta en los poros ubicados en los filos y algún comportamiento de fractura dúctil. Por la necesidad de una mayor

concentración de tensiones (menor radio de curvatura) para que se generen grietas visibles sobre el filo de las limas y por la presencia de zonas dúctiles en las fracturas, se puede concluir que el sistema TF es más tenaz que el sistema PTU.

Estos resultados se pueden comparar con los que Ersoy y col.⁶⁸ reportaron en su estudio en el que evaluaron limas TF, RaCE, F360 y FlexMaster y en cuyas imágenes de la fractura obtenidas mediante MEB todos los grupos revelan cráteres junto a numerosos poros. Esto indica que los instrumentos sufrieron una fractura de modo dúctil, predominantemente presente en fracturas de fatiga cíclica. Lee y col.⁵⁷, también mostraron en limas PTU y ProFile características fractográficas similares donde se destaca la presencia de microgrieta en el origen de la falla, una región de propagación del crack y una zona de fractura rápida (por sobrecarga), típica de un proceso de fatiga, lo que configura un cuadro que también fue detectado en este estudio y con el que hay total coincidencia. Estas observaciones son también consistentes con lo informado por Yao y col.²⁹, quienes confirmaron que el modo predominante de fractura es dúctil, tal como se reflejó en los numerosos dimples presentes en la superficie fracturada. Sin embargo, los mismos autores también observaron mínimas características de fractura frágil como es el caso de algunas estriaciones. De igual modo, Li y col.³⁶, en su estudio fractográfico de instrumentos rotatorios NiTi, observaron un proceso de fatiga con un nucleación del crack y su propagación desde la periferia de la superficie fracturada. El crack de propagación se caracterizaba por estriaciones, algunas tan prominentes que a alta magnificación parecían ser perpendiculares al crack de propagación.

Por otra parte, Alapati y col.²² observaron la superficie de fractura en instrumentos del sistema PTU con alta magnificación, evidenciando la presencia de dimples a los que consideraron como una clara evidencia de fractura dúctil en la que ocurre deformación permanente antes de la fractura final. Con forma circular alargada, los dimples surgen a partir de la presencia de partículas en la microestructura y crecen durante el proceso de fractura. Agregan, a su vez, que los “hoyuelos” observados sobre la superficie de fractura de instrumentos que fallaron, fueron invariablemente mucho menos profundos que los observados en instrumentos de acero inoxidable. Concluyen que el aspecto que ofrece la superficie de fractura en estos instrumentos sugiere fractura dúctil, a la que consideran como un modo de fractura deseable, ya que la fractura frágil toma lugar abruptamente sin deformación permanente significativa y por tanto, no anticipa el peligro de una fractura inminente. López y col.³¹, también observan que en su superficie de fractura las limas PTU presentaban características morfológicas de fractura dúctil, con presencia de dimples de variadas formas y longitudes.

Estos resultados difieren de los obtenidos por Oh y col.⁷⁴ quienes, en un estudio en el que compararon 4 grupos de instrumentos fracturados (PTU, TF, K3 y Race),

observaron que no mostraban ninguna deformación en torno al punto de la fractura. Sin embargo, con un aumento de 250X, en las limas TF se apreciaban defectos lineales en su superficie, que no fueron considerados como surcos de maquinado tal como se hizo en las limas K3 y PTU, sino, como ranuras paralelas que seguían el eje de la lima provocadas por la torsión del instrumento. Por otra parte, estos autores señalan que ninguno de los instrumentos fracturados demostró alguna distorsión permanente como desenrollamiento, enderezamiento o enrollamiento inverso alrededor del punto de fractura. Los cracks de origen fueron encontrados generalmente en los bordes cortantes o región de “radial land” y también se observaban múltiples racimos de estrías de fatiga y crack secundarios, confirmando que la falla fue debido a la fatiga cíclica. Sin embargo, numerosos dimples en la región central reflejaron el modo de la fractura dúctil en esta zona.

