



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LIMA  
ENDODÓNTICA ROTATORIA DE SECCIÓN S  
ITÁLICA.

Autor: Paula Alonso Pérez

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Co-Director: Saúl Manuel Dorado Nuño

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LIMA ENDODÓNTICA ROTATORIA DE SECCIÓN S ITÁLICA.**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada



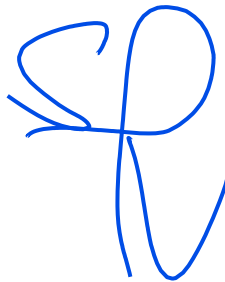
Fdo.: Paula Alonso Pérez

Fecha: 07/07/2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Jimenez  
Octavio,  
Jesus Ramon -  
- 06259224G  
Firmado digitalmente por Jimenez Octavio, Jesus Ramon - 06259224G  
Fecha: 2023.07.10 17:25:29 +02'00'



Fdo.: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Fecha: 07/07/2023

Fdo.: Saúl Manuel Dorado Nuño





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LIMA  
ENDODÓNTICA ROTATORIA DE SECCIÓN S  
ITÁLICA

Autor: Paula Alonso Pérez

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Codirector: Saúl Manuel Dorado Nuño

Madrid



# Agradecimientos

Este proyecto coloca el broche final a un camino de cuatro años lleno de esfuerzo superación, aprendizaje e ilusión. Es difícil poner en pocas palabras la grandísima gratitud que siento al haber tenido la oportunidad de finalizar mis estudios en la Universidad Pontificia de Comillas.

En primer lugar, agradecer a mi familia, no sólo por brindarme la oportunidad de formarme en esta escuela, si no por el apoyo incondicional y por tener fe en mí en todo momento, aun cuando parecía que no se podía seguir adelante. A mis amigos que me llevo de esta etapa universitaria, la verdadera razón por la que he conseguido sacar adelante la carrera, por compartir las largas horas de estudio, estrés, mis mayores alegrías y también tristezas. Sin ellos no hubiese sido posible llegar a dónde me encuentro ahora.

Especialmente me gustaría agradecer a Jesús Jiménez Octavio por ser guía en todo el proceso del proyecto desde el primer momento, por transmitirme la pasión y la motivación por la investigación, su entrega y ayuda, no he podido tener mejor referente que represente mejor los valores que definen esta escuela. A Saúl Dorado Nuño, por su infinita ayuda, paciencia, apoyo y sinceridad a lo largo del proyecto, he aprendido grandísimas lecciones de las que siempre le estaré agradecida. A Gonzalo Barrachina Mateo, por brindarme su ayuda en todo momento y trabajar conmigo mano a mano hasta alcanzar mis objetivos en el proyecto.

Por último, pero no por ello menos importante, a la Universidad Pontificia de Comillas, en especial a todo su personal docente. Me han enseñado el valor del esfuerzo, resiliencia, el buen hacer de las cosas, aprender de los errores y saber levantarse ante la adversidad. La formación que me llevo es un verdadero regalo y un orgullo que llevaré siempre por delante. Me gustaría realizar un último agradecimiento especial, para Félix Alonso Sanz, docente de la escuela que me ha acompañado en este camino lleno de emociones y superación. Gracias por creer en mí y darme siempre palabras de aliento en los momentos de oscuridad. Esta escuela siempre le estará agradecida por todo lo enseñado entre estas paredes, y yo eternamente.

# **DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LIMA ENDODÓNTICA ROTATORIA DE SECCIÓN S ITÁLICA**

**Autor: Alonso Pérez, Paula**

Director: Jiménez Octavio, Jesús Ramón

Codirector: Saúl Manuel Dorado Nuño

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto plantea la optimización paramétrica de una lima endodóntica, mediante simulaciones computacionales aplicando el análisis de elementos finitos. Se evaluará la herramienta en dos y tres dimensiones, comprobando su resistencia a la flexión, torsión y combinación entre ambas.

**Palabras clave:** Lima, Análisis de elementos finitos, ensayo de flexión, ensayo de torsión, optimización paramétrica.

### **1. Introducción**

Durante la práctica de la endodoncia existen diversos factores que hacen que se produzca el fracaso de la técnica, siendo uno de ellos la fractura de la herramienta. Por esta razón, en este trabajo se busca modelar una lima mediante simulaciones computacionales, realizando una optimización paramétrica de ésta.

### **2. Definición del proyecto**

El principal objetivo de esta investigación es presentar un modelo optimizado de la herramienta de acuerdo con sus principales causas de fallo. Por esta razón, se estudia y evalúa mediante estudios del campo de la biomecánica las condiciones más desfavorables para esta herramienta en cuestión.

Consecuentemente, al realizar la optimización en dos y tres dimensiones, se toma conciencia de lo analizado en estos estudios y centra principalmente el foco en los ensayos de flexión, torsión y la combinación de ambas para asimilar correctamente las situaciones reales críticas a la que se somete esta herramienta.

En el análisis de resultados, se pondrá el foco en comparar y analizar el modelo obtenido tras las optimizaciones frente a una serie de limas comerciales: la Protaper Ultimate Sequence Shaper, Protaper Ultimate Sequence Slider, la Protaper Gold SX y la Hyflex EDM.

### **3. Metodología**

En este proyecto, el proceso de optimización de la herramienta partirá de una lima de perfil S itálica que será sometida al siguiente proceso de optimización:

- Optimización en dos dimensiones: se evaluará el perfil de la lima ante la torsión y, mediante un proceso de optimización por simulaciones en Ansys, se obtendrá un perfil optimizado de acuerdo con la minimización de tensiones en el perfil, buscando la mejor relación entre el perfil de tensiones y material empleado.



- Optimización en tres dimensiones: A partir del perfil optimizado, se modelarán diferentes modelos en tres dimensiones de las herramientas en Solid Edge y SolidWorks. Se construirán variando su paso, evaluándose posteriormente estos modelos frente al inicial en los ensayos de flexión, torsión y el ensayo combinado de torsión y flexión realizados en Ansys Structural.

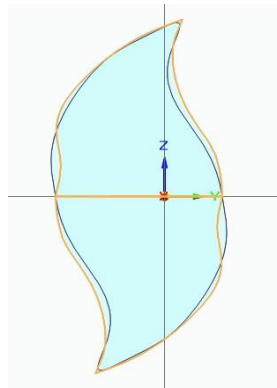
Una parte clave de este Proyecto será la comparación del modelo optimizado obtenido respecto a las limas comerciales comentadas, de cara a evaluar su validez frente a las herramientas que existen en el mercado actual.

Por ello, esta comparación se realizará mediante el ensayo combinado de torsión y flexión. Este ensayo es el que mejor evalúa la resistencia de estas herramientas al simular de la manera más cercana posible a la realidad la situación de atasco de la lima en el conducto, que supone en gran parte de los casos una situación crítica en la técnica provocando la rotura de la lima.

#### 4. Resultados

A la vista de los resultados de la optimización en dos dimensiones, se puede obtener que el perfil optimizado agrega material en la zona que debe soportar más esfuerzos, ensanchando la curvatura del perfil inicial, como se puede apreciar en la Figura 1. El nuevo modelo implica una reducción en las tensiones del 25.94% manteniendo prácticamente invariable el valor de la sección total.

**Figura 1. Sección optimizada**



Los resultados más significativos de la optimización en tres dimensiones vienen dados por el ensayo de torsión y flexión mostrados en la Figura 2, que confirman que el modelo optimizado, obtenido tras la mejora del perfil inicial, debe ser el correspondiente al paso 9,3.

La comparación con las limas comerciales nos muestra que la lima Hyflex EDM posee los valores tensiones más bajos, seguida del modelo optimizado del trabajo, seguida de las

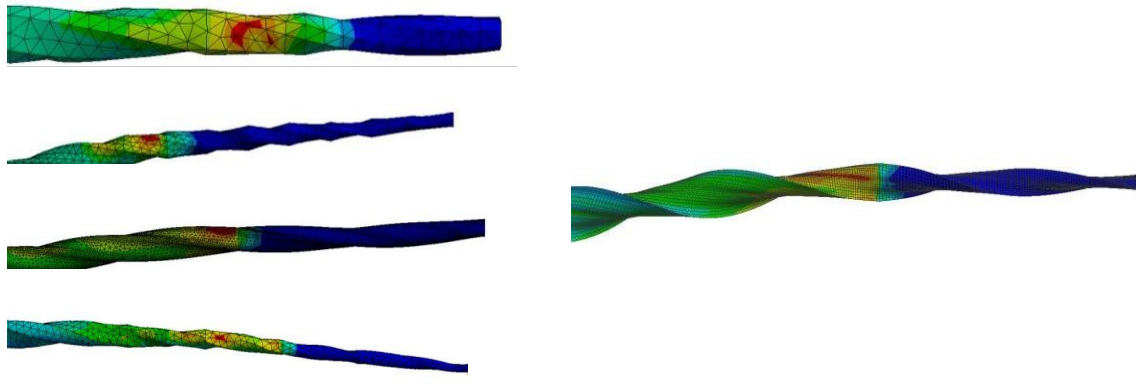
limas Protaper Ultimate Sequence Shaper, Protaper Gold y Protaper Ultimate Sequence Slider.

**Figura 2. Resultados ensayo torsión-flexión**

| Tensión máxima equivalente von Mises (MPa) |            |             |             |
|--|------------|-------------|-------------|
| Lima paso (n)                              | Flexión 0° | Flexión 45° | Flexión 90° |
| Inicial                                    | 222,95     | 215,32      | 265,52      |
| 8  | 261,02     | 250,84      | 278,73      |
| 8,7  | 249,7      | 220,52      | 236,75      |
| 9  | 248,02     | 257,76      | 240,57      |
| 9,3  | 231,11     | 202,76      | 219,49      |
| 10   | 231,27     | 223,99      | 206,92      |

| Tensión máxima equivalente von Mises (MPa) |            |             |             |
|--|------------|-------------|-------------|
| Lima paso (n)                              | Flexión 0° | Flexión 45° | Flexión 90° |
| Hyflex EDM                                 | 197,66     | 201,47      | 192,47      |
| Optimizada n=9,3                           | 231,11     | 202,76      | 219,49      |
| Protaper Shaper                            | 222,79     | 221,48      | 222,37      |
| Protaper Gold                              | 289,61     | 240,18      | 280,2       |
| Protaper Slider                            | 378,53     | 371,59      | 366,07      |

**Figura 3. Comparación perfiles de tensiones con limas comerciales**



## 5. Conclusiones

Como conclusiones del proyecto, en primer lugar, se consigue obtener un modelo optimizado en comparación con el modelo inicial, con una sección modificada y un paso de 9,3.

Los resultados del ensayo de flexión muestran el característico comportamiento flexible del NiTi en la herramienta, mientras que con el ensayo de torsión pura se llega a una fuerte relación que surge entre la resistencia a la torsión con el paso, ya que a mayor paso mejor resistencia a la torsión.

En segundo lugar, se consigue una lima que no sólo produce una disminución significativa en las tensiones equivalentes de von Mises, si no que posee una distribución optimizada de las tensiones, repartiéndolas a lo largo de las fibras de la herramienta, disminuyendo su riesgo a fractura.

A la vista de los perfiles de tensiones mostrados en la Figura 3, la lima obtenida presenta un perfil de tensiones que, en comparación con el resto de limas estudiadas, presenta una mejora en la distribución de las tensiones al tener una configuración que reparte dichas tensiones a lo largo de las fibras de la herramienta. Las limas comerciales en cuestión, aún pudiendo tener tensiones que a priori son menores, tienden a concentrar las tensiones máximas en una región crítica que supone un riesgo para herramienta de cara a la fractura de ésta.

Adicionalmente, este proceso de optimización llevado a cabo en el trabajo supone un beneficio sustancial para el fabricante, dado que, haciendo uso de la misma cantidad de material, sin modificarlo, se consigue una herramienta con propiedades mecánicas mejoradas. Con ello se consigue reducir los gastos que hubiesen conllevado mejorar la resistencia de la instrumentación por otros métodos más costosos.

A raíz de los resultados obtenidos tras el ensayo de torsión y flexión combinada, se abre la posibilidad de un estudio acerca de la relación entre el ángulo de curvatura de la herramienta y la resistencia que presenta.

Por último, en base a los resultados obtenidos, se propone una continuación de este trabajo que conste de una comprobación experimental de la herramienta obtenida y del método empleado, especialmente buscando verificar y mejorar los ensayos simulados,

# DESIGN AND OPTIMIZATION OF A RORATORY ENDODONTIC FILE WITH AN ITALIC CROSS-SECTION

**Author: Alonso Pérez, Paula.**

Supervisor: Jiménez Octavio, Jesús Ramón

Supervisor: Saúl Manuel Dorado Nuño

Collaborating Entity: Pontifical University of Comillas, ICAI.

## ABSTRACT

The main purpose of this study is the parametric optimization of an endodontic file, by means of simulations applying finite element analysis. The instrument will be evaluated and tested in two and three dimensions, verifying its bending and torsional resistance. This will be achieved simulating a bending test, a torsional test, and a singular test that combines both bending and torsional effort.

**Keywords:** Simulation, dental file, torsional test, bending test, finite element analysis, parametric optimization.

## 1. Introduction

During the practice of endodontics there exist a wide variety of factors that influence on failure of the technique, being one of the main causes the separation of the instrument. Therefore, this study aims to model a dental file through parametric optimization and static simulations in Ansys.

## 2. Definition of the project

The main objective of this investigation study is to present an optimized model of the tool according to face its main causes of failure. Accordingly, there will be evaluated several studies in this field of biomechanics and odontology in order to understand the worst-case scenarios for these instruments.

Consequently, when the optimization in two and three dimensions is fulfilled, it will be considered the information analyzed in previous studies, testing at first the torsion and bending properties of the file. The most important test consists of applying torsion and bending efforts simultaneously, which will be used to recreate the real obstruction of the file in the canal.

During the final results analysis, there will be an important comparison between the optimized instrument and a selected series of commercial files which will be Protaper Ultimate Sequence Shaper, Protaper Ultimate Sequence Slider, Protaper Gold SX and Hyflex EDM.

## 3. Methodology

In this project, the optimization process will start from a S italic profile that will be subjected to the following process:

- Two-dimension optimization: the profile will be evaluated against torsion and taking a look at the Maximum Stress according to Von Mises, there will be carried out a

parametric optimization. The result of this simulations, that will take place in Ansys, will be an optimized profile that will improve torsional resistance.

- Three-dimensional optimization: Once obtained the optimized profile, there will be modeled different 3D models in order to find the optimized pitch. There will be evaluated these different pitches: 8, 8.7, 9, 9.3 and 10, that will be modeled in Solid Edge and SolidWorks.

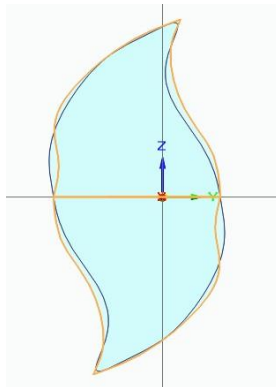
A key part of this investigation will be the comparison of the optimized model against the commercial files selected, in order to validate the new instrument and evaluate its presence in the present market.

Therefore, this will be achieved applying the combined torsion and bending test. This simulation is the one that best evaluates the resistance of these instruments by imitating as closely as possible to reality the situation of the jamming of the file in the canal, which in most cases ends in the failure of the practice by breaking the instrument.

#### 4. Results

In view of the results given by the two dimensional optimization, they demonstrate that que optimized profile adds material in certain regions where the tool suffers more stresses, widening the curvature of the initial profile. The new model implies a reduction of stresses of 25.94%, practically without increasing the total value of the section area.

**Figura 4. Optimized section**



The most significant results obtained during the three dimensional optimization are given by the torsion and bending test shown in Figura 5, which confirm that the optimized model, obtained after the improvement of the initial profile, should be the one corresponding to step 9.3.

