

**NOTA: Este archivo corresponde al documento enviado a la editorial para corrección de estilo y diagramación. Este archivo será remplazado tan pronto como el artículo diagramado esté listo. La información de publicación será entonces actualizada.**

**SECCIÓN:** Dossier Endodoncia, Terapia Moderna y Revolucionaria

**TITULILLO:** Análisis teórico de limas endodónticas

**Evaluación de la resistencia teórica a la flexión de tres instrumentos utilizados en endodoncia mediante análisis de elementos finitos**

**A Theoretical Evaluation Flexural Strength of three Instruments used in Endodontics through Finite Element Analysis**

**Sandra Milena Prieto Cárdenas**

Odontóloga, Especialista en Endodoncia, Universidad Nacional de Colombia. Docente ocasional Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

**Carlos Julio Cortes Rodríguez**

Ingeniero Mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Magister en ciencias económicas con énfasis en industria y tecnología, Magister en materiales y procesos. PhD en Ingeniería, Universidad de Kassel en Alemania. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia.

**Luis Fernando Gamboa Martínez**

Odontólogo, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Especialista en Endodoncia, Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia. Magister en Epidemiología clínica, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Docente Universidad el Bosque

**Javier Laureano Niño Barrera**

Odontólogo, Especialista en endodoncia, Magister en Ingeniería Biomédica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia, Profesor asistente Universidad el bosque.

## **CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO**

Prieto SM, Cortés CJ, Gamboa LF, Niño JL. Evaluación de la resistencia teórica a la flexión de tres instrumentos utilizados en endodoncia. Análisis por elementos finitos. Univ Odontol. 2015 Jul-Dic; 34(73).

Recibido para publicación: 24/06/2015

Aceptado para publicación: 17/12/2015

Disponible en: <http://www.javeriana.edu.co/universitasodontologica>

## RESUMEN

**Antecedentes:** Los factores asociados a la fractura de un instrumento no se han examinado individualmente, este análisis es posible mediante el método de los elementos finitos **Objetivo:** Evaluar teóricamente el comportamiento a la flexión de tres diseños de instrumentos utilizados para la preparación biomecánica de los conductos radiculares mediante un análisis de elementos finitos. **Métodos:** Por medio de Ingeniería inversa se generaron los planos de las limas ProTaper Universal F2®, Mtwo 25/06® y WaveOne Primary® y con los planos posteriormente se construyeron los modelos matemáticos. Se realizó un análisis de elementos finitos y como material se determinó una aleación de Níquel-Titanio, con propiedades mecánicas certificadas por la base de datos MATWEB®. Se colocaron restricciones en todos los grados de libertad en el mango de cada uno de los modelos y se aplicó una carga de 1 Newton en la punta de cada instrumento. **Resultados:** Los esfuerzos de Von Mises resultantes fueron: Mtwo 25/06®: 673,363 MPa con una deformación del 18 %, ProTaper Universal F2®: 341,322 MPa con una deformación de 7.6 % y WaveOne Primary®: 227.593 MPa y una deformación de 5 %. **Conclusión:** Ninguna lima superó el límite de falla por fractura (960 MPa), sin embargo el modelo de la lima Mtwo 25/06® presentó los valores de esfuerzo y deformación más altos, lo cual indica una buena flexibilidad que le permite ser usada en conductos con curvas pronunciadas, pero debido a la deformación resultante se recomienda dar un solo uso para prevenir su fractura