El estudio de Grande y col.⁷⁵ en limas PTU y Mtwo también reveló que la fractura presentaba una superficie suave, casi sin rasgos característicos de fractura en el área de la periferia (frágil) y una gran región central fibrosa asociado con fractura final dúctil. El área de crack de iniciación y crecimiento exhibió pequeñas regiones de nucleación y propagación lenta del crack, conocidas como regiones suaves periféricas a la sección transversal. El crack de propagación presentaba estriaciones que representan la progresión del crack causado por la tensión durante la rotación del instrumento. La fractura final dúctil se presenta en el centro de la superficie de fractura y se caracteriza por la presencia de dimples. En el presente estudio la mayoría de los instrumentos mostraron patrones de crack, de iniciación, propagación, estriaciones y ruptura final de naturaleza dúctil, que es caracterizada por la presencia de dimples, mientras que la fractura frágil está asociada con la presencia de facetas de corte.

El análisis fractográfico sobre las limas PTU y TF muestra que para ambos diseños la coalescencia de cavidades correspondiente al porcentaje dúctil de fractura está asociados a partículas inmersas en la micro estructura del material.

Considerando este aspecto microestructural aún no evaluado en estos instrumentos, y con el fin de caracterizar la composición de la aleación Ni-Ti, en la superficie de fractura se tomaron espectros de Rayos X en áreas que a menudo contenían inclusiones contaminantes, sean carburos de titanio y/o intermetálicos formadas por NiTi u óxidos que precipitan durante la formación de la aleación y sus posteriores tratamientos térmicos. Cabe destacar que la disminución del porcentaje de estas fases duras en volumen puede ser beneficioso.

Por otro lado, y con el fin de ahondar el estudio sobre el comportamiento mecánico de los instrumentos cuando son expuestos a las distintas condiciones de trabajo, se mostró la existencia de una correlación entre el tiempo que insume la rotura

de la pieza y factores que influyen sobre la fatiga cíclica de los instrumentos.

El análisis teórico de la resistencia a la fatiga presenta grandes dificultades. La naturaleza de la destrucción por fatiga se determina por las particularidades de la estructura molecular y cristalina de los materiales y por otros factores (influencia de los ciclos de carga, la posibilidad de corrosión, la temperatura de trabajo, el endurecimiento en frío, los tratamientos térmicos, la geometría de la pieza en servicio, etc.), que influyen en la resistencia a la fatiga en general.

En este caso, el tamaño de la primera etapa de la fatiga o inicio del rompimiento es prácticamente imperceptible en la mayoría de los análisis efectuados, aunque es claro el avance de la fractura desde los filos hacia el centro ya en el modo de la etapa rápida. La intensidad de tensiones sobre el tiempo de rotura parece ser el factor preponderante y este hecho coincide con la gran acumulación de datos experimentales que se han ido generando y registrando en el tiempo. No sólo se advierte que este tiempo disminuye en la medida que la flexión aumenta (tiempo medio de rotura de 30 minutos para una flexión de 40° contra un tiempo medio de rotura de 2,5 minutos para una flexión de 60°), sino también, que se asocia al lugar dónde en cada uno de los casos ocurre la fractura. Si se supone que demandará un tiempo infinito romper una lima sin torcer, es coherente esperar tiempos mayores para fracturas más cercanas a la punta del instrumento. En promedio esta tendencia se verificó en todos los casos.

La existencia de una discontinuidad en la estructura de un instrumento -por cierto muy frecuentes y con características muy variadas- es, a menudo, el origen de perturbaciones en la distribución de tensiones. Aparecen así las denominadas concentraciones de tensiones localizadas en pequeñas zonas de la sección. El tiempo de fatiga es condicionado por la relación tensión – defecto. Posiblemente por esta causa el sistema PTU muestra una mayor dispersión en tiempos y niveles que el sistema TF que aparentemente posee un tratamiento superficial más acabado. De todas formas, cuando se incrementa la intensidad de las tensiones, se uniformiza el tiempo y zona de rotura, e incluso el modo de fractura en instrumentos de ambos sistemas, lo que significa que la microestructura metálica (tipo de composición química, fases cristalinas y defectos presentes) es el factor que más influye sobre la resistencia a la fatiga de estos instrumentos, de allí que la performance del NiTiInol supera a la del acero inoxidable.