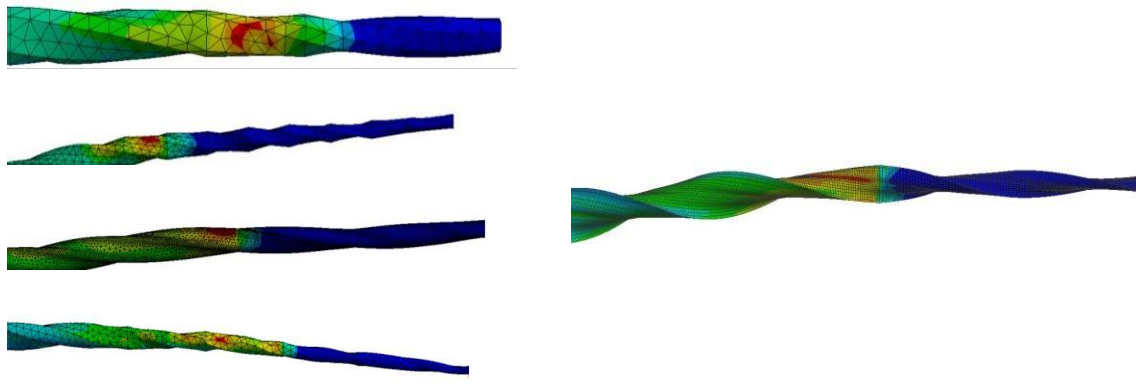
When comparing the optimized file with the commercial files, it shows that the Hyflex EDM file has the lowest stress values, followed by the optimized working model, followed

by the Protaper Ultimate Sequence Shaper, Protaper Gold and Protaper Ultimate Sequence Slider files.

**Figura 5. Results of bending-torsional test**

| Maximum Equivalent Stress von Mises (MPa) |            |             |             | Maximum Equivalent Stress von Mises (MPa) |            |             |             |
|---|------------|-------------|-------------|---|------------|-------------|-------------|
| File (n)                                  | Bending 0° | Bending 45° | Bending 90° | File                                      | Bending 0° | Bending 45° | Bending 90° |
| Inicial                                   | 222,95     | 215,32      | 265,52      | Hyflex EDM                                | 197,66     | 201,47      | 192,47      |
| 8   | 261,02     | 250,84      | 278,73      | Optimizada n=9,3                          | 231,11     | 202,76      | 219,49      |
| 8,7                                       | 249,7      | 220,52      | 236,75      | Protaper Shaper                           | 222,79     | 221,48      | 222,37      |
| 9   | 248,02     | 257,76      | 240,57      | Protaper Gold                             | 289,61     | 240,18      | 280,2       |
| 9,3                                       | 231,11     | 202,76      | 219,49      | Protaper Slider                           | 378,53     | 371,59      | 366,07      |
| 10  | 231,27     | 223,99      | 206,92      |   |            |             |             |

**Figura 6. Comparison between commercial files stresses distribution**



## 5. Conclusions

To conclude the project, firstly, there is an optimized model obtained compared to the initial model, with a modified section and a pitch of 9.3.

The results of the bending test show the characteristic flexible behavior of NiTi in the tool, while with the pure torsion test a strong relationship between the torsional strength with the pitch emerges, the higher the pitch the better the torsional strength.

Secondly, we obtained a file that not only produces a significant decrease in the equivalent von Mises stresses, but also has an optimized stress distribution, distributing them along the tool fibers, reducing the risk of fracture.

In view of the results, the file obtained presents a stress profile that, compared to the other files studied, shows an improvement in the distribution of stresses by having a configuration that distributes these stresses along the fibers of the tool. The commercial files in question, even though they may have a priori lower stresses, tend to concentrate the maximum stresses in a critical region that represents a risk for the tool with regard to its fracture.

Additionally, this optimization process carried out in the work represents a substantial benefit for the manufacturer, since, by using the same amount of material, without modifying it, a tool with improved mechanical properties is obtained. This reduces the costs that would have been incurred in improving the strength of the instrumentation by other more costly methods.

As a result of the stresses obtained after the combined bending and torsion test, the possibility of a study on the relationship between the bending angle of the tool and its strength is open.

Finally, based on the results obtained, a continuation of this work is proposed, consisting of an experimental verification of the tool obtained and the method used, especially seeking to verify and improve the simulated tests, as well as other suggestions for alternative studies on the subject.

# ÍNDICE DE LA MEMORIA

|   |            |
|---|------------|
| <i>Índice de figuras</i> .....                      | <b>III</b> |
| <b>Capítulo 1. Introducción</b> .....               | <b>8</b>   |
| 1.1 Motivación del proyecto.....                    | 9          |
| 1.2 Objetivo.....                                   | 9          |
| <b>Capítulo 2. Contexto teórico</b> .....           | <b>10</b>  |
| 2.1 Introducción .....                              | 10         |
| 2.2 Endodoncia.....                                 | 10         |
| 2.2.1 Introducción .....                            | 10         |
| 2.2.2 Procedimiento .....                           | 11         |
| 2.2.3 Instrumentación.....                          | 12         |
| 2.2.4 Limas de referencia .....                     | 17         |
| 2.3 Método de optimización .....                    | 18         |
| 2.3.1 Introducción al problema.....                 | 18         |
| 2.3.2 Definición del problema matemático .....      | 19         |
| 2.3.3 Método de optimización por simulaciones ..... | 20         |
| 2.3.4 Método de optimización de ANSYS .....         | 21         |
| <b>Capítulo 3. Estado de la cuestión</b> .....      | <b>24</b>  |
| 3.1 Fallos en la instrumentación.....               | 24         |
| 3.1.1 Causas de fallos.....                         | 24         |
| 3.2 Estudios relevantes .....                       | 27         |
| <b>Capítulo 4. Optimización paramétrica</b> .....   | <b>29</b>  |
| 4.1 Descripción del modelo inicial.....             | 29         |
| 4.1.1 Dimensiones .....                             | 30         |
| 4.2 Material .....                                  | 31         |
| 4.3 Optimización en dos dimensiones .....           | 32         |
| 4.3.1 Condiciones de ensayo .....                   | 32         |
| 4.3.2 Ensayo perfil inicial: Resultados.....        | 33         |
| 4.4 Optimización en dos dimensiones .....           | 34         |
| 4.4.1 Análisis resultados ensayo inicial .....      | 34         |



|  |           |
|--|-----------|
| 4.4.2 Optimización paramétrica.....                            | 34        |
| 4.4.3 Perfil optimizado .....                                  | 36        |
| 4.4.4 Conclusiones de la optimización en dos dimensiones ..... | 39        |
| 4.5 Optimización en tres dimensiones.....                      | 41        |
| 4.5.1 Metodología de modelado en tres dimensiones.....         | 41        |
| 4.5.2 Modelos para la optimización .....                       | 42        |
| 4.5.3 Mallado de los modelos.....                              | 43        |
| 4.5.4 Ensayos realizados .....                                 | 45        |
| <b>Capítulo 5. Discusión .....</b>                             | <b>60</b> |
| 5.1 Optimización en dos dimensiones .....                      | 60        |
| 5.2 Optimización en tres dimensiones.....                      | 60        |
| 5.2.1 Ensayo de flexión.....                                   | 61        |
| 5.2.2 Ensayo de torsión .....                                  | 61        |
| 5.2.3 Ensayo de flexión-Torsión.....                           | 62        |
| 5.2.4 Comparación con limas comerciales: .....                 | 63        |
| <b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>                           | <b>66</b> |
| <b>Capítulo 7. Alineación con los ODS .....</b>                | <b>67</b> |
| <b>Capítulo 8. Bibliografía.....</b>                           | <b>69</b> |
| <b>Capítulo 9. Anexo .....</b>                                 | <b>74</b> |

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Sección optimizada .....   | 8  |
| Figura 2. Resultados ensayo torsión-flexión .....  | 9  |
| Figura 3. Comparación perfiles de tensiones con limas comerciales .....                  | 9  |
| Figura 4. Optimized section.....   | 12 |
| Figura 5. Results of bending-torsional test.....   | 13 |
| Figura 6. Comparison between commercial files stresses distribution.....                 | 13 |
| Figura 7. Esquema de partes de una lima manual (Cruz, 2019).....                         | 13 |
| Figura 8. Lima Protaper Ultimate Sequence Shaper .....                                   | 18 |
| Figura 9. Lima Protaper Ultimate Sequence Slider .....                                   | 18 |
| Figura 10. Lima Hyflex EDM .....   | 18 |
| Figura 11. Lima Protaper Gold SX.....  | 18 |
| Figura 12. Modelo de simulación (Adby, 2013a).....                                       | 20 |
| Figura 13. Simulación del modelo de optimización (Adby, 2013b).....                      | 21 |
| Figura 14. Resultado de pieza optimizada por optimización topológica (Tosati, 2023) .... | 22 |
| Figura 15. Response Surface Optimization .....   | 23 |
| Figura 16. Direct Optimization.....  | 23 |
| Figura 17. Conicidad decreciente en la herramienta .....                                 | 29 |
| Figura 18. Lima inicial .....  | 29 |
| Figura 19. Perfil inicial .....  | 30 |
| Figura 20. Propiedades de la aleación de Ni-Ti.....                                      | 31 |
| Figura 21. Mallado del perfil inicial .....  | 33 |
| Figura 22. Localización de la fuerza equivalente .....                                   | 33 |
| Figura 23. Perfil de tensiones según el criterio de von Mises en el perfil inicial ..... | 34 |
| Figura 24. Inputs y Outputs .....  | 35 |
| Figura 25. Tensiones en el perfil optimizado .....                                       | 39 |
| Figura 26. Comparación entre el perfil inicial y optimizado.....                         | 40 |
| Figura 27. Perfiles para la construcción del modelo .....                                | 41 |
| Figura 28. Modelado en Solid Works de las limas comerciales.....                         | 42 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 29. Modelos lima optimizada.....   | 43 |
| Figura 30. Modelos limas comerciales.....   | 43 |
| Figura 31. Mallados modelos optimizados.....  | 44 |
| Figura 32. Mallado limas comerciales.....   | 45 |
| Figura 33. Condiciones de contorno ensayo de flexión.....   | 46 |
| Figura 34. Resultados flexión.....  | 48 |
| Figura 35. Condiciones de contorno en el mango.....   | 49 |
| Figura 36. Restricción en la punta.....   | 50 |
| Figura 37. Resultados ensayo de torsión.....  | 52 |
| Figura 38. Sujeción de la herramienta para ensayo de torsión y flexión.....   | 54 |
| Figura 39. Zona de aplicación de giro y desplazamientos en el ensayo de torsión y flexión en limas optimizadas..... | 54 |
| Figura 40. Zona de aplicación de giro y desplazamientos en el ensayo de torsión y flexión en limas comerciales..... | 55 |
| Figura 41. Resultados ensayo combinado de torsión y flexión.....  | 59 |

# Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Cotas perfil S itálica .....                          | 30 |
| Tabla 2. Resultados del perfil inicial .....                   | 34 |
| Tabla 3. Puntos candidatos .....                               | 38 |
| Tabla 4. Resultado de la optimización en dos dimensiones ..... | 38 |
| Tabla 5. Comparación de resultados .....                       | 39 |
| Tabla 6. Resultados flexión .....                              | 47 |
| Tabla 7. Resultados ensayo de torsión.....                     | 52 |
| Tabla 8. Resultados de ensayo torsión y flexión .....          | 55 |
| Tabla 9. Resultados factibles obtenidos del DOE .....          | 74 |

## Índice de gráficos

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 1. Progresión lineal ante la flexión.....           | 48 |
| Gráfico 2. Ensayo de torsión .....                          | 51 |
| Gráfico 3. Resultados del ensayo de torsión y flexión ..... | 56 |

## Índice de ecuaciones

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1: Definición función objetivo.....                | 19 |
| Ecuación 2: Definición variables optimización.....          | 19 |
| Ecuación 3: Definición restricción optimización .....       | 20 |
| Ecuación 4: Ecuación del par .....                          | 32 |
| Ecuación 5: Función objetivo optimización paramétrica ..... | 34 |
| Ecuación 6: Restricción optimización paramétrica .....      | 34 |

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

La aparición de infecciones bacterianas es una de las complicaciones más habituales que se presentan en las clínicas odontológicas, haciendo las visitas al dentista una cita rutinaria que se debe realizar periódicamente en la vida de cualquier persona.

Cuando estas infecciones no son tratadas a tiempo, pueden afectar gravemente a la salud del paciente. De no ser tratadas correctamente, la infección se puede extender a la pulpa dental y causar dolor intenso e inflamación en la zona afectada. En estos casos, el tratamiento recomendado, y más común en la práctica, es la endodoncia, siendo la única manera de salvar y la pieza dental, evitando una posible extirpación.

Sin embargo, durante esta técnica surgen ciertas complicaciones relacionadas con las herramientas de corte y vaciado usadas para los tratamientos endodónticos, ya que en numerosas ocasiones estas pueden atascarse en el conducto, reduciendo su eficiencia de corte, e incluso fracturarse. Esto provoca que queden restos de la lima atrapados en el conducto de la raíz, que, de no ser tratado correctamente, puede ocasionar infecciones, dolor postoperatorio en el paciente, e incluso la fractura del diente.

Este proyecto se centrará en la optimización de carácter paramétrico de la instrumentación de vaciado utilizada en la técnica endodóntica, denominadas limas endodónticas, que serán el principal objeto de estudio y a las que se dedicarán un capítulo en específico para su definición y comprensión para el lector.

Es importante mencionar que la endodoncia es un procedimiento seguro y efectivo, siendo una alternativa que permite al paciente preservar sus propios dientes y evitar el requerimiento de implantes o prótesis dentales. Es por ello por lo que queremos minimizar los posibles fallos que se dan en ésta para obtener instrumental más fiable y seguro para el paciente.

## **1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

A pesar de ser un procedimiento cuyas complicaciones no tienen repercusiones que pongan en riesgo la vida del paciente, queremos investigar una posible mejora de la técnica de manera que se minimice el riesgo para el paciente. Se trata de una intervención que se efectúa de manera diaria en miles de clínicas en España y en el mundo, y es nuestro impulso principal que la innovación tecnológica esté al alcance de todos.

Un punto clave en esta investigación es ofrecer el mejor servicio y hacer uso de última tecnología para conseguir una herramienta optimizada y que pueda ser fabricada para su futuro uso en las clínicas odontológicas. Esto nos impulsa a querer hacer un diseño que sea factible de cara a su fabricación y que realmente contribuya a un progreso en la odontología y, en definitiva, en las investigaciones del ámbito de la biomecánica.

## **1.2 OBJETIVO**

Este proyecto tendrá como objetivo principal la optimización del dimensionamiento de la lima en términos del perfil de ésta y la optimización de su funcionalidad mediante el número de vueltas de la lima.

En primer lugar, estudiaremos cómo se comporta la geometría ante las condiciones límite en las que se puede producir la rotura de la lima; habrá que garantizar el aguante a la torsión, ya que se trata de uno de los principales motivos del fallo de éstas. Este estudio también implica prestar atención a la resistencia a la flexión en segundo plano, ya que no debemos perder de vista ese factor que influye en la fractura de las limas (M. McGuigan et al., 2013). Se buscará el equilibrio entre las dimensiones de la lima con la resistencia a la torsión y flexión según el criterio de von Mises para las tensiones.

En segunda instancia, no sólo queremos obtener un diseño que sea resistente ante las condiciones más desfavorables, sino que además realice su tarea de la manera más efectiva posible.



## **Capítulo 2. CONTEXTO TEÓRICO**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Para comprender completamente el contexto teórico de este trabajo de investigación, es crucial tener en cuenta la técnica de la endodoncia y su procedimiento habitual, que nos ayudaran a poder formular correctamente el problema y dar resultados fructuosos para la técnica.

Paralelamente hay que poseer una serie de conocimientos básicos del método del que se va a hacer uso para la resolución de la problemática, y por ello se realizará una breve introducción al método de optimización en materia.

Tener estos conceptos interiorizados nos ayudaran más adelante a programar y simular correctamente la herramienta en cuestión, de manera que los resultados que se obtengan de la optimización sean concluyentes y reflejen la realidad de la técnica.

### **2.2 ENDODONCIA**

#### **2.2.1 INTRODUCCIÓN**

La endodoncia es un proceso odontológico que se realiza cuando la pulpa dental (el tejido blando que se encuentra en el interior del diente) se ve infectada o inflamada, ocasionando habitualmente dolor agudo y sensibilidad dental.

Cuando la pulpa dental queda infectada, generalmente es debido a una caries profunda, una caries dental, una lesión dental, una restauración dental defectuosa o una enfermedad periodontal. Si la infección no se trata, puede propagarse a los tejidos circundantes y causar abscesos dentales, dolor intenso e incluso la pérdida del diente.

La endodoncia implica la eliminación de la pulpa dental infectada, limpiar los conductos radiculares y sellarlos con un material especializado. El objetivo del tratamiento es eliminar la infección, aliviar el dolor y prevenir la pérdida del diente (Sahli & Agudé, 2019).