## PALABRAS CLAVE

Aleación de níquel titanio; fatiga por flexión; resistencia a la fatiga cíclica

## AREAS TEMÁTICAS

Endodoncia; análisis de elementos finitos

## ABSTRACT

**Background:** Factors associated with fracture of an instrument are not examined individually, this analysis is possible through the finite element method. **Objective:** To evaluate theoretically the flexural behavior of three designs of instruments used for biomechanical preparation of root canals using a finite element analysis. **Methods:** Through Reverse engineering drawings of ProTaper Universal files F2®, Mtwo 25 / 06® and WaveOne Primary® were generated and with these same planes mathematical models were built. Finite element analysis was performed and as material a nickel titanium alloy with mechanical properties certified by MATWEB® data base was determined. Restrictions in all degrees of freedom on the handle of each of the models were placed and a load of 1 Newton at the tip of each tool was applied. **Results:** The resulting Von Mises efforts were Mtwo 25 / 06®: 673.363 MPa with a strain of 18%, ProTaper Universal F2®: 341.322 MPa with a strain of 7.6% and WaveOne Primary®: 227 593 MPa and a strain of 5 %. **Conclusion:** No file exceeded the limit of failure by fracture (960 MPa), however the model Mtwo 25 / 06® lima presented stress values and higher deformation, indicating good flexibility

allowing it to be used in ducts with sharp edges, but because of the resulting deformation is recommended that one use to prevent fracture

## **KEYWORDS**

Cyclic fatigue resistance; flexural fatigue; nickel titanium alloy

## **THEMATIC FIELDS**

Endodontics; finite element analysis

## **INTRODUCCIÓN**

En endodoncia se han utilizado diferentes aleaciones metálicas en la fabricación de instrumentos para lograr una buena preparación biomecánica y respetando la anatomía del conducto radicular, es así como en últimos 30 años se ha vuelto popular el uso de la aleación de níquel-titanio para la fabricar instrumental rotatorio, el cual ha sustituido gradualmente las limas de acero inoxidable debido a su alta flexibilidad y propiedades como memoria de forma (1,2).

Aunque estas propiedades permiten una adecuada preparación biomecánica de conductos curvos la aleación de níquel-titanio presenta una mayor tasa de fractura que los instrumentos fabricados con acero inoxidable. Se ha reportado la prevalencia de fractura de instrumentos entre un 5 y un 20 % (3-7), esta complicación influye en el resultado del tratamiento de conductos y disminuye el pronóstico entre el 6 y el 20 % (8-11).

La fractura de limas endodónticas puede ser de dos formas: por torsión y por flexión, La fractura por torsión se produce por el atrapamiento de un segmento del instrumento rotatorio dentro del conducto radicular, este al continuar girando sobrepasa su límite elástico e inicia la deformación plástica que lleva posteriormente a la fractura del instrumento, este tipo de fractura puede prevenirse realizando procedimientos como el Pre ensanchamiento o Glide Path utilizando para este fin instrumentos como las limas PathFile® o ProGlider®. Por su parte la fractura por flexión se produce cuando el instrumento gira libremente en una curvatura, dicha curvatura genera en la lima ciclos de tensión/compresión; estos esfuerzos acumulados en el punto de máxima flexión llevan al instrumento a la fractura. A diferencia de la fractura torsional este tipo de fractura es dependiente de la morfología del conducto radicular produciéndose en mayor proporción en conductos con curvaturas severas. La desventaja que presenta una lima de níquel-titanio es que se puede fracturar sin previo aviso, es decir sin mostrar durante el procedimiento clínico señales visibles de deformación plástica lo que hace muy difícil prevenir este accidente (12-21).

En la actualidad los instrumentos reciprocantes como el WaveOne® y el Reciproc®, debido a su movimiento, pueden prevenir la fractura por torsión. Sin embargo estos instrumentos, al igual que los instrumentos de rotación total, aún siguen siendo susceptibles a la fractura por flexión. Existen diversos factores que influyen en la fractura de instrumentos como son: El material de fabricación ,la habilidad del operador, el número de usos, y la configuración geométrica del instrumento este último es un determinante importante debido al efecto que tiene en el comportamiento mecánico de la lima como herramienta de corte lamentablemente de forma experimental no es posible aislar la importancia específica del diseño geométrico, ya que

actualmente hay limas endodónticas con nuevos diseños y nuevos materiales en donde es difícil distinguir cuál es el factor que más incide en la prevención de la fractura del instrumento (3, 11, 22, 23).