Se observó, además, que cuando los instrumentos -de uno u otro sistema- se rompen a un mismo nivel (igual intensidad de tensión aplicada), es posible que el tiempo de fatiga sea mayor cuando crece el porcentaje de modo de fractura dúctil. Se sugiere que aún cuando el tiempo de propagación de la fractura sea infinitamente menor al tiempo de resistencia a romperse y la lima no muestre deformaciones permanentes,

puede existir una microdeformación plástica asociada a mayor tiempo de fractura y mayores porcentajes de apariencia dúctil de la fractura.

El análisis del sector activo de instrumentos pertenecientes a dos sistemas mecanizados de uso endodóntico permitió reconocer, definir y clasificar en ellos diversos defectos estructurales incorporados por la aleación o generados por la fabricación y, de modo muy particular, incursionar en un área muy singular como es indagar sobre la posible influencia que ellos tienen sobre la fractura de los instrumentos, que por ser tan basta, deja un amplio espacio para seguir investigando, ya que aún quedan muchos aspectos por dilucidar.

CONCLUSIONES

- El análisis microscópico de la superficie externa del sector activo o cortante en limas **PTU** y **TF** sin uso, puso en evidencia que ambas poseen defectos de fabricación, muy similares en cuanto a sus generalidades, pero muy distintos en sus particularidades, al punto que su sola observación bastaría para diferenciar un instrumento del otro.
- Los defectos detectados en la superficie de los instrumentos fueron muy variados, y si bien algunos parecieran ser intrascendentes, todos merecen ser valorados. Por sus características y frecuencia, los que se destacan son las estrías y los poros, pero no menos importante son las melladuras y las rebabas, defectos estos que se detectan con frecuencia y que requieren estudios más profundos. Los más graves quizás sean los microcracks de muy escasa detección en instrumentos sin uso, quizás porque requieren análisis más específicos. Los defectos superficiales de las limas son fuente de nucleación de grietas que luego crecen por fatiga. La aparición de fractura frágil depende, no de la existencia de la grieta sino de su inestabilidad bajo las condiciones de tensiones imperantes.
- Las limas **PTU** mostraron una superficie limpia y homogénea alterada por tenues y abundantes estrías horizontales que van del eje axial a los filos del instrumento, respetando una equilibrada separación y un equidistante paralelismo. Distinto es el aspecto en las limas **TF**, ya que el área activa, en su totalidad, está cubierta por abundantes y muy definidas estrías que corren con aparente continuidad toda su longitud.
- La presencia de poros sobre la superficie del sector activo en ambos instrumentos se mostró muy dispar: escasos y diminutos en las limas **PTU** y abundantes y muy variados en formas y dimensiones en las limas **TF**. Su disposición en cadena sobre las numerosas estrías en estos últimos, los convierten en defectos estructurales que por su extremada frecuencia e imprevisibles consecuencias merecen mayor atención por parte de investigadores y fabricantes.
- La evaluación del volumen del metal realizado sobre secciones transversales y longitudinales en ambos instrumentos, puso en evidencia que en las limas **PTU** los poros son muy numerosos y que tienden a ocupar el área central del instrumento, no así en sus contornos donde son muy escasos, distribución que quizás explique la escasa presencia de estos defectos en su superficie. En cambio, en las limas **TF**, los poros cubren uniformemente y con regularidad la superficie del metal, incluida la periferia y los bordes.