### **2.2.2 PROCEDIMIENTO**

El procedimiento de la endodoncia generalmente se realiza en varias etapas y puede requerir visitas al dentista. Durante la primera visita, se realiza una evaluación detallada del diente y se realizan radiografías de la zona para evaluar exhaustivamente la extensión de la infección.

Tras el estudio del caso en específico a tratar, se procede a preparar al paciente para la apertura de la pieza dental, administrando anestesia local al paciente para adormecer la zona a tratar en la mayoría de los casos (Romero, 2018). Luego, se realiza la apertura con la ayuda de una fresa diamantada en la parte superior del diente para acceder a la pulpa dental.

Una vez saneada la pieza donde se realizará el tratamiento, se procede a el aislamiento de la zona con unos diques de goma colocando el clamp correspondiente. Posteriormente se extrae el techo cameral de la pieza dental mediante una fresa redonda, dejando preparados los conductos para realizar la limpieza y desinfección cómodamente.

La siguiente fase del tratamiento consiste en la permeabilización del conducto, de manera que las paredes de la cavidad deben reconfigurarse para que el endodoncista sea capaz de operar en la futura desinfección de los conductos. Durante esta etapa de irrigación, se elimina de manera mecánica la pulpa dentaria ubicada en los conductos radiculares, proporcionando una desinfección total de la zona con ayuda de diferentes herramientas de vaciado como son las limas endodónticas y los ensanchadores.

Seguidamente se continúa con una obturación provisional de los conductos, de manera que queden correctamente rellenos y sellados con el fin de mantenerlos aislados del exterior. Para realizar el relleno, el endodoncista seca los conductos, controla la longitud

de estos con la ayuda de radiográficas o de aparatos endodónticos y coloca el cemento sellador sobre un pequeño bolo de algodón.

Por último, después de algunos días de haber realizado la obturación provisional, es momento de realizar la obturación definitiva. Para ello, se retira el aislamiento, se graba con ácido ortofosfórico y se coloca el adhesivo dentario junto con la resina dental. Durante este tratamiento, el dentista puede considerar necesario el uso de antibióticos antes o después de la endodoncia. Asimismo, es necesario realizar un seguimiento de la evolución de la pieza dental con el fin de evitar cualquier tipo de inflamación o infección que ponga en riesgo los resultados (Romero, 2018).

### **2.2.3 INSTRUMENTACIÓN**

Para llevar a cabo este procedimiento de manera efectiva, se requiere de una instrumentación adecuada y especializada. Los instrumentos utilizados en la endodoncia tienen una forma y diseño específico que les permite acceder a las partes más internas del diente, donde se encuentra la pulpa dental.

Dentro de la instrumentación utilizada en la preparación de la cavidad de acceso coronal se suelen utilizar, como hemos mencionado con anterioridad, fresas de distintas geometrías para conseguir la perforación, delimitación de contornos, rectificación y aislado de la cámara.

En el proceso de preparación de los conductos radiculares, entre los más utilizados en la técnica se encuentran las escofinas, los tiranervios, los ensanchadores y las limas endodónticas. En conjunto, estos instrumentos y herramientas especializadas permiten al profesional de la odontología llevar a cabo el tratamiento de endodoncia con mayor precisión y eficacia (Sahli & Aguadé, 2019).

Este trabajo se focalizará principalmente en la optimización de una lima endodóntica y por ello se dedicarán los próximos apartados únicamente a la definición de esta herramienta.

### 2.2.3.1 Limas: definición

Las limas endodónticas son instrumentos utilizados en odontología para tratar la pulpa dental en el procedimiento de endodoncia. Estas limas son pequeñas herramientas que se utilizan para remover el tejido pulpar dañado o infectado que se encuentra dentro de los conductos radiculares del diente. Las limas endodónticas tienen una forma cónica y están diseñadas para ser flexibles y resistentes al mismo tiempo. Además, vienen en diferentes tamaños y diámetros para adaptarse a la forma y tamaño específicos de los conductos radiculares de cada diente.

Figura 7. Esquema de partes de una lima manual (Cruz, 2019)



La geometría de estas limas varía según el tipo del que se trate, pero de forma genérica se diferencian los siguientes elementos:

- Punta o guía de penetración: se trata de la parte más delgada y puntiaguda de la lima que se inserta primeramente en el conducto radicular. Se diseña de manera que sea lo suficientemente pequeña como para no causar daño en las paredes de conducto y suficientemente fuerte como para resistir con destreza la torsión y el desgaste durante la limpieza (Soares & Goldberg, 2003). Es importante tener en cuenta que la punta puede estar activa o inactiva, de manera que esta activa cuando está afilada y prácticamente sin usar e inactiva cuando la punta queda roma. Dependiendo del caso, se usará una u otra, ya que la punta inactiva es más segura dado que con ella es más intrincado perforar el conducto por la pasividad de su fuerza en el corte, mientras que la punta activa tiene un mayor filo de corte en la cúspide (Cruz, 2019).

- Zona de corte o parte activa: esta parte de la lima se dedica principalmente al trabajo de limpieza y remoción del tejido pulpar dañado o infectado. La zona de corte helicoidal es la parte que permite a la lima remover el tejido pulpar mientras se gira en el conducto radicular, ya sea de forma manual o de forma mecánica.
- Vástago o cuerpo: es la parte más larga de la lima que conecta la punta y la zona de corte o helicoidal con el mango. El cuerpo de la lima está diseñado para ser flexible y resistente al mismo tiempo, permitiendo al profesional doblar y girar la lima para limpiar el conducto radicular con facilidad sin fracturarla o dañar las paredes del conducto.
- Mango: es la parte más gruesa y ancha de la lima, diseñada para que el endodoncista pueda agarrar firmemente la herramienta, manteniendo el control durante todo el tratamiento. El mango de la lima también puede tener diferentes diseños y texturas para mejorar el agarre y el control, como ranuras o surcos que aparecen en la imagen.

Las limas endodónticas se utilizan de manera cuidadosa y precisa para evitar dañar las paredes del conducto radicular o causar molestias al paciente. Consecuentemente, la elección correcta del tipo de lima y su correcto uso son cruciales para el éxito del tratamiento de endodoncia. De la misma forma, es importante a la hora de realizar el tratamiento tener conocimiento de los usos dados a las limas para prevenir la fractura de la herramienta, que es uno de los incidentes más comunes en la técnica (Alrahabi et al., 2019).

### **2.2.3.2 Limas: tipos**

En el amplio mundo de las limas usadas en la endodoncia existen dos grandes familias: las limas manuales y las limas mecánicas. Cada una de éstas son escogidas por el profesional según diferentes aspectos: la experiencia del endodoncista, el acceso que tenga el profesional al conducto, la curvatura del conducto, etc. El profesional durante la intervención hace uso de múltiples herramientas y es esencial que ordene y conozca en profundidad qué herramienta aplicar en cada fase del proceso (Canalda Sahli, 2014). Es por ello por lo que explicaremos a continuación estas dos familias y su uso más habitual en la técnica.

### **2.2.3.2.1 Limas manuales**

Las limas manuales son un tipo de instrumento de endodoncia que se utilizan para preparar y limpiar los conductos radiculares de un diente durante un tratamiento de endodoncia. Éstas poseen un mango que se sostiene con la mano del odontólogo y una parte activa con una zona de corte que se introduce en el conducto radicular para limpiar y dar forma al canal.

Las limas manuales son especialmente útiles en conductos radiculares curvos o en casos donde se necesitan técnicas de preparación más cuidadosas y controladas, ya que permiten al odontólogo sentir la resistencia de los tejidos y las paredes del conducto radicular mientras trabajan con ellas. También son útiles en conductos radiculares con obstrucciones como postes interradiculares, cementos o materiales de obturación (Lozano, 2009).

Sin embargo, las limas manuales requieren habilidad y experiencia para ser utilizadas correctamente, ya que pueden producir desviaciones y fracturas en los conductos radiculares si se utilizan de forma inadecuada. Por esta razón, muchas veces se combinan con limas rotatorias y otros instrumentos de endodoncia para lograr una limpieza y preparación más eficaz y segura del conducto radicular.

### **2.2.3.3 Limas rotativas**

Las limas rotatorias son un tipo de instrumento de endodoncia que se utilizan para preparar y limpiar los conductos radiculares de un diente durante un tratamiento de endodoncia. A diferencia de las limas manuales, que se accionan mediante la fuerza de la mano del odontólogo, las limas rotatorias se accionan mediante una pieza de mano eléctrica o neumática que hace girar la lima a alta velocidad.

Las limas rotatorias suelen estar hechas de níquel-titanio, aleaciones de níquel-titanio o acero inoxidable y tienen una forma cónica que les permite limpiar y dar forma al conducto radicular. Algunas limas rotatorias tienen una punta no cortante para evitar dañar la dentina del diente, mientras que otras tienen una punta de corte para eliminar los tejidos y los residuos dentro del conducto radicular.

Las limas rotatorias son útiles en conductos radiculares rectos y amplios, ya que pueden limpiar y dar forma al canal rápidamente y con menos fatiga para el odontólogo que las limas manuales. También son útiles para la eliminación de materiales de obturación y para la preparación de conductos radiculares con formas complejas.

Además, estas propias limas pueden presentar distintos tipos de giro: continuo o recíprocante.

En el movimiento rotatorio continuo, la lima gira en una sola dirección a una velocidad constante y se utiliza para eliminar los tejidos blandos y duros dentro del conducto radicular. Este tipo de movimiento es muy eficiente en conductos radiculares amplios y rectos.

En el movimiento recíprocante, la lima gira en una dirección y luego se invierte la dirección de rotación de manera repetida, creando un movimiento de vaivén. Este tipo de movimiento es especialmente útil en conductos radiculares curvos y estrechos, ya que permite una mayor flexibilidad y menos riesgo de fractura (Kiefner et al., 2014).

Ambos tipos de movimientos tienen ventajas y desventajas, y la elección del tipo de movimiento dependerá de las características del diente y del conducto radicular, así como de las habilidades y preferencias del odontólogo. Es importante que el odontólogo tenga experiencia y formación adecuada en el uso de ambos tipos de movimientos para lograr una limpieza y preparación efectiva y segura del conducto radicular.

Sin embargo, las limas rotatorias tienen algunas limitaciones, ya que pueden producir fracturas en los conductos radiculares si se utilizan de forma inadecuada o si se encuentran con resistencias inesperadas en el canal. Por esta razón, es importante que el odontólogo tenga experiencia y habilidad en el uso de las limas rotatorias y que se utilicen junto con otras herramientas y técnicas de endodoncia para lograr una limpieza y preparación efectiva y segura del conducto radicular.

## 2.2.4 LIMAS DE REFERENCIA

Dado al carácter innovador e investigador de este trabajo, la herramienta optimizada deberá ser comparada y verificada con diferentes modelos en el mercado y con la normativa correspondiente. Las herramientas con las que se efectuarán las comparaciones serán las mencionadas a continuación.

- Lima Protaper Ultimate Sequence Shaper
  - Condiciones de trabajo nominales:
    - Velocidad: Constante 400 rpm
    - Par: Variable 4-5.2 Ncm
- Lima Protaper Ultimate Sequence Slider
  - Condiciones de trabajo nominales:
    - Velocidad: Constante 400 rpm
    - Par: Variable 4-5.2 Ncm
- Lima Hyflex EDM
  - Condiciones de trabajo nominales:
    - Velocidad: Constante 400 rpm
    - Par: Variable 0-2.5 Ncm
- Lima Protaper Gold SX-19
  - Condiciones de trabajo recomendadas:
    - Velocidad: 300 rpm
    - Par: 5.1 Ncm



Figura 8. Lima Protaper Ultimate Sequence Shaper

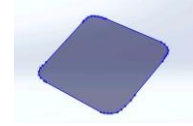


Figura 9. Lima Protaper Ultimate Sequence Slider

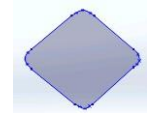


Figura 10. Lima Hyflex EDM

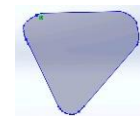
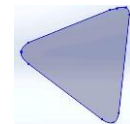


Figura 11. Lima Protaper Gold SX



## 2.3 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN

### 2.3.1 INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA

Los métodos de optimización surgen de la complejidad existente en las matemáticas para describir cómo funcionan diversos sistemas, procesos y maquinaria que no se pueden precisar con meras aproximaciones. En la realidad, todo sistema que encontramos presenta un funcionamiento que viene influenciado por una alta cantidad de parámetros y variables que además varían de manera aleatoria, y definir su comportamiento supone un alto nivel de complejidad. Con la llegada de los métodos de optimización, se hizo posible el estudio de estos sistemas y la predicción de los posibles valores que podían tomar los parámetros que definen. Este estudio, en definitiva, tiene como fin mejorar estos procedimientos y de esta manera alterar los parámetros de éstos para llevarlos a su óptimo de funcionamiento.

El objetivo de la optimización no recae en profundizar sobre el funcionamiento de los procesos, si no en averiguar la mejor manera de modificar los parámetros involucrados para acercarse el máximo a una serie de objetivos. Por esta razón, los métodos de optimización se encuentran en múltiples ramas de la ingeniería, como en diseño de procesos, fiabilidad o experimentación industrial (Carson & Maria, 1997). En definitiva, se busca a toda costa la mayor eficiencia de los procesos y conseguirlo de la manera más económica posible. Por ende, es esencial en la formación del ingeniero el tener conocimiento de las interacciones entre los parámetros de cualquier proceso para garantizar su diseño óptimo (Adby, 2013a).

### **2.3.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA MATEMÁTICO**

El problema matemático elemental de optimización consiste en la minimización de un escalar que es el valor que toma una función de  $n$  parámetros del sistema, que se verán ajustados de cara a obtener el mínimo requerido.

$$\text{minimizar } C = f(x_1, x_2, \dots; x_n) \quad (1)$$

Se denomina función objetivo a aquella función cuyo valor es el que se desea optimizar. Esta función objetivo es la más fácil de manejar y gran parte de los problemas pueden ser expresados de esta manera. Esta función tomará una serie de valores para cada uno de sus parámetros en cada iteración del proceso de optimización hasta conseguir el valor óptimo (Adby, 2013a).

$$x^T = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \quad (2)$$

En gran parte de los problemas de optimización de la vida real, se tendrán en cuenta unas restricciones sobre los parámetros que definen el sistema, acotando de esta manera la región de búsqueda de la función objetivo.

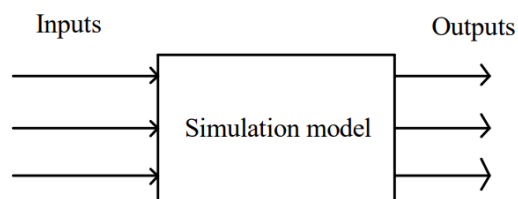
$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (3)$$

Estas restricciones se expresan en forma de inecuaciones habitualmente, que dejarán una subregión de la función objetivo, denominada región factible en la que dichas ecuaciones se satisfacen en nuestro sistema.

### 2.3.3 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN POR SIMULACIONES

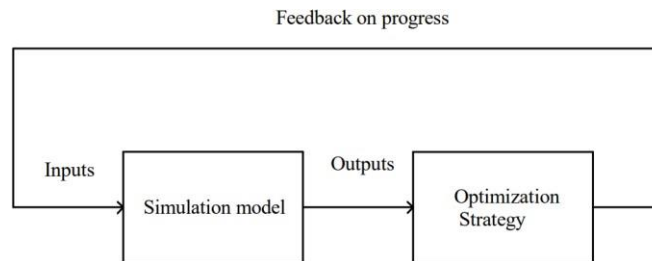
Sin embargo, el método de optimización con restricciones supone una complejidad mayor para su resolución, y por ello se desarrollaron sistemas de optimización mediante simulación computacional. El esquema que sigue el modelo consta de  $n$  variables de entrada que el sistema tratará de determinar para optimizar las  $m$  variables de salida.

**Figura 12. Modelo de simulación (Adby, 2013a)**



Definido este modelo de optimización se realiza el proceso de simulación, el cual trabaja de forma iterativa, de manera que los resultados obtenidos en la primera simulación sirven como feedback para la siguiente vuelta, y así sucesivamente hasta minimizar el error y obtener el resultado óptimo.