Para evaluar la influencia de los factores anteriormente mencionados, se pueden utilizar dos métodos: el primero es de forma experimental tomando las limas y aplicándoles cargas, lo cual puede ser costoso y como ya se mencionó, no permite observar por separado las variables que influyen en la fractura, y el segundo método es mediante un análisis de elementos finitos (FEA), el cual es una alternativa computacional no experimental ampliamente utilizada para evaluar el comportamiento mecánico de las limas rotatorias de níquel-titanio. El FEA permite, además de una fácil observación de las fuerzas que actúan sobre el instrumento, crear diseños y evaluar limas hipotéticas con diversos materiales, instrumentos virtuales que podrían llegar a ser fabricados, pero que en la actualidad no existen. El FEA permite una suposición lógica de cómo se podría comportar mecánicamente un nuevo diseño de lima y así posteriormente proceder a su fabricación real y a la realización de pruebas experimentales con el fin de que pueda obtener aplicación clínica (21, 24-27).

En la actualidad no es claro en la literatura si la flexibilidad de los instrumento reciprocantes y rotatorios se debe a su diseño o al material del cual es fabricado, por tanto el objetivo de este artículo fue evaluar teóricamente el comportamiento a la flexión de tres instrumentos con diferente diseño geométrico utilizados para realizar la preparación biomecánica en endodoncia, mediante un análisis de elementos finitos

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se seleccionaron tres instrumentos para la preparación biomecánica en endodoncia, disponibles en el mercado con diferentes diseños geométricos de corte transversal, pero con igual diámetro de en la punta, dos rotatorios: ProTaper Universal F2® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Suiza) y Mtwo 25/06® (VDW, Munich, Germany) y un instrumento reciprocante: WaveOne Primary® (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Suiza).

### **Modelos de los instrumentos**

Por medio de ingeniería inversa se utilizó un proyector de perfiles para tomar las medidas de cada sector de la lima para generar los planos de cada uno de los instrumentos y con base en estos planos se desarrollaron modelos matemáticos utilizando el programa Autodesk inventor®.

Para el análisis de elementos finitos se utilizó el programa Autodesk Simulation Multiphysics® se hizo el enmallado de los modelos con un rango similar de elementos que permitiera un tiempo computacional aceptable (Tabla 1)

TABLA 1

NÚMERO DE ELEMENTOS POR INSTRUMENTO	
ProTaper Universal F2®	2940
Mtwo® 25/06®	3350
WaveOne Primary®	3197

Posteriormente se programó como único material para los tres instrumentos una aleación de níquel-titanio cuyas propiedades mecánicas están certificadas por la base de datos MATWEB® (Tabla 2).

TABLA 2  
PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE NÍQUEL-TITANIO REPORTADAS EN MATWEB®

<b>Mechanical properties</b>	
Tensile Strength, Ultimate	960 MPa
Tensile Strength, Yield	100 MPa
Elongation at Break	15,5%
Modulus of Elasticity	28 GPa
Poissons Ratio	0.30

### Condiciones de la simulación (condiciones de frontera)

Los comportamientos de los tres instrumentos fueron analizados numéricamente bajo las siguientes condiciones simuladas en el análisis de elementos finitos:

Para simular la Flexión se aplicó para cada modelo una restricción en cantiléver según se ha reportado por Kim y colaboradores. Se colocaron restricciones en todos los grados de libertad del instrumento en el mango del instrumento así su eje queda sostenido firmemente en su lugar, posteriormente se aplicó una carga concentrada de 1 N en la punta de cada instrumento solo en un nodo para evitar la acumulación de cargas (Figura 1) finalmente se resolvieron los esfuerzos de Von Mises resultantes para cada modelo (21, 24, 25, 28).

FIGURA 1  
RESTRICCIÓN EN CANTILÉVER EN LA BASE Y CARGA APLICADA EN LA PUNTA DE LA LIMA.