- El análisis de los bordes de las secciones transversales y longitudinales puso en evidencia las diferencias que existen entre ambos instrumentos. Mientras que en las limas PTU eran generalmente lisos y sin interrupciones, en las limas TF mostraban un trazado en zigzag por efecto de las estrías longitudinales, y alterado, a su vez, por la presencia de pequeñas concavidades que se corresponden con la presencia de poros en los filos.
- Como la calidad de la superficie es un factor determinante en la resistencia a la fatiga, la presencia de estrías en la superficie del metal, tan frecuente y tan poco valorada, pueden convertirse en un factor desencadenante de una fractura. En las limas TF las estrías son sin duda más nítidas y profundas que en la PTU, y si bien su trazado es longitudinal, por razones de conicidad suelen terminar oblicuamente sobre los filos originando puntos de debilitamiento. El problema se agrava cuando a ese nivel coincide con un poro o una cadena de poros, ya que juntos configuran microfisuras que sigue la dirección oblicua de la estría, hecho que fue posible observar con total claridad en limas TF aún sin uso.
- El tiempo promedio hasta que ocurre la fractura poco difiere entre los instrumentos estudiados, sea en conductos con curvaturas de **40° (31,7 ± 16,6 min para el PTU y 29,0 ± 8,9 min para el TF)** como de **60° (2,5 ± 0,6 min y 2,5 ± 0,5 min respectivamente)**, al punto que entre ellos, las diferencias carecieron de significación estadística ($p > 0,05$). Respecto al número de ciclos registrados hasta la fractura (**NCF**), el factor “tipo de instrumento” no llegó a ser significativo ($p = 0,05$), aun cuando las limas TF parecieran acumular un mayor NCF. En cuanto al grado de curvatura del conducto, su efecto fue muy notorio, ya que a mayor graduación (en este caso 60°), el tiempo y el NCF disminuyeron significativamente ($p < 0,05$), debido a que las condiciones de tensión cíclica son más exigentes en los ensayos a 60° comparados con los de 40°.
- Los microcracks en áreas vecinas a la superficie de fractura no sólo fueron más frecuentes en ambos instrumentos ensayados que en los sin uso, sino también más numerosos y más evidentes cuando la fractura se produjo en curvaturas de 60° por el mayor estado de tensiones generado por esta curvatura. Por otra parte, las limas TF demandaron un mayor número de ciclos de tensiones que las requeridas por las limas PTU para que se produzca la fractura, y esto se interpreta como que las limas TF son más tenaces que las del PTU, A pesar de que las limas TF presentan una superficie con mayor cantidad de defectos (posibles iniciadores de grieta), estos son más redondeados (poros) y por lo tanto, no concentran demasiadas tensiones.

- El análisis de la superficie de fractura permitió definir dos patrones de fractura: El de fractura dúctil, caracterizado por la presencia de numerosos dimples y el de fractura frágil asociada con la presencia de facetas de clivaje. Se observó, además, que la mayoría de las fracturas presentaban patrones específicos de crack de iniciación, propagación, estriaciones y rotura final de naturaleza dúctil. No obstante, también hubo muestras que presentaron fractura de naturaleza tipo frágil, principalmente en las limas PTU, debido a la geometría de los defectos superficiales que presentaban formas más agudas.
- El estudio fractográfico en las limas PTU permitió establecer comportamientos muy variados, ya que se diferenciaron situaciones de fractura parcialmente dúctil y frágil con un inicio, definición y propagación de la grieta por fatiga de manera clásica, mientras que en otros la fractura fue eminentemente frágil, donde el sector de inicio por fatiga no tuvo una definición clara. En las limas TF la fractura fue del tipo dúctil con inicios muy diversos, ya que podía comenzar en un borde o en un filo, en un poro o en un microcrack, para luego propagarse por crecimiento de cavidades. La superficie de fractura mostró facetas planas que evidenciaban una mezcla de fractura dúctil y cuasiclivaje, pero el modo de propagación fue el crecimiento y coalescencia.
- En ambos instrumentos (PTU y TF) existe una correlación entre el tiempo de rompimiento por fatiga cíclica y el comportamiento mecánico evidenciado por factores como la intensidad de tensión aplicada y el modo de fractura. A mayor tensión menor tiempo a la fractura y mayor apariencia frágil de la misma.
- Los resultados obtenidos en el presente estudio requieren un análisis más profundo que permita, a través de nuevas investigaciones, tener conocimientos más acabados en cuanto a las causas que provocan o contribuyen a la fractura de los instrumentos rotatorios estudiados, particularmente aquellas que parecieran tener su origen en defectos que la aleación metálica aporta y los que la fabricación del instrumento produce.