Figura 13. Simulación del modelo de optimización (Adby, 2013b)



Esta área de las matemáticas ha atraído a gran cantidad de investigadores en los últimos 75 años, y con el avance tecnológico de las últimas generaciones se han conseguido agilizar estos sistemas de manera exponencial. Con los años, se pueden clasificar los métodos de optimización por simulaciones en 6 grandes ramas: métodos basados en gradientes, optimización estocástica, el método de la respuesta por superficie, los métodos heurísticos, los métodos estadísticos y los denominados “A Teams”.

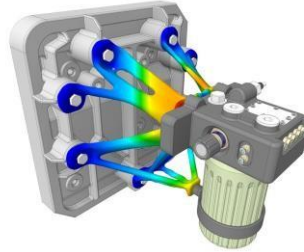
### 2.3.4 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE ANSYS

El software que se utilizará en este estudio para la realización del modelo y sus ensayos computacionales será ANSYS, software especializado de ingeniería para realizar análisis de sistemas físicos de diversas ramas, entre la que encontramos la mecánica estructural.

Entre las opciones de optimización que ofrece este software podemos distinguir dos métodos muy reconocidos en el sector:

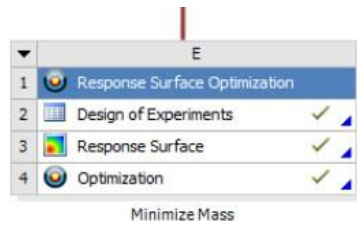
- Optimización topológica: produce diseños optimizados mediante el análisis de elementos finitos, con el que proporciona modelos haciendo uso del menor material posible haciéndolos más económicos. Su propiedad principal es el manejo de prototipos iniciales, en los que se introducen las condiciones de trabajo a las que se somete en ANSYS Structural, y tras el mallado para el análisis de elementos finitos, extrae el material sobrante del diseño, haciendo su fabricación más económica, eficiente y proporcionando unas prestaciones óptimas (Tosati, 2023).

**Figura 14. Resultado de pieza optimizada por optimización topológica (Tosati,**

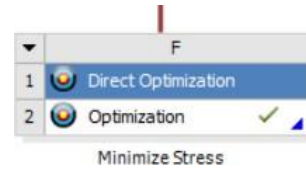


- Optimización paramétrica: Esta metodología aplicada al campo de mecánica estructural parte de la herramienta ANSYS Design Xplorer. Esta herramienta ofrece dos metodologías que se diferencian por la veracidad de los resultados:
  - Response Surface Optimization: está basada en un Design of Experiments (DOE) y la respuesta que se obtiene en la superficie, en el que el mayor tiempo de simulación empleado va dirigido al DOE. Precisamente DOE se encarga de tomar los parámetros seleccionados, que serán los inputs y con un rango de valores preseleccionado, simula combinaciones entre los puntos y obtiene unos valores de los outputs seleccionados. Con los resultados derivados del DOE existe la posibilidad de optimización definiendo la función objetivo y las restricciones correspondientes, planteándose un problema de optimización clásico, que devuelve unos candidatos a solución con sus respectivas características. Esta alternativa es buena para tener una solución aproximada del resultado final, y para las primeras simulaciones será la escogida para ver dónde encontrar la solución, pero se recomienda verificarla con un solucionador real (Tosati, 2019).
  - Direct Optimization: este método está basado en la solución real de la optimización, y partiendo de una función objetivo y unas restricciones determinadas, se obtiene una solución real óptima, apoyada en un solucionador más preciso. En este estudio se verificarán los resultados mediante este método.

**Figura 15. Response Surface Optimization**



**Figura 16. Direct Optimization**



## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

### **3.1 FALLOS EN LA INSTRUMENTACIÓN**

Durante la intervención del endodoncista, pueden surgir imprevistos de diversos tipos, pudiendo ser tanto preoperatorios, como el mal diagnóstico de la patología del paciente, como fallos que intraoperatorios, como perforaciones indebidas, deformaciones en los conductos o la fractura del instrumento, siendo este último uno de los más habituales en la técnica (Menis de Mutal & Lía Arena, 2013).

La fractura de la herramienta suele verse influenciada por diferentes factores, así como el tipo el material del que se compone, la resistencia a la fatiga de la propia herramienta, la destreza del endodoncista, el número de usos que se le da a la herramienta, la configuración del conducto a tratar, etc (M. McGuigan et al., 2013).

#### **3.1.1 CAUSAS DE FALLOS**

##### **3.1.1.1 Propiedades del material**

Para la fabricación de las herramientas de irrigación se tienen en cuenta dos tipos de aleaciones principalmente, las aleaciones de Níquel-Titanio (NiTi) y los aceros inoxidable (SS), que poseen propiedades mecánicas muy diferentes, y consecuentemente su comportamiento a la fractura a su misma vez. En el caso de este estudio, se ha investigado principalmente el comportamiento de fractura de las aleaciones de Níquel-Titanio, dado que la herramienta en cuestión está compuesta por dicho material.

Las aleaciones de NiTi destacan en el campo de la biomecánica por ser seguros y compatibles en contacto con el cuerpo humano, su resistencia a la corrosión y efecto de memoria de forma. Esto lo hace materiales muy elásticos y que aguantan la flexión con esfuerzos constantes e incluso crecientes, siendo conocidos por esta característica superelasticidad (Ninan & Berzins, 2013).

Sin embargo, el mecanismo de fractura de las aleaciones de NiTi se debe a una peor resistencia a la fatiga cíclica y torsional, lo que ocasiona que rompan de manera repentina, sin presencia de grietas o defectos que se perciban por el observador fácilmente.

Hay estudios que, analizando la resistencia a la fractura de diferentes limas de NiTi, han divisado diferencias significativas en la tendencia a la fractura por flexión y torsión según la geometría de estas limas, concretamente según su perfil (Madarati et al., 2008). Consecuentemente, este trabajo sigue por esta línea de estudio en que se analiza cada una de estas herramientas, y busca su optimización de manera que sea capaz de mejorar su resistencia a la torsión, sabiendo que es la causa de fallo más peligrosa para este material.

### **3.1.1.2 Destreza del endodoncista**

Durante la intervención de la endodoncia, un factor clave en el éxito o fracaso de la técnica viene dado por la destreza y la experiencia del operador. Diferentes estudios han respaldado esta fuerte influencia que poseen los endodoncistas en la tasa de fallo de estas herramientas, e informan del amplio rango de casuística que se puede dar en la técnica (M. B. McGuigan et al., 2013).

En un estudio realizado por Parasher y Gordon, se ensayaron diferentes herramientas, puestas en funcionamiento por 14 endodoncistas de 4 países diferentes, obteniéndose una tasa de fractura que variaba entre el 3 y el 39%. Esto demostró no sólo los diferentes resultados que se pueden obtener en la técnica según el operador, sino la diferencia de la técnica entre cada experto, el número de usos dado a cada lima antes de fracturarse, el tipo de lima utilizado, etc (Parashos et al., 2004).

Esto hace relevante que sea necesario un consenso real entre los expertos para mejorar esa tasa de fractura y que sea posible, desde una buena práctica de la técnica, minimizar la separación de estas herramientas. En este estudio las simulaciones que serán realizadas buscarán imitar el atasco de estas herramientas en el conducto, y de manera se tendrá en cuenta cuál sería la situación a la que se somete el endodoncista durante la intervención.



### **3.1.1.3 Configuración del conducto**

En la fase de irrigación de la endodoncia, el odontólogo se debe enfrentar a diferentes configuraciones del conducto radicular según la pieza dental en cuestión. Según Madarati (2008), existe una fuerte influencia entre la anatomía del conducto y la fractura de las herramientas, analizando las múltiples configuraciones que pueden tener las piezas dentales y el riesgo que supone tratar en ellas (Madarati et al., 2008). Dentro de la anatomía del conducto podemos diferenciar dos factores influyentes, el primero de ellos la presencia de más de un canal dentro del conducto, y en segundo lugar la propia curvatura que presenta el mismo.

En un reciente estudio se analizan las piezas dentales que son tratadas más regularmente en la endodoncia, que son los molares y los premolares, focalizándose principalmente en las configuraciones multirradiculares que puedan presentar, como ocurre con frecuencia en los premolares (Al Yahya et al., 2023). Ya afirmaba Nascimento en 2018 en su análisis de conductos radiculares y su relación con el fracaso en la endodoncia, que ciertamente la presencia inesperada de otros canales los conductos afectan enormemente la tasa de fractura de las limas (Nascimento et al., 2018). Por esta razón, es de vital importancia para el endodoncista tener conocimiento previo del conducto a tratar prestando atención a su geometría, para poder evitar la mala praxis de la técnica.

La variabilidad de la configuración de los conductos dificulta sensiblemente su tratamiento en la fase de irrigación, en la que también se ve afectada por la curvatura del canal. Así pues, existen estudios que afirman una relación directa entre la fractura del instrumento y el ángulo de curvatura de éste, cumpliéndose que, a mayor ángulo, mayor tasa de fallo en el tratamiento (Kosti et al., 2011). Los conductos con los ángulos más pronunciados ( $60\pm 10^\circ$ ) son los que amenazan con mayor gravedad a las herramientas, y por ello se tendrá en cuenta esta información en las futuras simulaciones de las herramientas, especialmente en los ensayos de flexión de las limas de estudio.

## **3.2 ESTUDIOS RELEVANTES**

En este campo se han realizado diversos estudios en los que se han analizado diferentes herramientas ante diferentes condiciones de ensayo para verificar la resistencia de estas herramientas. Por consiguiente, se recogerán aquellos análisis considerados más relevantes para el estudio, de manera que respalden este trabajo de investigación.

El estudio realizado por Chevalier en la Universidad Europea de Bretaña en marzo de 2010 propuso un nuevo modelo de análisis computacional de estas herramientas, en la que no sólo se modelaron los ensayos de flexión y torsión, si no que se propuso el análisis de la combinación de ambas, dado que se asemeja con mayor exactitud a la situación real que se da en la práctica. Al atascarse la punta de la lima en el conducto, ciertamente queda bloqueada, lo cual provoca que sufra esfuerzos de torsión, pero además la propia pared del conducto aplica una fuerza sobre la lima someténdola a flexión (Chevalier et al., 2010). En este estudio se aplicará este criterio de ensayo para las simulaciones futuras de la herramienta optimizada.

Por otro lado, se han estudiado y comparado la respuesta de diferentes limas de Níquel-Titanio con tamaños equivalentes, aunque propiedades mecánicas ante la flexión y la torsión. En este estudio, se presenta la respuesta a la torsión de las diferentes herramientas, obteniéndose un comportamiento no lineal en la mayoría de los casos, que fue relacionada con la transformación de la martensita de cada instrumento (Arbab-Chirani et al., 2011). Para este estudio será posible tener en cuenta esta no-linealidad, dado que el material introducido tratará de una aleación de Níquel Titanio, pero no será exactamente la dada por el fabricante.

Como última mención, en diversos estudios se ha evidenciado la mejora que supone el régimen de giro recíprocante respecto al perfil de tensiones. Según Pedullà y Grande (Pedullà et al., 2013) las herramientas que poseen un régimen de giro es recíprocante tienen mayor resistencia a la fatiga cíclica y a la torsión, debido a que en dicho movimiento, al revertir el sentido de giro, se produce una liberación de tensiones. Será importante en el

análisis de resultados tener en cuenta una reducción de las tensiones debido al régimen de giro de la herramienta, ya que no se introducirá en la simulación.

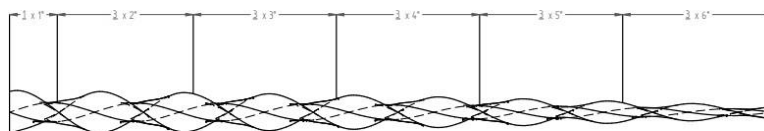
## Capítulo 4. OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA

### 4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO INICIAL

La herramienta de la que se parte en el estudio se trata de una lima de retratamiento, compuesta por una aleación de Ni-Ti, que funciona con giro recíprocante ( $170^\circ$  antihorario,  $50^\circ$  horario), a una velocidad nominal de 350 rpm con un valor de torque máximo de 3.5 Ncm. En cuanto a su geometría, posee las siguientes características:

- Sección: S itálica.
- Conicidad: Decreciente, siguiendo las siguientes pautas mostradas en la Figura 17.
  - 6% - 3 mm.
  - 5% - 3 mm.
  - 4% - 3 mm.
  - 3% - 3 mm.
  - 2% - 3 mm.
  - 1% - 1 mm.
- Longitud parte activa: 16 mm.
- Diámetro máximo: 0.86 mm.

**Figura 17. Conicidad decreciente en la herramienta**



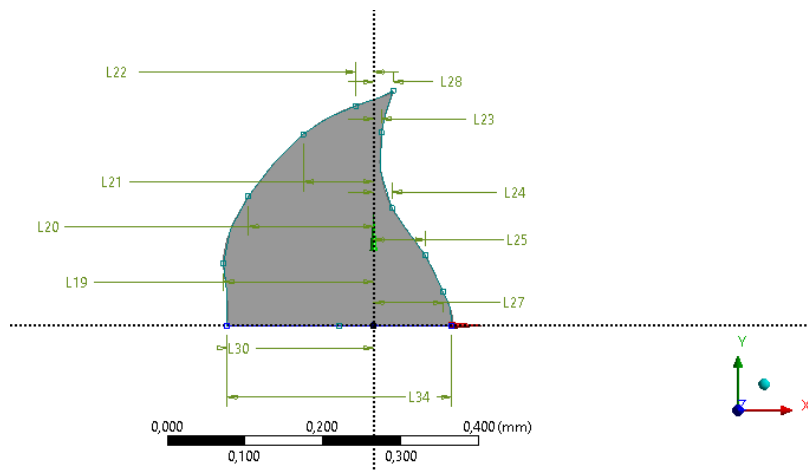
**Figura 18. Lima inicial**



#### 4.1.1 DIMENSIONES

Para la realización del perfil en S itálica, hemos tomado la condición de simetría para fuerzas y pares, por tanto, el perfil mostrado en la Figura 19 será una mitad simétrica respecto del eje x y antisimétrica en el primer y tercer cuadrante.

**Figura 19. Perfil inicial**



Los puntos que aparecen sobre la superficie del perfil son los puntos con los que se han definido el spline que determina la curvatura del perfil. Los valores de las cotas horizontales de dichos puntos vienen indicados en la Tabla 1:

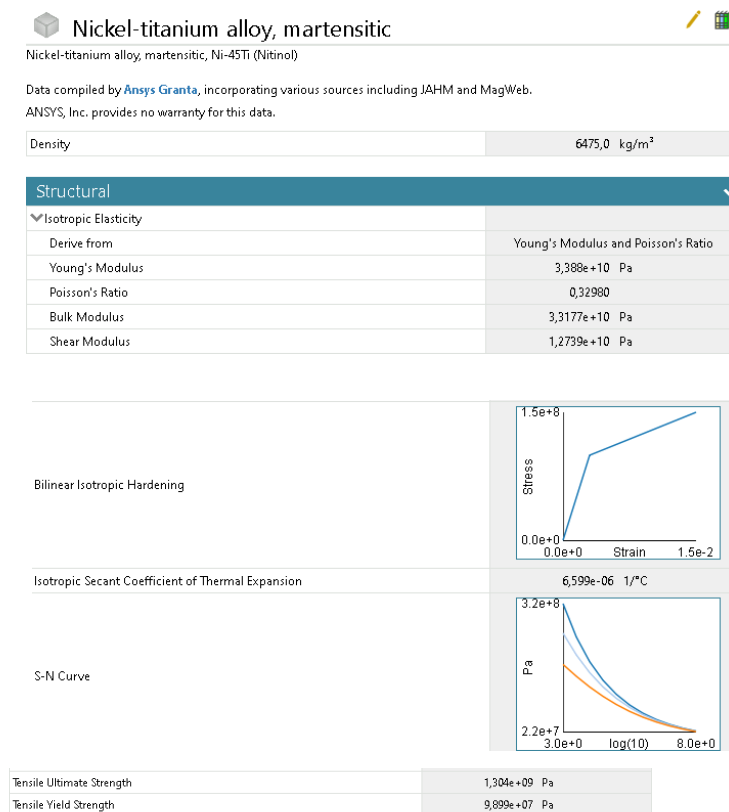
**Tabla 1. Cotas perfil S itálica**

| Cota       | L19     | L20    | L21  | L22     | L23  | L24      | L25      | L27      | L28   | L30   |
|------------|---------|--------|------|---------|------|----------|----------|----------|-------|-------|
| Valor (mm) | 0,19515 | 0,1604 | 0,09 | 0,02252 | 0,01 | 0,023574 | 0,066519 | 0,089353 | 0,025 | 0,188 |

## 4.2 MATERIAL

El material del que se compondrá la herramienta será una aleación de Níquel Titanio, y Ansys cuenta gran variedad de estas aleaciones de este material. Para los resultados de la optimización, en los ensayos en dos y tres dimensiones, se utilizará este material cuyas características vienen definidas por el programa como se muestra en la Figura 20.