*MTwo 25/06 (VDW, Munich, Germany)*



*Protaper universal F2 (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Suiza)*



*Wave One (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Suiza)*



## RESULTADOS

Con una carga concentrada de 1 N, ninguno de los modelos de las limas utilizados alcanzó el límite de falla por fractura. El modelo de la lima Mtwo 25/06® tuvo mayor valor en los esfuerzos de Von Mises seguido del modelo de ProTaper Universal F2® y por último el modelo de WaveOne Primary®

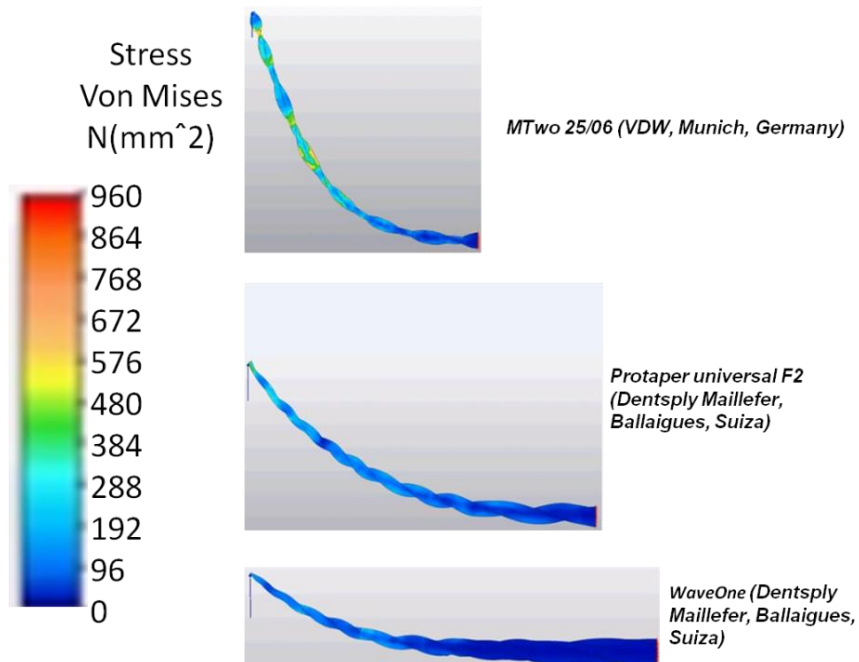
La punta fue el área donde el modelo de la lima Mtwo 25/06® presentó los mayores esfuerzos de Von Mises, específicamente se presentaron zonas en las estrías en donde se registraron los valores de esfuerzos más altos sin que se alcanzaran valores de falla por fractura. También se presentaron altos valores de esfuerzos de Von Mises en sectores del tercio medio del instrumento. Al comparar el comportamiento observado por los instrumentos ante la carga, se observa gráficamente la mayor flexibilidad del instrumento Mtwo® seguida por la del instrumento ProTaper®.

Teniendo en cuenta el límite de falla por deformación programado en el modelo (15.5%) solo el modelo de la lima Mtwo 25/06® superó el límite de deformación, los modelos de las limas ProTaper F2® y WaveOne primary® no superaron el límite de falla por deformación. (Tabla 3 – Figura 2).

TABLA 3  
RESULTADOS DE FLEXIÓN

	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación (%)</b>
<b>Mtwo® 25/06®</b>	673,363	18
<b>ProTaper Universal F2®</b>	341,322	7,6
<b>WaveOne Primary®</b>	227.593	5

FIGURA 2  
VALORES DE VON MISES PARA LOS 3 INSTRUMENTOS.



## DISCUSIÓN

Desde la introducción en 1988 del níquel-titanio en endodoncia se han desarrollado distintos diseños de instrumentos que intentan mejorar las características del acero inoxidable. Propiedades como la memoria de forma y superelasticidad han hecho que el níquel-titanio sea bastante útil en la conformación de conductos curvos. Sin embargo, aún persiste el riesgo de fractura de estos instrumentos dentro del conducto radicular, como un intento de solucionar esta complicación, las casas comerciales han sometido la aleación de níquel titanio convencional a tratamientos térmicos modificando su proceso de fabricación, pero aun así el riesgo de fractura está presente (2).