REFERENCIAS

1. Haapasalo, M. & Shen, Y. Evolution of nickel-titanium instruments: from past to future. *Endod. Top.* **29**, 3–17 (2013).
2. Yeguez Rodríguez, E. Aleación de Níquel - Titanio: y su uso en Endodoncia. *Acta Odontológica Venez.* **38**, 4–7 (2000).
3. Walia, H., Brantley, W. A. & Gerstein, H. An initial investigation of the bending and torsional properties of nitinol root canal files. *J. Endod.* **14**, 346–351 (1988).
4. Thompson, S. a & Dummer, P. M. *Int. End. J.* **30**, 1–7 (1997).
5. Bryant, S. T., Thompson, S. a, al-Omari, M. a & Dummer, P. M. Shaping ability of ProFile rotary nickel-titanium instruments with ISO sized tips in simulated root canals: Part 2. *Int. Endod. J.* **31**, 282–289 (1998).
6. Bonaccorso, A. Tripi T.R, Rondelli G, Condorelli G.C. Pitting Corrosion Resistance of Nickel-Titanium Rotary Instruments with Different Surface Treatments in Seventeen Percent Ethylenediaminetetraacetic Acid and Sodium Chloride Solutions. *J. Endod.* **34**, 208–211 (2008).
7. Braga, L., Magalhaes, R., Puente, C.G., Buono & Bahia. M.G.A, Nakagawa. R.K.L. Physical and mechanical properties of twisted or ground nickel-titanium instruments. *Int. Endod. J.* **46**, 458–465 (2013).
8. Anderson, M. E., Price, J. W. H. & Parashos, P. Fracture Resistance of Electropolished Rotary Nickel-Titanium Endodontic Instruments. *J. Endod.* **33**, 1212–1216 (2007).
9. Sharma, S., Kumar Tewari, R., Kharade, P. & Kharade, P. Comparative Evaluation of the Effect of Manufacturing Process on Distortion of Rotary ProFile and Twisted File: An in Vitro SEM Study. *J. Dent. Res. Dent. Clin. Dent. Prospects* **9**, 216–220 (2015).
10. Leonardo M.R., Leonardo, R.D. *Sistemas rotatorios en endodoncia: Instrumentos de níquel-titanio.* (2002).
11. Kuhn, G. & Jordan, L. Fatigue and mechanical properties of nickel-titanium endodontic instruments. *J. Endod.* **28**, 716–720 (2002).
12. Knowles, K. I., Hammond, N. B., Biggs, S. G. & Ibarrola, J. L. Incidence of instrument separation using lightspeed rotary instruments. *J. Endod.* **32**, 14–16 (2006).
13. Tzanetakakis, G. N., Kontakiotis, E. G., Maurikou, D. V. & Marzelou, M. P. Prevalence and Management of Instrument Fracture in the Postgraduate Endodontic Program at the Dental School of Athens: A Five-year Retrospective Clinical Study. *J. Endod.* **34**, 675–678 (2008).
14. Wycoff, R. C. & Berzins, D. W. An in vitro comparison of torsional stress properties of three different rotary nickel-titanium files with a similar cross-sectional design. *J. Endod.* **38**, 1118–1120 (2012).