**Figura 20. Propiedades de la aleación de Ni-Ti**



Excepcionalmente, como se apreciará en el próximo apartado, únicamente se hará uso de otro material, que será en el caso de la optimización paramétrica en dos dimensiones, para lanzar la simulación de Design of Experiments. En ésta, el material seleccionado será el acero estructural, ya que dichos cálculos no afectan al resultado de la configuración óptima y se realiza en un tiempo sensiblemente menor.

## 4.3 OPTIMIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES

### 4.3.1 CONDICIONES DE ENSAYO

El par indicado por normativa del fabricante de esta herramienta es de 3,5 Ncm. Por ello, para simular dicho par se aplicará una fuerza en la punta de manera que provoque un torque de esa magnitud. Para calcular la magnitud de dicha fuerza, tomamos el perfil de menor diámetro (0.25 mm) dado que es la zona que suele verse más afectada por la fractura de la herramienta.

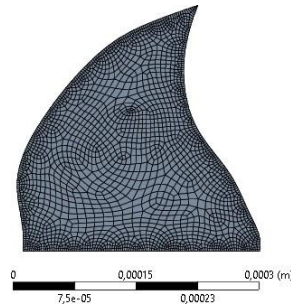
$$M = F * d (X) \quad (4)$$

Al ser las magnitudes del perfil en milímetros, este par de 3,5 Ncm es equivalente a un par de 35 Nmm. Midiendo la distancia entre el centro de simetría del perfil al punto de aplicación de la fuerza, la distancia medida es de 0.30742 mm. Por ello, la fuerza equivalente será:

$$F = \frac{35}{0.3074} = 113.45 \text{ N}$$

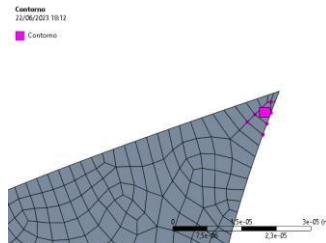
Una vez conocida la fuerza equivalente de aplicación para simular, se procede con el mallado del perfil, de manera que la calidad de la malla debe ser adecuado para que los resultados sean unas tensiones coherentes con la geometría. Dentro del propio Ansys Static Structural, en el modelado del ensayo, se programa el mallado automático de la pieza, de manera que se escoge una resolución de 5 (valor máximo 7), obteniéndose la malla obtenida en la Figura 21:

**Figura 21. Mallado del perfil inicial**



Para la aplicación de la fuerza, se seleccionan aquellos nodos localizados cerca de la punta, de manera que simule el par en la zona de corte donde se produce el arranque de viruta sin deformar excesivamente la punta. Conocidos estos nodos, aplicamos la fuerza  $F$  en dirección al eje  $X$  para simular el par torsor que sufre la lima como se indica en la Figura 22.

**Figura 22. Localización de la fuerza equivalente**

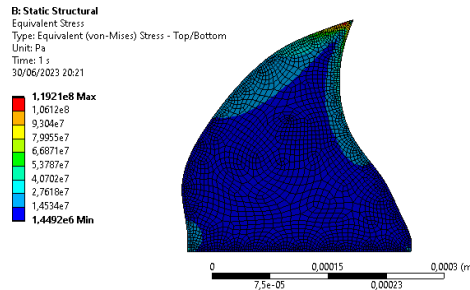


### **4.3.2 ENSAYO PERFIL INICIAL: RESULTADOS**

Tras ensayar el perfil de la herramienta de partida, los resultados que podemos observar en la Figura 23, que compararemos más adelante con el modelo optimizado serán en base a la tensión equivalente máxima según el criterio de von Mises.



**Figura 23. Perfil de tensiones según el criterio de von Mises en el perfil inicial**



## 4.4 OPTIMIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES

### 4.4.1 ANÁLISIS RESULTADOS ENSAYO INICIAL

En el ensayo de torsión previamente realizado sobre la lima inicial se obtienen los siguientes valores de tensión y deformación mostrados en la Tabla 2, a los que se incorpora como parámetro esencial en esta optimización el área de la sección.

**Tabla 2. Resultados del perfil inicial**

| Resultados            | Tensión Equivalente<br>máxima von Mises (MPa) | Área<br>(mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---|----------------------------|
| <b>Perfil inicial</b> | 119.21  | 0,056029                   |

### 4.4.2 OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA

Para modelar el problema de optimización se debe formular el problema, de manera que se indique tanto la función objetivo como las restricciones declaradas. La formulación del problema quedara definida mediante las ecuaciones X e Y.

$$\min \quad \sigma \quad (X) \tag{5}$$

$$A \leq A_i \quad (Y) \tag{6}$$

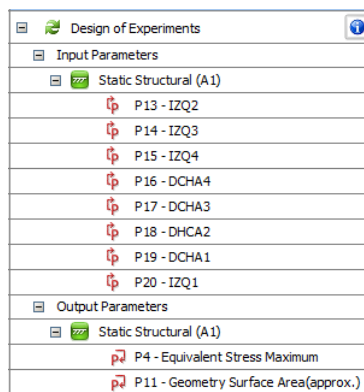
En estas ecuaciones, las variables principales del problema son  $\sigma$ , que indica la tensión equivalente máxima; A, que indica el área de la sección, y como parámetro tomaremos el área de la sección inicial como  $A_i$ .

#### 4.4.2.1 Simulación en ANSYS

La optimización que queremos conseguir es de carácter paramétrico, por tanto, para optimizar el perfil inicial debemos fijar una serie de parámetros en el programa, de manera que Design Of Experiments los reconozca y sea capaz variarlos con el objetivo de conseguir unos resultados con ellos.

Consecuentemente, se fijarán las cotas horizontales de los puntos del Spline que definen el boceto del perfil inicial. Se considerarán las cotas verticales invariantes, dado que se podría alterar el perfil de la S itálica al que se intenta asemejar, y es importante no perder las dimensiones naturales de la herramienta. Por otro lado, se fijarán como parámetros del sistema la tensión equivalente máxima obtenida en el ensayo inicial, y el área de la sección. Design of experiments realiza la diferenciación de las cotas como inputs, y la tensión máxima y el área como outputs por defecto como se puede apreciar en la Figura 24.

**Figura 24. Inputs y Outputs**



| Design of Experiments                |  |
|--------------------------------------|--|
| Input Parameters                     |  |
| Static Structural (A1)               |  |
| P13 - IZQ2                           |  |
| P14 - IZQ3                           |  |
| P15 - IZQ4                           |  |
| P16 - DCHA4                          |  |
| P17 - DCHA3                          |  |
| P18 - DHCA2                          |  |
| P19 - DCHA1                          |  |
| P20 - IZQ1                           |  |
| Output Parameters                    |  |
| Static Structural (A1)               |  |
| P4 - Equivalent Stress Maximum       |  |
| P11 - Geometry Surface Area(approx.) |  |

Dentro de cada uno de los inputs, vienen seleccionados unos rangos de valores fijados al  $\pm 10\%$  del valor del parámetro introducido, de manera que las simulaciones que se lancen crearán diferentes combinaciones entre los inputs manteniéndose fieles al rango introducido. Aun siendo posible variar este intervalo introduciendo manualmente los valores máximos y

mínimos que debiesen tomar estos inputs, en este estudio se mantendrá el intervalo predeterminado al  $\pm 10\%$ , ya que aumentando este valor se dificultan los cálculos en la simulación y se pierde la geometría que se desea optimizar.

#### **4.4.3 PERFIL OPTIMIZADO**

Una vez lanzada la simulación, el algoritmo de Design of Experiments crea múltiples puntos de diseño interpolando según los intervalos seleccionados, de manera que se obtienen múltiples resultados de los outputs, con cada uno de los puntos de diseños creados al variar los inputs.

Tras esta simulación, de los 8 inputs se obtienen cerca de 150 puntos de diseño, de los cuales sólo son factibles para nuestro sistema 14 puntos, mostrados en la Tabla 9. Una solución factible es aquella cuyos inputs, en este caso las cotas horizontales de los puntos del spline, son capaces de generar una geometría compatible. De todos los puntos de diseños generados, la gran mayoría generan geometrías con splines entrecruzados, en las que no es posible calcular las tensiones.

Cabe destacar los altos valores de las tensiones equivalentes obtenidas en la optimización, que son debidos a la selección del material al lanzar las simulaciones en el programa. Se escogió el material por defecto, como se mencionó anteriormente, que es el acero estructural, para garantizar una simplicidad en los cálculos y una mayor velocidad de la obtención de los resultados, sin afectar al resultado de la optimización.

En este punto de la optimización es clave aplicar las restricciones a nuestro problema, dado que aplicando únicamente la función objetivo no es suficiente para obtener el óptimo. Se debe tener en cuenta que, la tensión debida a un momento torsor es inversamente proporcional a la inercia de la geometría, que está directamente relacionada con las dimensiones del perfil, y por tanto con su área. De esta manera, lo lógico es conseguir una disminución de las tensiones a medida que se aumente el área, como ocurre en gran parte de los puntos factibles obtenidos. Aplicando las restricciones, nos restringen el problema a únicamente 3 puntos candidatos últimos, como se pueden observar en la Tabla 3.

En última instancia, como dicta la función objetivo, el óptimo lo encontraremos con el menor valor posible de tensión equivalente máxima garantizando que el área sea igual o menor a ésta, y dicho punto es el punto de diseño número 6, cuyas dimensiones se pueden apreciar en la Tabla 4.

**Tabla 3. Puntos candidatos**

| <u>Design Point</u> | <u>Izq 1 (mm)</u> | <u>Izq 2 (mm)</u> | <u>Izq 3 (mm)</u> | <u>Izq 4 (mm)</u> | <u>Dcha 4 (mm)</u> | <u>Dcha 3 (mm)</u> | <u>Dcha 2 (mm)</u> | <u>Dcha 1 (mm)</u> | <u>Tensión Equivalente Max von Mises (GPa)</u> | <u>Área (mm<sup>2</sup>)</u> |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------------|
| 1                   | 0.17564           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.8078   | 0.054471                     |
| 3                   | 0.19515           | 0.14458           | 0.09              | 0.02252           | 0.0225             | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.2522   | 0.055167                     |
| 6                   | 0.18292           | 0.16863           | 0.08552           | 0.02364           | 0.02475            | 0.0095             | 0.02361            | 0.069893           | 4.6657   | 0.055479                     |

**Tabla 4. Resultado de la optimización en dos dimensiones**

| <u>Design Point</u> | <u>Izq 1 (mm)</u> | <u>Izq 2 (mm)</u> | <u>Izq 3 (mm)</u> | <u>Izq 4 (mm)</u> | <u>Dcha 4 (mm)</u> | <u>Dcha 3 (mm)</u> | <u>Dcha 2 (mm)</u> | <u>Dcha 1 (mm)</u> | <u>Tensión Equivalente Max von Mises (GPa)</u> | <u>Área (mm<sup>2</sup>)</u> |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|------------------------------|
| 6                   | 0.18292           | 0.16863           | 0.08552           | 0.02364           | 0.02475            | 0.0095             | 0.02361            | 0.069893           | 4.6657   | 0.055479                     |

#### 4.4.4 CONCLUSIONES DE LA OPTIMIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES

##### 4.4.4.1 Comparación de resultados

Tras la optimización paramétrica del perfil de la herramienta, debemos comprobar que dicha geometría supone una mejora en el perfil de tensiones, sin sobrepasar el área de partida, construyendo el perfil optimizado y sometiéndolo a las mismas condiciones a las que se sometió el perfil inicial, con la aleación de Níquel Titanio correspondiente. Las tensiones resultantes de este ensayo aparecen en la Figura 25.

Figura 25. Tensiones en el perfil optimizado

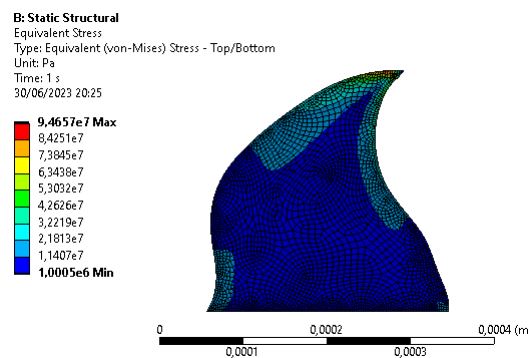


Tabla 5. Comparación de resultados

| Resultados     | Tensión Equivalente máxima von Mises (MPa) | Área (mm <sup>2</sup> ) |
|----------------|--|-------------------------|
| Perfil inicial | 119.21                                     | 0,056029                |
| Perfil final   | 94.657                                     | 0.55479                 |

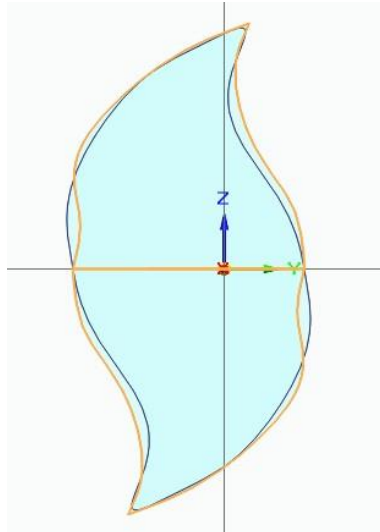
Al ensayar el perfil de la lima optimizada podemos comprobar con los resultados de la Tabla 5 que supone una disminución del 25,94% de las tensiones máximas en la zona crítica de la sección, sin tener que aumentar la sección para aportar más resistencia a la torsión. Esto se puede justificar prestando atención a los parámetros modificados con la

optimización, que crean una curvatura en el segundo cuadrante del perfil que mejora la resistencia a los esfuerzos torsores.

En primer lugar, la zona central cambia su sentido de curvatura ya que no requiere material en esa zona para enfrentarse a los esfuerzos, al ser una zona que sufre menos la torsión en la zona más cercana al centro del perfil. Esta disminución de material permite agregar material al subir en la curva, produciendo que se genere un punto de inflexión en la curvatura y acentuando la curvatura, siguiendo la forma de la S itálica respetando la geometría inicial.

Además, el cambio de curvatura permite ensanchar el perfil en el primer cuadrante sin aumentar la sección de partida, contribuyendo a la mejora de la resistencia del perfil. La comparativa de ambos perfiles se puede apreciar en la Figura 26.

**Figura 26. Comparación entre el perfil inicial y optimizado**



Nota: En azul se señala el perfil inicial, en amarillo el perfil optimizado.

## 4.5 OPTIMIZACIÓN EN TRES DIMENSIONES

### 4.5.1 METODOLOGÍA DE MODELADO EN TRES DIMENSIONES

#### 4.5.1.1 Modelado limas optimizadas

Al obtenerse el perfil optimizado, se construye en Solid Edge la herramienta en 3 dimensiones con las mismas condiciones y parámetros que la lima inicial como se puede observar en la siguiente figura. El paso inicial será el mismo que la lima de partida, que será 9.

La construcción de este modelo se consigue dividiendo la longitud que debe tener en la zona irrigada, que es 16 mm, entre el doble del paso, que en este caso quedarían 18 partes. Estas divisiones nos ayudarán a dividir el espacio en 18 planos paralelos en los que se proyectarán los perfiles optimizados, escalados según las características de la lima inicial de conicidad decreciente. Estos perfiles se deben orientar de forma vertical y a continuación horizontal como se indica en la Figura 27, de manera que se consiga construir el paso con la operación recubrir el material, dando las vueltas necesarias para conseguir el paso deseado.

**Figura 27. Perfiles para la construcción del modelo**



Los cálculos necesarios son realizados en Excel para mecanizar más fácilmente la tarea y poder aplicarlo al resto de pasos más adelante. Con Excel se calculan las distancias entre los planos, los diámetros en cada uno de ellos, y las escalas a las que hay que crear los perfiles para conseguir el paso decreciente definido en la lima de partida.