El presente artículo consideró el comportamiento mecánico a la flexión de tres instrumentos utilizados para realizar la preparación biomecánica en endodoncia con igual diámetro de punta y diferente configuración geométrica, con la idea de evaluar solo el diseño geométrico de cada instrumento, se programó en un análisis por medio del método de elementos finitos, como único material la aleación de níquel-titanio convencional aun sabiendo que WaveOne® está fabricado con una aleación de níquel-titanio tratada térmicamente llamada M-wire®, así conseguimos analizar la flexibilidad de los instrumentos relacionada únicamente con el diseño geométrico y no con la aleación con la cual fue fabricado el instrumento.

Desde el punto de vista mecánico, la cantidad de flexión en cantiléver a la cual es sometida cada lima, es una medida de la rigidez del instrumento que a su vez es producto del módulo elástico de la aleación; al utilizar un único material para los tres instrumentos, la diferencia en la rigidez va a ser el resultado de la configuración geométrica del instrumento y no del material (29).

Mtwo 25/06® presentó los valores de esfuerzo de Von Mises más altos, esto sugiere que este instrumento seguiría conductos curvos más fácilmente que los otros instrumentos debido a su flexibilidad. Sin embargo, teniendo en cuenta que este instrumento fue el único que superó el límite de deformación se debe señalar que si esta lima se utiliza en un conducto con curvatura de moderada a severa, no se debería utilizar una segunda vez, debido a que el instrumento ha sufrido un proceso de endurecimiento por deformación alterando sus propiedades mecánicas y elevando el riesgo de fractura.

Niño-Barrera y colaboradores. Realizaron un análisis de elementos finitos para determinar qué lima de la serie Mtwo® teóricamente tenía una mayor probabilidad de fractura. Dentro de los resultados a la flexión utilizando restricción en cantiléver de 1 N en la punta, el instrumento Mtwo 25/06® presentó el valor más alto de esfuerzos de Von Mises con 421.193 MPa, que es menor que el encontrado en nuestro estudio. Esto puede ser consecuencia de la programación del material, en nuestro caso utilizamos datos certificados por la base de datos MATWEB® en donde están las propiedades mecánicas de más de diez mil materiales, entre los que se encuentra la aleación de níquel-titanio, es de resaltar sin embargo que a pesar de esa diferencia en la programación en ninguno de los dos estudios la lima 25/06 de Mtwo® superó el límite de falla por fractura (28).

Fife y colaboradores. Reportan que el diseño afecta el comportamiento a la flexión influenciando el diámetro y conicidad del instrumento lo que a su vez afecta también la masa del

instrumento debido a que a que a mayor conicidad, mayor masa y mayor rigidez con obviamente menos flexibilidad por lo que un instrumento se podría fracturar con más facilidad. En nuestros resultados el modelo de WaveOne® presentó la mayor rigidez, debido a que por su diseño geométrico es el que mayor masa presenta comparado con los otros dos instrumentos. Se debe tener en cuenta que en la realidad este instrumento está fabricado con una aleación de M-wire® cuya elasticidad puede compensar la falta de flexibilidad de la lima (30).

Los resultados de esta investigación coinciden igualmente con lo reportado en diferentes estudios donde señalan que existe una correlación entre la rigidez del instrumento y su área de sección transversal o configuración geométrica. Por lo tanto si el diseño geométrico del instrumento cambia el comportamiento mecánico a la flexión también va a variar (23, 31, 32).

## **CONCLUSIONES**

Ningún modelo de lima superó el límite de falla por fractura, sin embargo el modelo de la lima Mtwo 25/06® presentó los valores de esfuerzo y deformación de Von Mises más altos, lo cual indica una buena flexibilidad que le permite ser usada en conductos con curvas pronunciadas, pero debido a la deformación resultante se recomienda solo utilizarlo una vez, de lo contrario existe un alto riesgo de fractura, la conicidad y el diseño transversal de la lima WaveOne Primary® hace que este instrumento sea más rígido y menos flexible, pero debido a que este instrumento está fabricado con M-wire® compensa la falta de flexibilidad de la lima.