15. Gambarini, Grande N., Plotino P., Somma F, Garala M., De Luca M., and Testarelli, L. Fatigue Resistance of Engine-driven Rotary Nickel-Titanium Instruments Produced by New Manufacturing Methods. *J. Endod.* **34**, 1003–1005 (2008).
16. Bui, T. B., Mitchell, J. C. & Baumgartner, J. C. Effect of Electropolishing ProFile Nickel-Titanium Rotary Instruments on Cyclic Fatigue Resistance, Torsional Resistance, and Cutting Efficiency. *J. Endod.* **34**, 190–193 (2008).
17. Cheung, G. S. P., Shen, Y. & Darvell, B. W. Does Electropolishing Improve the Low-cycle Fatigue Behavior of a Nickel-Titanium Rotary Instrument in Hypochlorite? *J. Endod.* **33**, 1217–1221 (2007).
18. Schäfer, E. & Oitzinger, M. Cutting Efficiency of Five Different Types of Rotary Nickel-Titanium Instruments. *J. Endod.* **34**, 198–200 (2008).
19. Wei, X., Ling, J., Jiang, J., Huang, X. & Liu, L. Modes of Failure of ProTaper Nickel-Titanium Rotary Instruments after Clinical Use. *J. Endod.* **33**, 276–279 (2007).
20. Barbosa, F. O. G., da Cunha Ponciano Gomes, J. A. & de Araújo, M. C. P. Influence of Previous Angular Deformation on Flexural Fatigue Resistance of K3 Nickel-Titanium Rotary Instruments. *J. Endod.* **33**, 1477–1480 (2007).
21. Cho, O.-I. Versluis, A., Cheung G.S.P. Cyclic fatigue resistance tests of Nickel-DWTitanium rotary files using simulated canal and weight loading conditions. *Restor. Dent. Endod.* **38**, 31–5 (2013).
22. Alapati, S. B., Brantley, W. A., Timothy A. Svec, T. A., Powers, J. M., Nusstein, J. M., Daehn, G. S. SEM observations of nickel-titanium rotary endodontic instruments that fractured during clinical Use. *J. Endod.* **31**, 40–43 (2005).
23. Inan, U., Aydin, C., Uzun, O., Topuz, O. & Alacam, T. Evaluation of the Surface Characteristics of Used and New ProTaper Instruments: An Atomic Force Microscopy Study. *J. Endod.* **33**, 1334–1337 (2007).
24. Bahia, M. G. A., Melo, M. C. C. & Buono, V. T. L. Influence of cyclic torsional loading on the fatigue resistance of K3 instruments. *Int. Endod. J.* **41**, 883–891 (2008).
25. George Dieter, *Metalurgia Mecánica*, Ed. Aguilar (1967), Cap. 12 - Fatiga de los metales, pp. 316-357
26. Bhagabati, N., Yadav, S. & Talwar, S. An in vitro cyclic fatigue analysis of different endodontic nickel-titanium rotary instruments. *J. Endod.* **38**, 515–518 (2012).
27. Lee, M. H. Versluis, A., Kim, B., Lee, CH., Hur, B., and Kim, H. Correlation between experimental cyclic fatigue resistance and numerical stress analysis for nickel-titanium rotary files. *J. Endod.* **37**, 1152–1157 (2011).
28. Lopes, H. P., Maia, W. M., Rodrigues, N., De Souza, N. C., Elias, C. N., Lima, E. J., Cabral, B. E. Influence of curvature location along an artificial canal on cyclic fatigue of a rotary nickel-titanium endodontic instrument. *Oral Surgery, Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology* **111**, 792–796 (2011).
29. Yao, J. H., Schwartz, S. A. & Beeson, T. J. Cyclic fatigue of three types of rotary nickel-titanium files in a dynamic model. *J. Endod.* **32**, 55–57 (2006).

30. Sattapan, B., Nervo, G., Palamara, J., Messer, H. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J. Endod.* **26**, 161–5 (2000).
31. Lopes, H. P., Moreira, E. J. L., Nelson Elias, C., Andriola de Almeida, R. & Neves, M. S. Cyclic Fatigue of Protaper Instruments. *J. Endod.* **33**, 55–57 (2007).
32. Pruett, J. P., Clement, D. J. & Carnes, D. L. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments. *J. Endod.* **23**, 77–85 (1997).
33. Dietz, D. B., Di Fiore, P. M., Bahcall, J. K. & Lautenschlager, E. P. Effect of rotational speed on the breakage of nickel-titanium rotary files. *J. Endod.* **26**, 68–71 (2000).
34. Schrader, C. & Peters, O. A. Analysis of Torque and Force with Differently Tapered Rotary Endodontic Instruments In Vitro. *J. Endod.* **31**, 120–123 (2005).
35. Kitchens, G., Liewehr, F. R. & Moon, P. C. The Effect of Operational Speed on the Fracture of Nickel-Titanium Rotary Instruments. *J. Endod.* **33**, 52–54 (2007).
36. Li, U.-M., Lee, B.-S., Shih, C.-T., Lan, W.-H. & Lin, C.-P. Cyclic fatigue of endodontic nickel titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J. Endod.* **28**, 448–451 (2002).
37. Duran-Sindreu, F., García M., Olivieri J., Mercade M., Morello, S., Roig, M. A comparison of apical transportation between FlexMaster and twisted files rotary instruments. *J. Endod.* **38**, 993–995 (2012).
38. Zhao, D., Shen, Y., Peng, B. & Haapasalo, M. Micro-computed tomography evaluation of the preparation of mesiobuccal root canals in maxillary first molars with Hyflex CM, twisted files, and K3 instruments. *J. Endod.* **39**, 385–388 (2013).
39. Gambarini, G. Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments after clinical use with low-and high-torque endodontic motors. *J. Endod.* **27**, 772–774 (2001).
40. Mandel, Adib- Yazdi, M., Benhamou L.M., Lachkar, T., Mesgouez, C., Sobel, M. Rotary Ni-Ti profile systems for preparing curved canals in resin blocks: Influence of operator on instrument breakage. *Int. Endod. J.* **32**, 436–443 (1999).
41. Ray, J. J., Kirkpatrick, T. C. & Rutledge, R. E. Cyclic Fatigue of EndoSequence and K3 Rotary Files in a Dynamic Model. *J. Endod.* **33**, 1469–1472 (2007).
42. Schäfer, E. & Tepel, J. Relationship Between Design Features of Endodontic Instruments and Their Properties. Part 3. Resistance to Bending and Fracture. *J. Endod.* **27**, 299–303 (2001).
43. Clauder, T. & Baumann, M. A. ProTaper NT system. *Dent. Clin. North Am.* **48**, 87–111 (2004).
44. Ruddle, C. & Geometries, P. The ProTaper Technique. *Endod. Top.* **10**, 548–561 (2005).
45. Peters, O. A., Peters, C. I., Schönenberger, K. & Barbakow, F. ProTaper rotary root canal preparation: Effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. *Int. Endod. J.* **36**, 86–92 (2003).