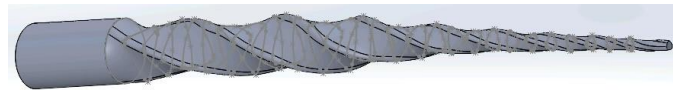


#### **4.5.1.2 Modelos de limas comerciales**

Para el modelado de las limas comerciales la metodología sufre ciertas variaciones. Al no poseer unas características predefinidas, se entregaron unos modelos en 3D de las 4 limas a ensayar, que se deberían de replicar para poder ser introducidas en Ansys.

Para esta tarea se utilizó SolidWorks, siguiendo un procedimiento similar al caso anterior, se realizaron entre 30 y 40 planos de corte, los necesarios para replicar cada geometría con la mayor precisión posible, y una vez obtenidos los perfiles, se superponen con la operación de recubrimiento de material, como queda ilustrado en la Figura 28.

**Figura 28. Modelado en Solid Works de las limas comerciales**



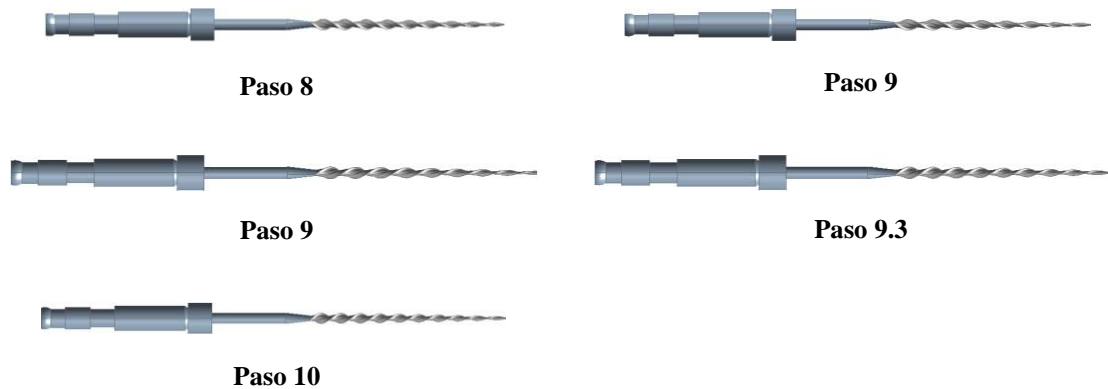
#### **4.5.2 MODELOS PARA LA OPTIMIZACIÓN**

Con vistas a la optimización del modelo en 3 dimensiones, el parámetro que se va a alterar respecto de la herramienta inicial será el número de vueltas, es decir, el paso. Por ello, partiendo de un paso inicial de 9 vueltas, se construirán 4 pasos adicionales: paso 8, paso 8.7, paso 9.3 y paso 10, como se pueden apreciar en las siguientes figuras. Estos modelos se obtienen de la misma forma que la lima inicial y la optimizada, y vienen ilustrados en la Figura 29 a continuación.

Para las limas comerciales, de la manera en la que se indica en el apartado anterior, se construyen los cuatro modelos distintos de las limas comerciales seleccionadas.

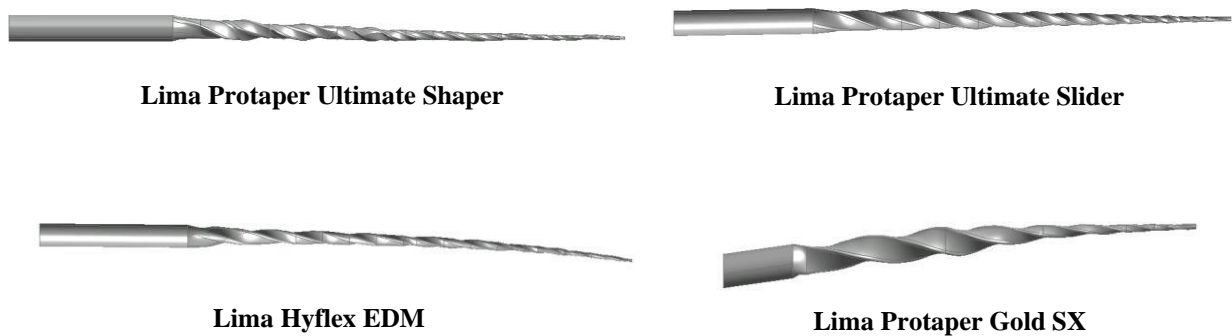
#### 4.5.2.1 Modelos optimizados

**Figura 29. Modelos lima optimizada**



#### 4.5.2.2 Modelos de limas comerciales

**Figura 30. Modelos limas comerciales**



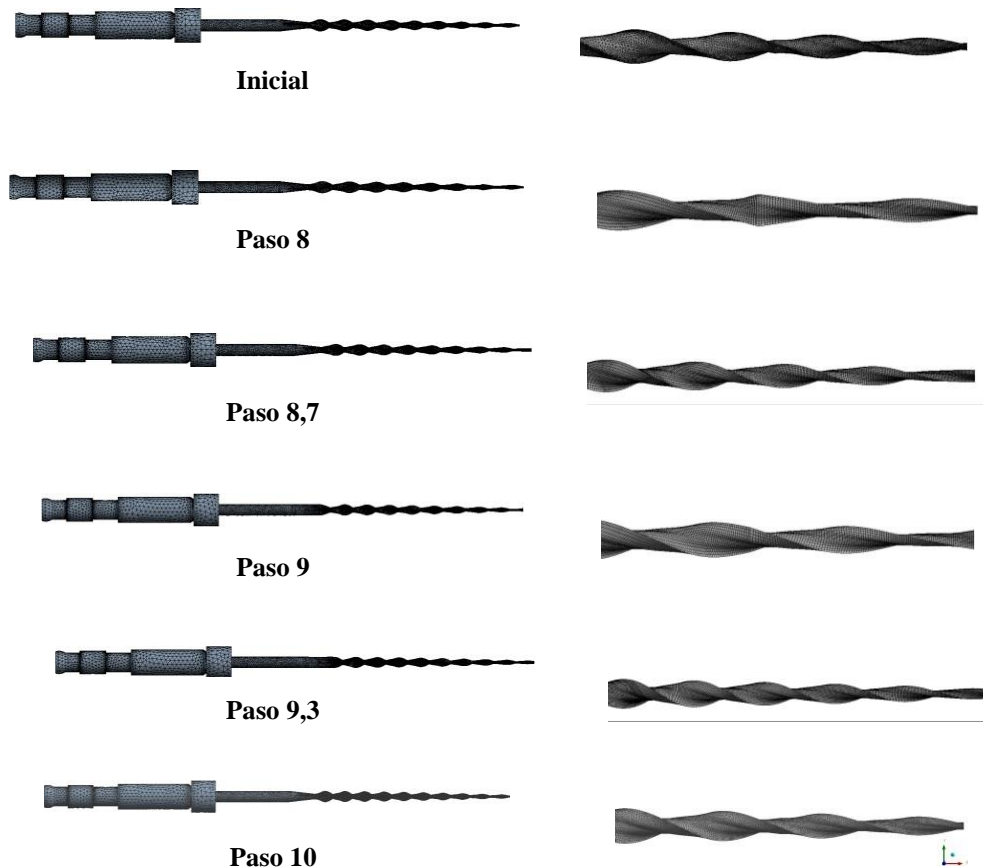
### 4.5.3 MALLADO DE LOS MODELOS

#### 4.5.3.1 Mallado de limas optimizadas

A la hora de realizar las simulaciones en ANSYS, una vez introducida la geometría y el material en cuestión, que será una aleación de Níquel Titanio, se procede al mallado de la pieza. Una buena malla del modelo garantiza que los resultados sean coherentes con la realidad, y las mallas obtenidas, como se pueden observar en las siguientes figuras, se

encuentran dentro un del rango aceptable de calidad. Las mallas obtenidas quedan definidas en la Figura 31.

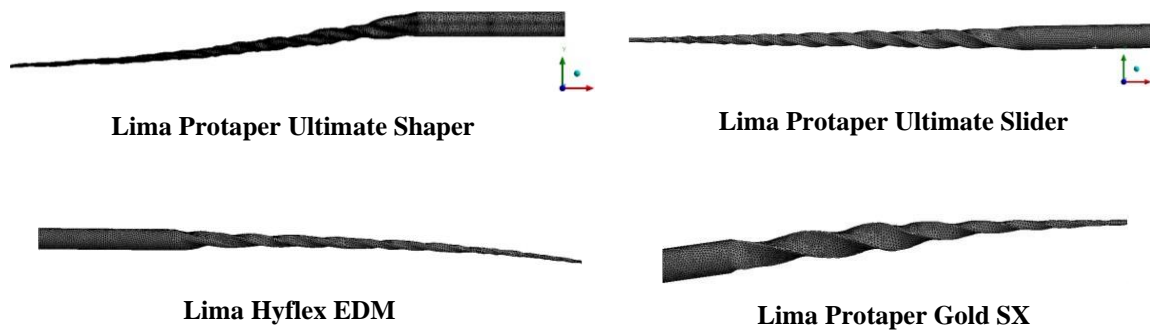
**Figura 31. Mallados modelos optimizados**



#### **4.5.3.2 Mallado de limas comerciales**

Las limas comerciales, al construirse con otra metodología y un programa de diseño alternativo, requiere un proceso de mallado diferente, ya que, para obtener una malla de calidad, se debe seleccionar el módulo de mallado mecánico no lineal en Ansys Structural. Los mallados obtenidos se muestran en la Figura 32 a continuación:

Figura 32. Mallado limas comerciales



#### 4.5.4 ENSAYOS REALIZADOS

Para la optimización en tres dimensiones de la lima, se simularán en ANSYS los ensayos normalizados que se realizan experimentalmente, de manera que las condiciones de contorno busquen asimilarse de la manera más próxima a lo que ocurre en la realidad.

Por consiguiente, se realizarán tres tipos de ensayos, que consistirán en el ensayo de flexión, torsión y la combinación de ambas. En los dos primeros ensayos se estudiará la progresión de la lima a medida que se aumente la flexión y la torsión de la herramienta optimizada en contraposición de la lima inicial.

Una vez estudiados los valores críticos de flexión y torsión por separado, se aplicarán aquellos valores seleccionados en la situación límite para la fractura y se combinará la flexión y la torsión, en la que se buscará la configuración de la herramienta óptima para dicha situación. En esta última simulación, además, se ensayarán y compararán con tres limas comerciales, para evaluar si esta herramienta supondrá una mejora en mercado.

Todas las simulaciones siempre partirán de una simulación de la lima inicial del trabajo, y se compararán los resultados respecto de ésta. Se tendrá como valor de tensión

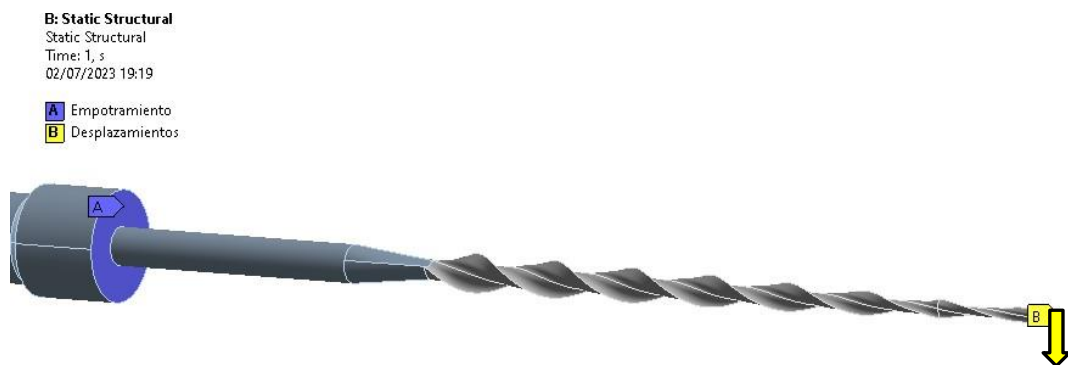
última del material 1304 MPa, de manera que superando este valor la herramienta sufrirá la fractura.

#### 4.5.4.1 Ensayo de flexión

##### 4.5.4.1.1 Condiciones de ensayo

Para el ensayo de flexión, se aplicará un empotramiento en la primera cara del mango y un desplazamiento en la cara de la punta de la herramienta, de manera que se medirá la tensión en la herramienta según aumente la deformación verticalmente.

**Figura 33. Condiciones de contorno ensayo de flexión**



##### 4.5.4.1.2 Resultados del ensayo

Tras la realización del ensayo de flexión en las múltiples limas disponibles a diferentes valores de flexión de 1,2,3,4 y 6 milímetros, se obtienen las siguientes tensiones máximas equivalentes introducidas en la Tabla 6.

A la vista de los resultados, es interesante apreciar el comportamiento lineal que tiene el Níquel Titanio en estas herramientas sometidas a flexión. Consecuentemente, se han representado dichos puntos en el Gráfico 1 y se ha comprobado que, a medida que aumenta la flexión, aumenta la tensión con una misma tendencia. Sin embargo, hay dos casos particulares que no siguen el mismo crecimiento de la tensión, que son el caso de la lima inicial y la lima optimizada de paso 10. En el caso de la lima inicial, para desplazamientos pequeños obtiene un crecimiento de tensiones mayor, y a partir de una flexión de 3 mm posee un crecimiento menor. De forma contraria ocurre con la lima optimizada de paso 10,

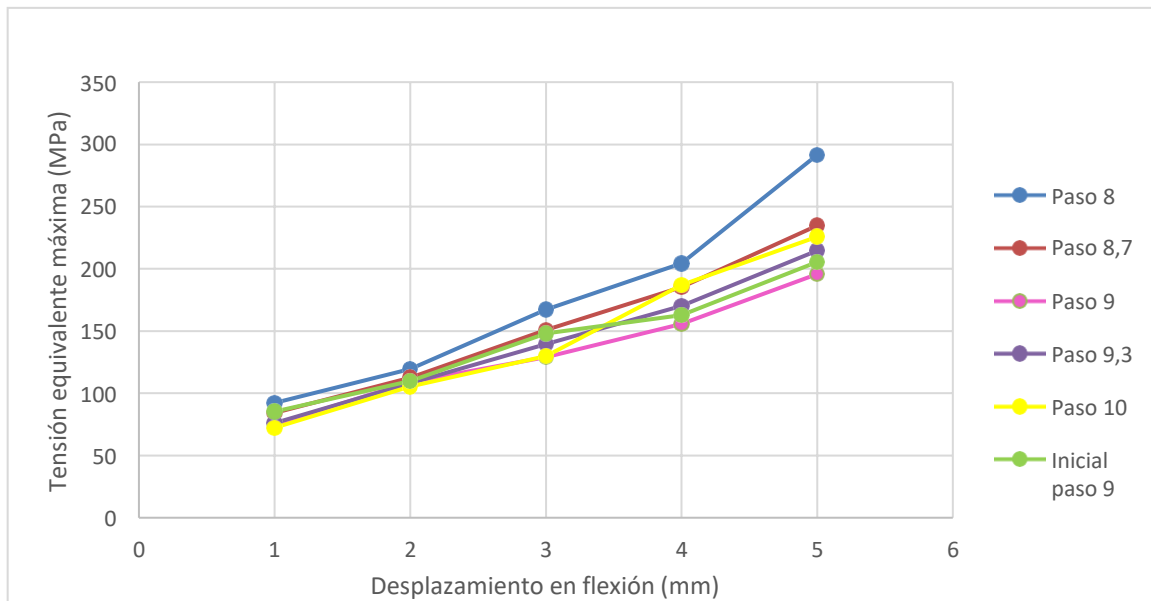
que, a partir de un desplazamiento mayor a 3 mm crece notablemente las tensiones, y por ello es más crítica la tensión en dichos puntos.

En cuanto a la configuración óptima para la flexión, se podría considerar que, para la flexión más crítica, la lima que mejor se comporta ante este tipo de esfuerzos sería la lima optimizada con paso 9, que produce una disminución del perfil de tensiones en un 5% respecto al modelo inicial. Los perfiles de tensiones que se consiguen al final del ensayo de flexión quedan ilustrados en la Figura 34.