## **RECOMENDACIONES**

Dada la rigidez de ProTaper F2® no se recomendaría usarlo en conductos con curvaturas severas, Igualmente en caso de curvas agudas se recomienda usar solo una vez la lima Mtwo® 25/06. Se recomienda hacer estudios que validen experimentalmente los resultados del presente artículo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimientos a la facultad de odontología de la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo brindado a esta investigación.

## **REFERENCIAS**

1. Thompson S. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. IEJ.2000 Jul; 33(4): 297-310. doi: 10.1046/j.1365-2591.2000.00339.x
2. Walia H, Brantley W, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. J Endod.1988; 14(7):346-51
3. Parashos P, Gordon I, Messer H. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. J Endod. 2004 Oct; 30(10): 722-5. doi:10.1097/01.DON.0000129963.42882.C9
4. Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. J Endod. 2000 Mar; 26(3):161-5. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00004770-200003000-00008>



5. Shen Y, Cheung GS, Bian Z, Peng B. Comparison of defects in ProFile and ProTaper systems after clinical use. *J Endod.* 2006 Jan; 32(1): 61-5. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2005.10.017>
6. Arens F, Hoen M, Steiman H, Dietz GJ. Evaluation of single-use rotary nickel-titanium instruments. *J Endod.* 2003 Oct;29(10): 664-6. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00004770-200310000-00013>
7. Alapati S, Brantley W, Svec T, Powers J, Nusstein J, Daehn G. SEM Observations of Nickel-Titanium Rotary Endodontic Instruments that Fractured During Clinical Use. *J Endod.* 2005 Jan; 31(1): 40-3. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/01.DON.0000132301.87637.4A>
8. Torabinejad M, Corr R, Handysides R, Shahbahang S. Outcomes of nonsurgical retreatment and endodontic surgery: a systematic review. *J Endod.* 2009 Jul; 35(7): 930-7. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2009.04.023>
9. Ng Y, Mann V, Gulabivala K. Outcome of secondary root canal treatment: a systematic review of the literature. *Int Endod J.* 2008 Dec; 41(12): 1026-46. doi: 10.1111/j.1365-2591.2008.01484.x.
10. Spili P, Parashos P, Messer H. The Impact of Instrument Fracture on Outcome of Endodontic Treatment. *J Endod.* 2005 Dec; 31(12): 845-50. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/01.don.0000164127.62864.7c>
11. Parashos P, Messer H. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. *J Endod.* 2006 Nov; 32(11): 1031-43. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2006.06.008>
12. Grande N, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Malagnino V, Somma F. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of instruments from two nickel-titanium rotary systems. *Int Endod J.* 2006 Oct; 39(10): 755-63. doi: 10.1111/j.1365-2591.2006.01143.x
13. Baek S, Lee C, Versluis A, Kim B, Lee W, Kim H. Comparison of torsional stiffness of nickel-titanium rotary files with different geometric characteristics. *J Endod.* 2011 Sep; 37(9): 1283-6. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2011.05.032>
14. Nino-Barrera JL, Cortés-Rodríguez CJ, Aguilera-Canon MC. Utilidad de la conformación del túnel liso antes de usar limas rotatorias endodónticas de níquel-titanio. *Rev Cubana Estomatol.* 2014 Jul-Set;51(3).
15. Berutti E, Cantatore G, Castellucci A, Chiandussi G, Pera F, Migliaretti G, et al. Use of nickel-titanium rotary PathFile to create the glide path: comparison with manual preflaring in simulated root canals. *J Endod.* 2009 Mar; 35(3): 408-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2008.11.021>
16. Roland D, Andelin W, Browning D, Roberthsu G, Torabinejad M. The Effect of Preflaring on the Rates of Separation for 0.04 Taper Nickel Titanium Rotary Instruments. *J Endod.* 2002 Jul; 28(7): 543-5. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00004770-200207000-00015>
17. Cassim I, Van der Vyver P. The importance of glide path preparation in endodontics: a consideration of instruments and literature. *SADJ* 2013 Aug; 68(7): 322-7.
18. Berutti E, Alovisi M, Pastorelli MA, Chiandussi G, Scotti N, Pasqualini D. Energy Consumption of ProTaper Next X1 after Glide Path with PathFiles and ProGlider. *J Endod.* 2014 Dec; 40(12): 2015-2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2014.08.011>
19. Elnaghy AM, Elsaka SE. Evaluation of Root Canal Transportation, Centering Ratio, and Remaining Dentin Thickness Associated with ProTaper Next Instruments with and without Glide Path. *J Endod.* 2014 Dec; 40(12): 2053-2056. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2014.09.001>