46. Veltri, M., Mollo, A., Pini, P. P., Ghelli, L. F. & Balleri, P. In vitro comparison of shaping abilities of ProTaper and GT rotary files. *J. Endod.* **30**, 163–166 (2004).
47. Berutti, E., Negro, A. R., Lendini, M. & Pasqualini, D. Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *J. Endod.* **30**, 228–230 (2004).
48. Ha, J. H., Kim, S. K., Cohenca, N. & Kim, H. C. Effect of R-phase heat treatment on torsional resistance and cyclic fatigue fracture. *J. Endod.* **39**, 389–393 (2013)
49. Larsen, C. M., Watanabe, I., Glickman, G. N. & He, J. Cyclic Fatigue Analysis of a New Generation of Nickel Titanium Rotary Instruments. *J. Endod.* **35**, 401–403 (2009).
50. Yamazaki-Arasaki, A. K., Salgado R. J., Kleine, B. M., Araki, A.T., Dos Santos, M., Prokopowitsch, I. Qualitative analysis of files of four different rotary systems, before and after being used for the twelfth time. *Microsc. Res. Tech.* **76**, 79–85 (2013).
51. Testarelli, L., Grande, N.M., Plotino, G., Lendini, M., Pongione, G., De Paolis, G., Rizzo, F., Milana, V., and Gambarini, G. *Open Dent. J.* **3**, 55–8 (2009).
52. Elnaghy, A. M. Cyclic fatigue resistance of ProTaper Next nickel-titanium rotary files. *Int. Endod. J.* **47**, 1034–1039 (2014).
53. Pedullà, E., Plotino, G., Maria Grande, N., Pappalardo, A. & Rapisarda, E. Cyclic fatigue resistance of four nickel-titanium rotary instruments: a comparative study. *Ann. Stomatol. (Roma)*. **III**, 59–63 (2012).
54. Bouska, J., Justman, B., Williamson, A., Delong, C. & Qian, F. Resistance to cyclic fatigue failure of a new endodontic rotary file. *J. Endod.* **38**, 667–669 (2012).
55. Al-Hadlaq, S. M. Evaluation of cyclic flexural fatigue resistance of 25/0.04 and 25/0.06 twisted file rotary nickel-titanium endodontic instruments. *Aust. Endod. J.* **39**, 62–65 (2013).
56. Kim, H. C., Yum, J., Hur, B. & Cheung, G. S. P. Cyclic Fatigue and Fracture Characteristics of Ground and Twisted Nickel-Titanium Rotary Files. *J. Endod.* **36**, 147–152 (2010).
57. Lee, W., Hwang, Y. J., You, S. Y. & Kim, H. C. Effect of reciprocation usage of nickel-titanium rotary files on the cyclic fatigue resistance. *Aust. Endod. J.* **39**, 146–150 (2013).
58. Kramkowski, T. R. & Bahcall, J. An In Vitro Comparison of Torsional Stress and Cyclic Fatigue Resistance of ProFile GT and ProFile GT Series X Rotary Nickel-Titanium Files. *J. Endod.* **35**, 404–407 (2009).
59. Schneider, S. W. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surgery, Oral Med. Oral Pathol.* **32**, 271–275 (1971).
60. Simon, S., Machtou, P., Tomson, P., Adams, N. & Lumley, P. Influence of fractured instruments on the success rate of endodontic treatment. *Dent. Update* **35**, 172–174, 176, 178–179 (2008).