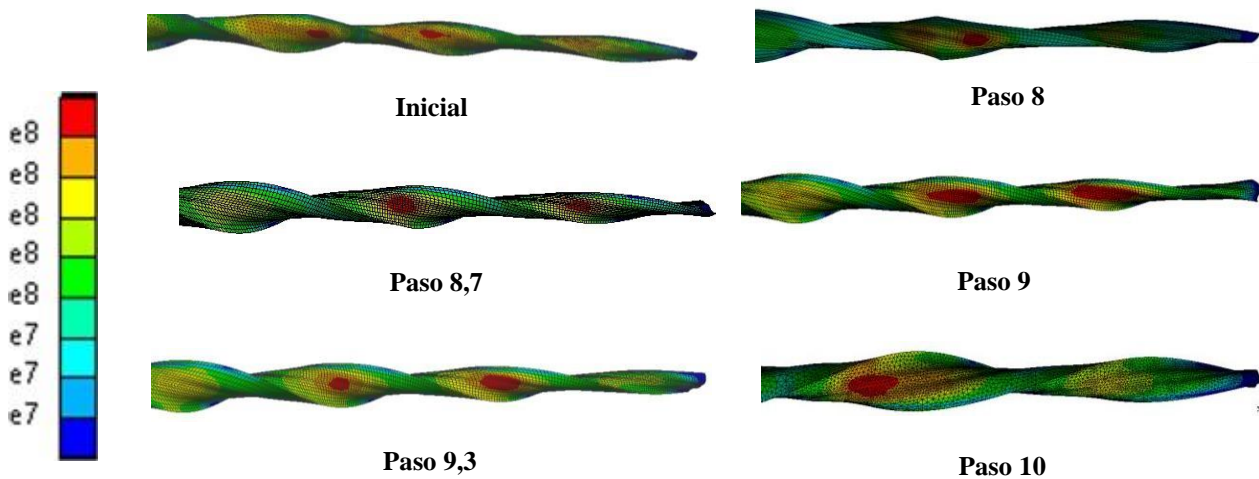
**Tabla 6. Resultados flexión**

| <b>Tensión máxima equivalente von Mises (MPa)</b> |                     |                     |                     |                     |                     |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Lima paso (n)</b>                              | <b>Flexión 1 mm</b> | <b>Flexión 2 mm</b> | <b>Flexión 3 mm</b> | <b>Flexión 4 mm</b> | <b>Flexión 6 mm</b> |
| Inicial   | 85,348              | 109,86              | 135,39              | 162,71              | 205,55              |
| 8   | 92,406              | 119,65              | 167,35              | 204,36              | 291,68              |
| 8,7   | 84,32               | 112,55              | 150,94              | 185,42              | 234,89              |
| 9   | 75,061              | 109,04              | 129,2               | 155,84              | 195,88              |
| 9,3   | 76,261              | 108,33              | 139,72              | 170,34              | 214,71              |
| 10  | 72,345              | 105,59              | 129,79              | 156,87              | 293,89              |

**Gráfico 1. Progresión lineal ante la flexión**



**Figura 34. Resultados flexión**



Nota: Pa

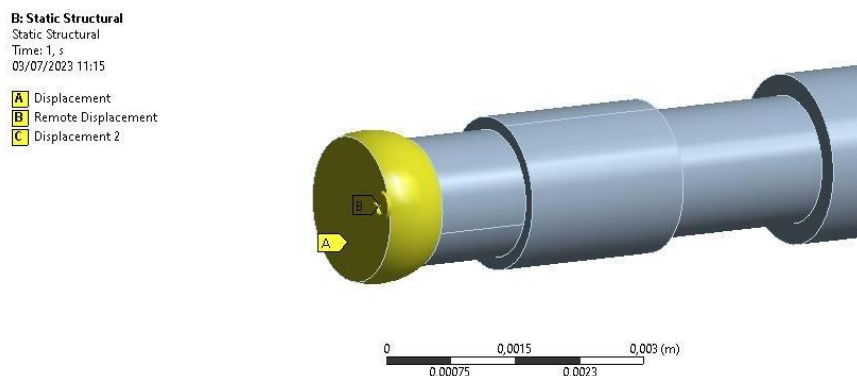
#### 4.5.4.2 Ensayo de torsión

##### 4.5.4.2.1 Condiciones de ensayo

Para el ensayo de torsión se tendrán en cuenta unas restricciones diferentes al caso anterior, ya que estos ensayos, cuando se realizan experimentalmente, se realizan con maquinarias diferentes y por ello tendrán unos agarres y cargas distintas.

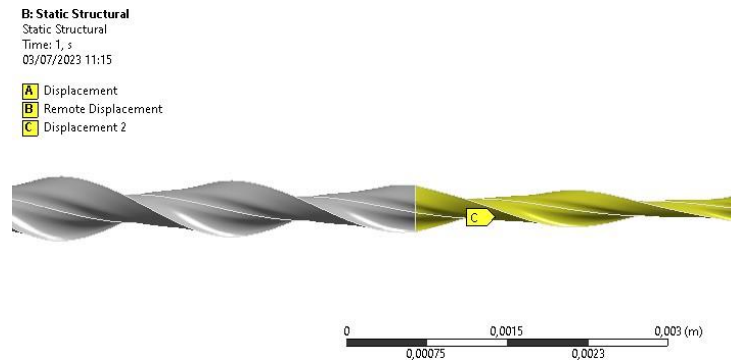
Por ello, en el ensayo de torsión normalizado se agarra la lima introduciendo 3 mm de ella para simular el atasco de ésta, y se inserta un giro desde el mango para producir ese par torsor. Por ello, introduciremos en el programa un desplazamiento en los 3 primeros milímetros desde la punta, en el que dejaremos libre la dirección axial e introduciremos restricción a cero en las otras dos direcciones para simular esta situación de atasco en el conducto como se muestra en la Figura 36. En el mango se aplicará el giro en dirección del eje de la lima, y se aplicará una restricción de movimiento en la cara última en la dirección axial para simular el agarre en esa dirección que se produce en la máquina de ensayo, como queda indicado en la Figura 35.

Figura 35. Condiciones de contorno en el mango





**Figura 36. Restricción en la punta**



#### 4.5.4.2.2 Resultados del ensayo

Al realizar este ensayo a las diferentes limas, se obtienen los valores de tensión equivalente máxima que se pueden observar en la Tabla 7, y representadas gráficamente en el Gráfico 2. Como se puede apreciar en el gráfico, hay un comportamiento menos lineal para torsiones menores, y una vez llevado al valor de  $10^\circ$  de giro, el comportamiento en todas las limas es lineal.

En este ensayo, los resultados apuntan a que la lima optimizada con paso 10 obtiene los valores más bajos de torsión sometida a los ángulos seleccionados. De estos resultados obtenidos, es interesante mencionar que para el resto de los pasos ninguna de las otras limas mejora el perfil de tensiones obtenido con la lima inicial.

Como última observación acerca de los resultados, observando los perfiles de tensiones que se pueden observar en la Figura 37, donde se puede apreciar los perfiles de tensión de cada una de las limas, apreciándose que gran parte de las herramientas tienen un perfil similar a excepción de la lima inicial de paso 9, que posee un perfil de tensiones de carácter puntual en la zona cercana a donde se ubica el atasco de la lima. En el resto de los perfiles de sección optimizada, las tensiones máximas se reparten a lo largo de una fibra que sigue la curvatura de la irrigación.

Como se puede observar con los resultados de la Tabla 7, en ningún momento se supera la tensión última del material, por tanto, para estos valores de giro de la herramienta no se producirá la fractura del instrumento.

**Gráfico 2. Ensayo de torsión**

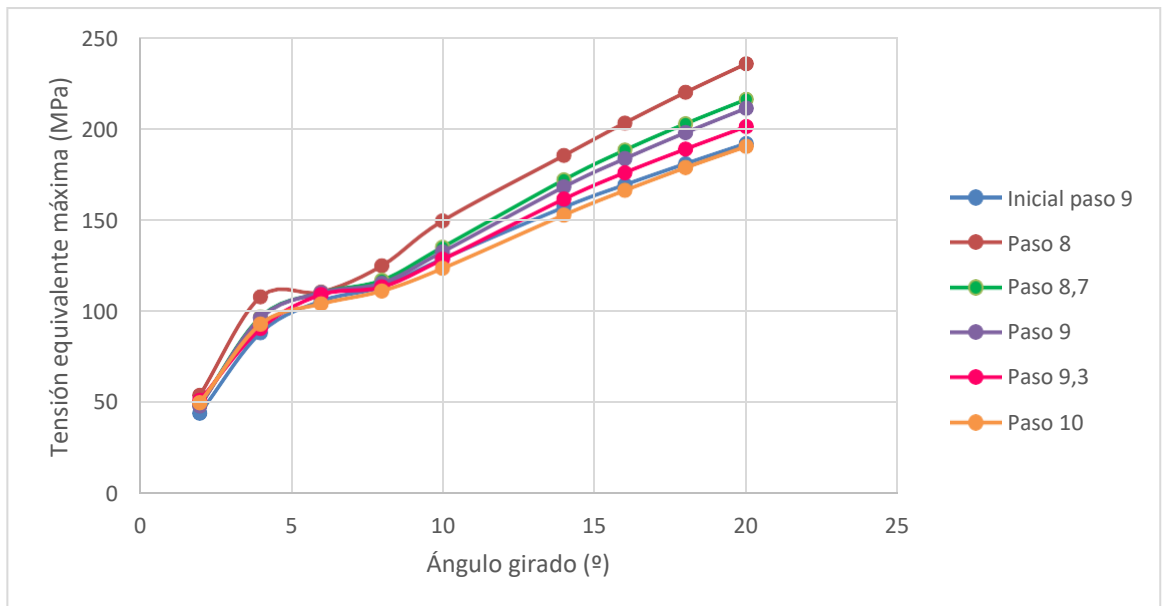
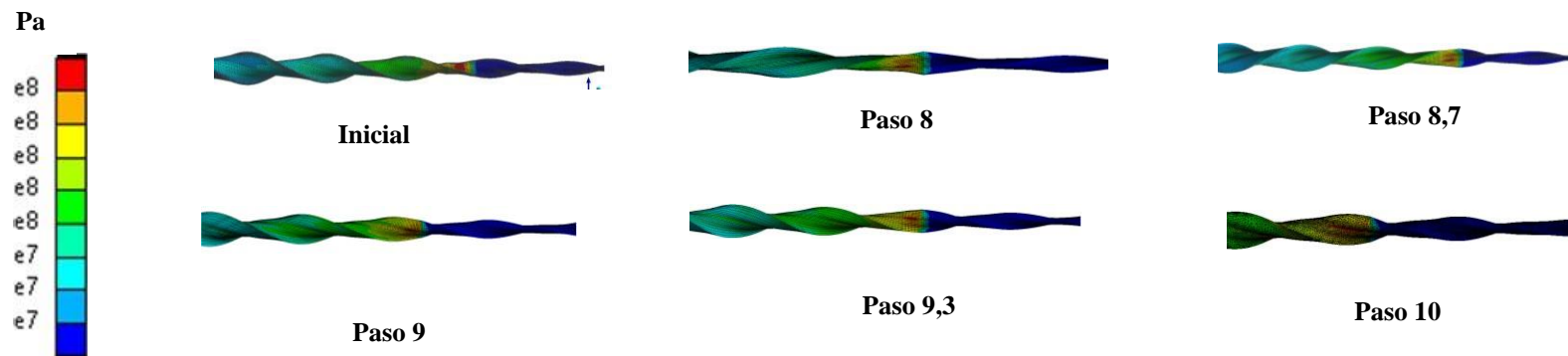


Tabla 7. Resultados ensayo de torsión

| Tensión máxima equivalente von Mises (MPa) |         |         |         |         |          |          |          |          |          |
|--|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Paso (n)                                   | Giro 2° | Giro 4° | Giro 6° | Giro 8° | Giro 10° | Giro 14° | Giro 16° | Giro 18° | Giro 20° |
| Inicial                                    | 44,013  | 88,027  | 105,47  | 113,2   | 128,55   | 156,82   | 169,07   | 180,63   | 191,72   |
| 8  | 53,877  | 107,75  | 110,33  | 124,75  | 141,32   | 185,17   | 202,94   | 219,67   | 235,35   |
| 8,7  | 48,349  | 96,698  | 109,97  | 116,79  | 134,98   | 171,86   | 188,05   | 202,51   | 215,8    |
| 9  | 48,041  | 96,082  | 109,93  | 115,16  | 132,37   | 167,96   | 183,37   | 197,62   | 211      |
| 9,3  | 51,058  | 90,412  | 108,87  | 113,09  | 128,19   | 161,31   | 175,71   | 188,62   | 200,94   |
| 10   | 49,77   | 92,805  | 103,82  | 110,91  | 123,3    | 152,56   | 165,97   | 178,41   | 189,99   |

Figura 37. Resultados ensayo de torsión



### **4.5.4.3 Ensayo de torsión combinado con flexión**

#### **4.5.4.3.1 Justificación del ensayo**

El último análisis que se realizará en este trabajo combinará la flexión y la torsión en la herramienta, lo que nos dará una perspectiva más realista de la situación que se produce en un atasco de la lima.

Por esta razón, será un ensayo en el que se estudiará el comportamiento de la lima inicial frente a la posible lima optimizada, con la particularidad de que se efectuará una comparación con limas comerciales. Los resultados de este ensayo aportarán una visión de la lima propuesta en mercado, y si supondrá una mejora considerable entre el abanico de limas actual.

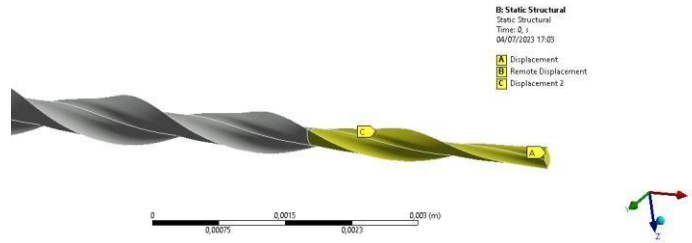
#### **4.5.4.3.2 Condiciones de ensayo**

Los valores que se seleccionan para este ensayo serán los valores máximos de flexión y torsión de los ensayos realizados previamente, ya que se desea buscar la configuración más desfavorable en la que se pueda encontrar la herramienta. Por esta razón, el giro de la lima estará fijado a  $20^\circ$ , y paralelamente para la flexión, se evaluarán 3 ángulos diferentes de aplicación:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , siendo el ángulo de  $90^\circ$  aquel que recaiga sobre la punta de la herramienta.

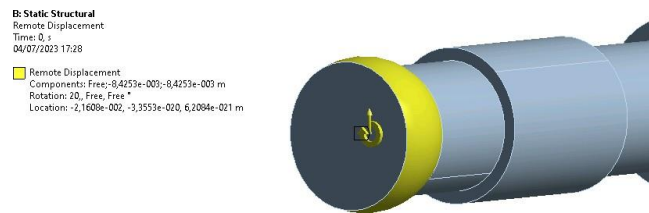
Para las condiciones de contorno en la lima, se aplicarán distintas restricciones de movimiento aplicadas a los 3 primeros milímetros tomados desde la punta. En primer lugar, se aplicará una restricción en las direcciones radiales de la lima, es decir, en Y y Z, siendo la dirección X la axial. En segundo lugar, se tomará la cara de la punta y se sujetará en el sentido axial, dejando libres los otros dos sentidos del movimiento. Estas restricciones en la punta quedan definidas como se indica en la Figura 38.

El giro y la flexión se aplicarán directamente desde el mango, o en caso de carecer de mango, como en las limas comerciales, desde la cara donde comienza el vástago, como se aprecia en la Figura 39.