20. Patiño P, Biedma B, Liebana C, Cantatore G, Bahillo J. The Influence of a Manual Glide Path on the Separation Rate of NiTi Rotary Instruments. *J Endod.* 2005 Feb;31(2):114-6. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/01.don.0000136209.28647.13>
21. Kim HC, Kim HJ, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Versluis A. Mechanical response of nickel-titanium instruments with different cross-sectional designs during shaping of simulated curved canals. *Int Endod J.* 2009 Jul;42(7):593-602. doi: 10.1111/j.1365-2591.2009.01553.x
22. Franco V, Fabiani C, Taschieri S, Malentacca A, Bortolin M, Del Fabbro M. Investigation on the shaping ability of nickel-titanium files when used with a reciprocating motion. *J Endod.* 2011 Oct; 37(10): 1398-401. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2011.06.030>
23. Xu X, Eng M, Zheng Y, Eng D. Comparative study of torsional and bending properties for six models of nickel-titanium root canal instruments with different cross-sections. *J Endod.* 2006 Apr; 32(4): 372-5. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2005.08.012>
24. Kim HC, Cheung GS, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Kang SI. 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. *J Endod.* 2008 Jun; 34(6): 743-7. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.joen.2008.03.015>
25. Kim TO, Cheung GS, Lee JM, Kim BM, Hur B, Kim HC. Stress distribution of three NiTi rotary files under bending and torsional conditions using a mathematic analysis. *Int Endod J.* 2009 Jan; 42(1): 14-21. doi: 10.1111/j.1365-2591.2008.01481.x.
26. Cheung GS, Zhang EW, Zheng YF. A numerical method for predicting the bending fatigue life of NiTi and stainless steel root canal instruments. *Int Endod J.* 2011 Apr; 44(4): 357-61. doi: 10.1111/j.1365-2591.2010.01838.x.
27. Zhang EW, Cheung GS, Zheng YF. A mathematical model for describing the mechanical behaviour of root canal instruments. *Int Endod J.* 2011 Jan;44(1):72-6. doi: 10.1111/j.1365-2591.2010.01801.x
28. Nino-Barrera JL, Aguilera-Canon MC, Cortes-Rodriguez CJ. Theoretical evaluation of Nickel-Titanium Mtwo series rotary files. *Acta odontologica latinoamericana : AOL.* 2013; 26(2): 90-6. Epub 2013/12/07.
29. Timoshenko S, Goodier J. *Theory of Elasticity.* McGraw-Hill E, editor. New York1970.
30. Fife D, Gambarini G, Britto L. Cyclic fatigue testing of ProTaper NiTi rotary instruments after clinical use. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2004 Feb; 97(2): 251-6.
31. Schäfer E, Dzepina A, Danesh G. Bending properties of rotary nickel-titanium instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2003 Dec;96(6):757-63.
32. Turpin YL, Chagneau F, Vulcain JM. Impact of two theoretical cross-sections on torsional and bending stresses of nickel-titanium root canal instrument models. *J Endod.* 2000 Jul; 26(7): 414-7. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00004770-200007000-00009>

## CORRESPONDENCIA

Sandra Milena Prieto Cárdenas  
[smprietoc@unal.edu.co](mailto:smprietoc@unal.edu.co)

Carlos Julio Cortes Rodríguez  
[cjcortesr@unal.edu.co](mailto:cjcortesr@unal.edu.co)

Luis Fernando Gamboa Martínez  
[luifergamboa@gmail.com](mailto:luifergamboa@gmail.com)

Javier Laureano Niño Barrera  
[jlabinob@unal.edu.co](mailto:jlabinob@unal.edu.co)