61. Ingle J., B. L. *Fifth Edition. Higher Education* (Interamericana).
62. ElDeeb, ME., Boraas, JC. The effect of different files on the preparation shape of severely curved canals. *Int Endodontics J.***18**, 1-7 (1985).
63. Alodeh, MH., Doller, R., Dummer, PM. Shaping of simulated root canals in resin blocks using the step-back technique with K-files manipulated in a simple in/out filing motions. *Int Endod J.* **22**,107-117 (1989).
64. Tripi, T. R., Bonaccorso, a, Tripi, V., Condorelli, G. G. & Rapisarda, E. Defects in GT rotary instruments after use: an SEM study. *J. Endod.* **27**, 782–5 (2001).
65. Luzi, A., Forner, L., Almenar, A. & Llana, C. Microstructure alterations of rotary files after multiple simulated operative procedures. *Med. Oral Patol. Oral Cir. Bucal* **15**, 658–662 (2010).
66. Caballero, H., Rivera, F. & Salas, H. Scanning electron microscopy of superficial defects in Twisted files and Reciproc nickel-titanium files after use in extracted molars. *Int. Endod. J.* **48**, 229–235 (2015)
67. Troian, C. H., Só, M. V. R., Figueiredo, J. A. P. & Oliveira, E. P. M. Deformation and fracture of RaCe and K3 endodontic instruments according to the number of uses. *Int. Endod. J.* **39**, 616–625 (2006).
68. Ersoy, I., Kol, E., Demirhan Uygun, A., Tanriver, M. and Seckin, F. Comparison of cyclic fatigue resistance between different NiTi instruments with 4% taper. *Microsc. Res. Tech.* **79**, 345–348 (2016).
69. Pedulla, E., Lo Savio F., Boninelli S., Plotino G., Grande N., La Rosa G., Rapisarda E. Torcional and Cyclic Fatigue Resistance of a New Nickel- Titanium instrument Manufactured by Electrical Discharge Machining. *J Endod.* **42**, 156-159. (2016).
70. Plotino, G. Grande, N.M., Melo, M.C., Bahia, M.G., Testarelli, L., Gambarini, G. Cyclic fatigue of NiTi rotary instruments in a simulated apical abrupt curvature. *Int. Endod. J.* **43**, 226–230 (2010).
71. Aminsobhani, M., Meraji, N. & Sadri, E. Comparison of Cyclic Fatigue Resistance of Five Nickel Titanium Rotary File Systems with Different Manufacturing Techniques. *J. Dent. Tehran Univ. Med. Sci.* **12**, 636–646 (2015).
72. Bhagabati, N., Yadav, S. & Talwar, S. An in vitro cyclic fatigue analysis of different endodontic nickel-titanium rotary instruments. *J. Endod.* **38**, 515–518 (2012).
73. Kim, H., Cheung, G. S. & Lee, C. Comparison of Forces Generated During Root Canal Shaping and Residual Stresses of Three Nickel – Titanium Rotary Files by Using a Three-Dimensional Finite-element Analysis. **34**, (2017).
74. Oh So R., Chang S., Lee Y., Gu Y., Son W., Lee W., Baek S., Bae K., Choi G., Lim S., Kum K. A comparison of nickel-titanium rotary instruments manufactured using different methods and cross-sectional areas: ability to resist cyclic fatigue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*;**109**: 622-628. (2010)

75. Grande, N. M., Plotino, G., Pecci, R., Bedini, R., Malagnino, V.A., Somma, F. C. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of instruments from two nickel-titanium rotary systems. *Int. Endod. J.* **39**, 755–763 (2006).
76. Gani O., Visvisian C. Apical canal diameter in the first upper molar at various ages. *J. Endod.* **25**, 689-691 (1999).
77. Diccionario Enciclopédico. Editorial Larousse, 2009, Barcelona.
78. Griffith, A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil.Trans.Roy. Soc.Lond.* A221, pp.163-198 (1921).