**Figura 38. Sujeción de la herramienta para ensayo de torsión y flexión**



**Figura 39. Zona de aplicación de giro y desplazamientos en el ensayo de torsión y flexión en limas optimizadas**



#### 4.5.4.3.3 Resultados del ensayo combinado de torsión y flexión

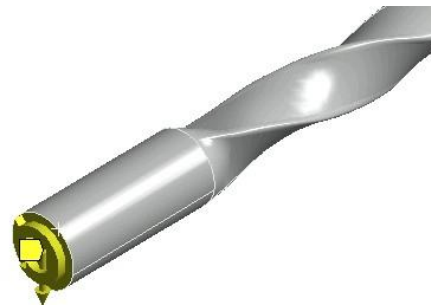
Tras lanzar las simulaciones de los esfuerzos combinados de flexión y torsión, se obtienen los resultados agrupados en la

**Figura 40. Zona de aplicación de giro y desplazamientos en el ensayo de torsión y flexión en limas comerciales**

**Tabla 8** y representados en el Gráfico 3:

**A: Static Structural**  
Remote Displacement  
Time: 1, s  
04/07/2023 17:32

Remote Displacement  
Components: Free;-6,e-003;Free m  
Rotation: Free, Free, 20, °  
Location: 7,3741e-003, 2,9081e-003, 1,85e-002 m



**Tabla 8. Resultados de ensayo torsión y flexión**

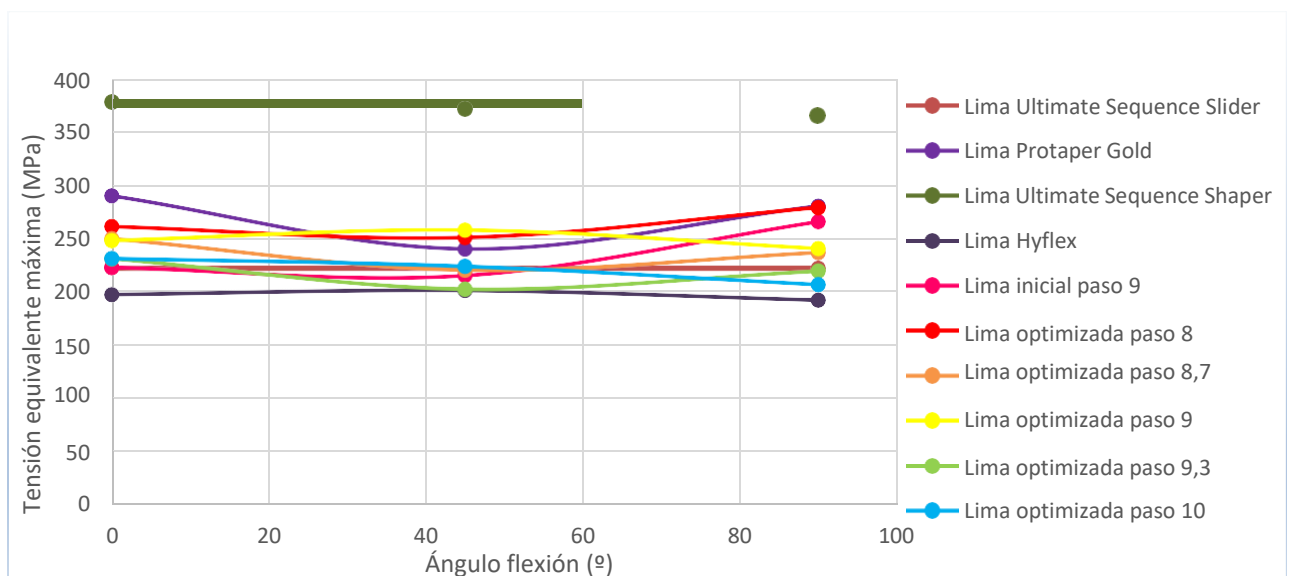
| Tensión máxima equivalente von Mises (MPa) |            |             |             |
|--|------------|-------------|-------------|
| Lima paso (n)                              | Flexión 0° | Flexión 45° | Flexión 90° |
| Inicial                                    | 222,95     | 215,32      | 265,52      |
| 8  | 261,02     | 250,84      | 278,73      |
| 8,7  | 249,7      | 220,52      | 236,75      |
| 9  | 248,02     | 257,76      | 240,57      |
| 9,3  | 231,11     | 202,76      | 219,49      |
| 10   | 231,27     | 223,99      | 206,92      |
| Protaper Ultimate Sequence Shaper          | 222,79     | 221,48      | 222,37      |
| Protaper Gold                              | 289,61     | 240,18      | 280,2       |
| Hyflex EDM                                 | 197,66     | 201,47      | 192,47      |
| Protaper Ultimate Sequence Slider          | 378,53     | 371,59      | 366,07      |

A la vista de estos resultados como se enseñan en la Tabla 8 y representados gráficamente en el Gráfico 3, podemos observar que tenemos tendencias distintas para cada una de las limas según el ángulo de carga de flexión. En cualquiera de los casos, los mayores valores de tensión equivalente máxima se observan en la lima Protaper Ultimate Sequence Slider, de manera que se encuentra alejada del marco de tensiones en el que el resto de las herramientas trabaja, y será considerado como un “outlier”. Por esta razón, en los resultados se asumirá que cualquier lima que se presente supera las condiciones de trabajo de esta herramienta, y se procederá con la comparación entre el resto de las limas, que trabajan con valores de tensiones similares.

A su misma vez, también se puede resaltar que, a priori, la herramienta que sufre tensiones menores para cualquier ángulo de aplicación de la flexión es la lima Hyflex, por ello se debe comparar el comportamiento de las limas propuestas respecto a esta especialmente, dado es la que mejor respuesta obtiene en las simulaciones.

Por consiguiente, se analizarán los resultados en función del ángulo de aplicación de la flexión dado que se tratan diferentes puntos de trabajo y, viendo que cada herramienta sigue un comportamiento distinto en cada caso, analizaremos cada ensayo separadamente.

**Gráfico 3. Resultados del ensayo de torsión y flexión**



Para un grado de carga en dirección perpendicular a la punta, es decir, un ángulo de aplicación de  $0^\circ$ , las tensiones menores se obtienen con la lima Hyflex, seguida de la lima Protaper Shaper y la lima inicial de la que parte el estudio. Tras estas, dentro del abanico de limas optimizadas propuestas, aquellas con mayor paso, de 9.3 y 10, son aquellas que más se acercan a los valores menores, con una diferencia entre 20 y 30 MPa. La diferencia entre el mejor y peor resultado es de 91.95 MPa, por tanto, hay diferencias significativas entre los resultados para este ensayo en cada herramienta.

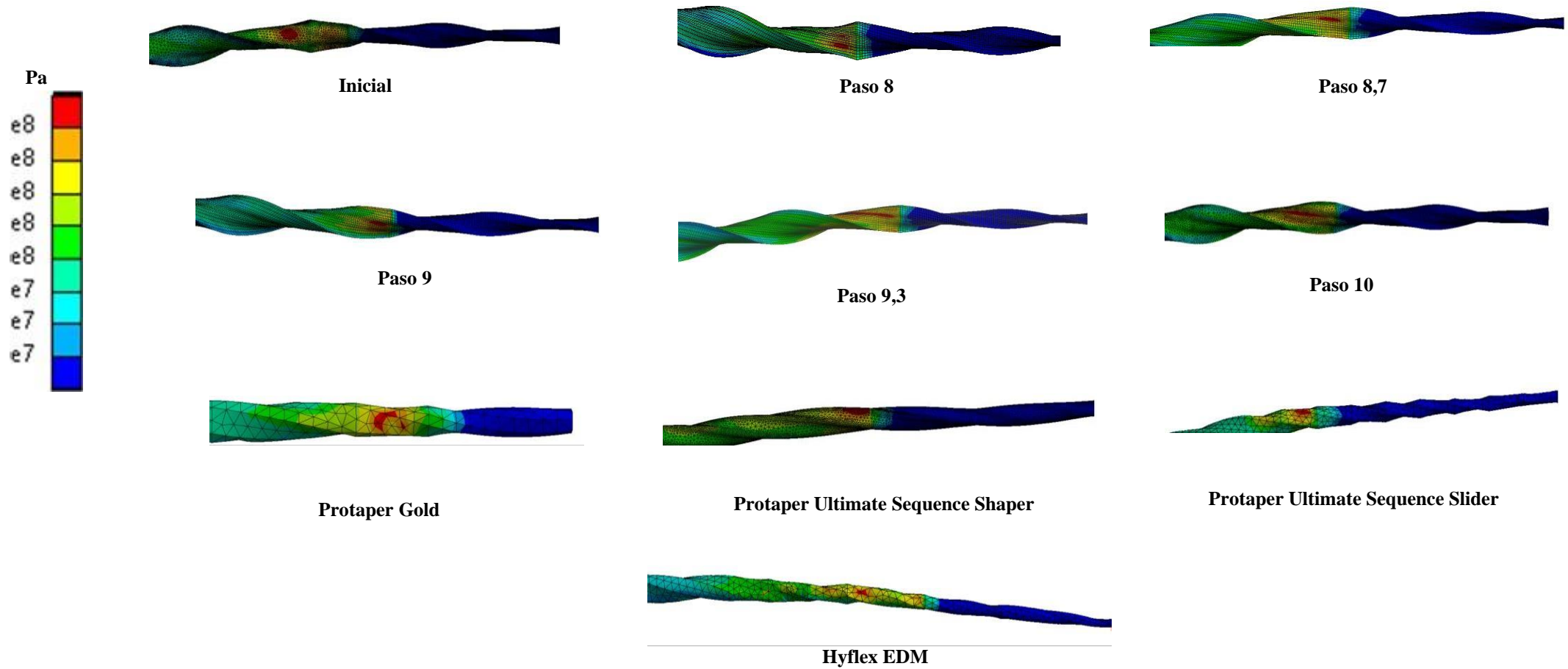
Para un ángulo de flexión de  $45^\circ$ , se puede ver como los puntos en el gráfico tienden a converger en una misma región, lo que hace que exista un abanico de tensiones con un rango de tensiones menor al anterior. Los valores más bajos registrados se obtienen con la lima Hyflex de igual manera que se consigue con la lima optimizada de paso 9,3, ya que la diferencia entre estos mínimos es de apenas 1,32 MPa. Esto supone un éxito para este modelo optimizado, ya que conseguimos trabajar con un mismo régimen de tensiones mejorado respecto a una herramienta cuyas prestaciones son excelentes, como es el caso de la Hyflex. En este ensayo en concreto, cabe mencionar que el peor resultado de tensión registrado lo encabeza la lima optimizada de paso 9, con una tensión de 257.76 MPa, que está separado de la tensión más baja por 56.29 MPa, por lo que se verifica que el rango de tensiones ha reducido para este régimen de carga, y las diferencias entre resultados son menores que en el ensayo anterior.

Por último, para una flexión con la carga sobre el lomo de la zona de corte ( $90^\circ$ ), se obtiene, una vez más, las tensiones más bajas con la lima Hyflex, seguida de la lima optimizada de paso 10, con una diferencia entre sus tensiones de 14.45 MPa. Al igual que en el caso anterior, las limas que registran peores valores de tensión son la lima optimizada de paso 9 y la Protaper Gold, seguida de la lima optimizada de paso 8. El rango de valores entre la menor y la mayor tensión es de 87.73 MPa, por lo que, al igual que en el primer ensayo, tenemos unas diferencias entre las distintas herramientas más significativas.



A continuación, se insertarán en la Figura 41 los perfiles de tensiones en cada lima para el ensayo de torsión de 20° combinada con una flexión de 6 mm con un ángulo de aplicación de 45°, dado que muestra los resultados mejores obtenidos en este ensayo.

**Figura 41. Resultados ensayo combinado de torsión y flexión**



## Capítulo 5. DISCUSIÓN

El propósito de este trabajo reside en la obtención de una lima endodóntica optimizada que sea capaz de mejorar la resistencia de la herramienta ante la flexión y la torsión, ya que la principal causa de rotura de éstas viene fuertemente influenciada por estos esfuerzos.

### 5.1 OPTIMIZACIÓN EN DOS DIMENSIONES

En primera instancia, se plantea una optimización en dos dimensiones en las que se simula un par torsor en el perfil de la lima aplicando una fuerza en su extremo generando un par equivalente al valor regido por el fabricante de la herramienta.

Analizando el resultado final de la optimización, se puede apreciar que el perfil obtenido agrega material en la zona que debe soportar más esfuerzos, ensanchando la curvatura que caracteriza la *S* itálica. El nuevo modelo implica una reducción en las tensiones del 25.94% manteniendo prácticamente invariable el valor de la sección total.

Esto supone una gran ventaja para el fabricante ya que consigue, utilizando la misma cantidad del mismo material, o incluso una cantidad menor, obtener una herramienta con propiedades mecánicas mejoradas. Como consecuencia, el proceso de fabricación de estas herramientas se ve positivamente beneficiado, ya que el fabricante tendrá acceso a una lima con una resistencia a la torsión mejorada sin necesidad de aumentar sus gastos en conseguir estas propiedades mecánicas por otros métodos más costosos.

### 5.2 OPTIMIZACIÓN EN TRES DIMENSIONES

La optimización en tres dimensiones trata tres tipos de ensayos diferentes: ensayo de flexión, ensayo de torsión y ensayo simultáneo de torsión y flexión. A través de ellos, se pretendía

buscar un paso adecuado para la herramienta optimizada, de manera que se modelan 5 limas de pasos 8, 8.7, 9, 9.3 y 10 y se simulan en cada uno de los ensayos propuestos.

### **5.2.1 ENSAYO DE FLEXIÓN**

Este tipo de ensayo es muy frecuentemente aplicado ya que simula el comportamiento de las herramientas en conductos curvos, y el análisis de los esfuerzos generados en estas situaciones es de vital importancia en este estudio.

Consecuentemente, en el ensayo de flexión presentado en este estudio se aplican diferentes desplazamientos en la punta de la herramienta, desde 1 hasta 6 mm. Los resultados muestran que la limas con mejor resistencia a la flexión son la lima de paso 9, 9.3, 8.7,8 y 10.

Se verifica con este ensayo la característica superelasticidad del NiTi que constituye la herramienta, ya que, para una deformación de 6 mm, que supone un más de un tercio de la longitud de la parte activa de la lima, se obtienen tensiones del orden de 4 veces menor a la tensión última del material.

Sin embargo, como bien explicó Chevalier en su estudio en 2010, en la práctica, una misma herramienta se utiliza en repetidas ocasiones, y por ello, estos esfuerzos que a priori parecen inofensivos de cara a la rotura de la herramienta generan fatiga en la propia herramienta, y deben ser tenidos en cuenta en las situaciones críticas (Chevalier et al., 2010). Con los resultados en del último ensayo del estudio se verificarán estos hechos.

### **5.2.2 ENSAYO DE TORSIÓN**

El ensayo de torsión juega un papel importante en el estudio de la resistencia de las herramientas, ya que imita una situación crítica en la técnica como el atasco de la lima en el conducto. Por esta razón, en este trabajo de investigación se ha propuesto un ensayo en el que se observa el comportamiento de cada herramienta desde el momento que se comienza a aplicar el giro en el mango y se aumenta paulatinamente.

Analizando el Gráfico 2, en el que se ve representada la progresión de la torsión en cada herramienta, estas herramientas tienen una progresión lineal a medida que aumenta el grado de torsión. Este hecho puede beneficiar al fabricante de cara a poder realizar una estimación buena a priori del orden de carga de torsión a la que puede romper la herramienta.

A la vista de los resultados que se observan en la Figura 37, la lima inicial presenta un perfil de tensiones significativamente diferente al que presentan los modelos de las limas optimizadas. Las tensiones máximas en la lima inicial se encuentran concentradas en una región crítica, mientras que el modelo optimizado presenta un perfil de tensiones distribuido a lo largo de una fibra. En el caso de una concentración de tensiones en una zona de la herramienta, esto genera un mayor riesgo a la fractura, ya que aumenta la probabilidad de que se produzca un esfuerzo excesivo en dicha zona y fracture. Esto reduce la vida útil que se espera del instrumento ya que las tensiones, además, se encuentran desequilibradas y pueden ocasionar grietas en las zonas de mayor concentración tensional con más facilidad.

Por consiguiente, el modelo optimizado supone una excelente mejora gracias a que estas fibras mejoran la resistencia y la durabilidad de la herramienta, equilibrando las tensiones y aliviando la fatiga que se pueda generar en el instrumento de trabajo.

Como resultado de este ensayo se puede observar que los modelos optimizados con mejor resistencia a la torsión son la lima de paso 10, paso 9.3, paso 9 y paso 8.7, obteniéndose la mayor tensión registrada en la lima de paso 8. Llama la atención de estos resultados la fuerte relación que surge entre la resistencia a la torsión con el paso, ya que a mayor paso mejor resistencia a la torsión.

### **5.2.3 ENSAYO DE FLEXIÓN-TORSIÓN**

Este último ensayo efectuado en este trabajo es el definitivo en cuanto a la optimización en tres dimensiones de la herramienta, ya que a partir de éste se analiza y selecciona la herramienta optimizada definitiva. Además, se utiliza para comparar este nuevo modelo presentado como consecuencia del trabajo con las limas comerciales presentes en el mercado a día de hoy, y analizar su validez en caso de lanzarse a mercado.

Se observa en los resultados mostrados en la Tabla 8 que, para cada ángulo de flexión presentado, encontramos respuestas variadas en cuanto a tensiones máximas. Para un grado de flexión a 0 y 45°, la lima optimizada de paso 9,3 ofrece las tensiones más bajas registradas, mientras que para una flexión que recae a 90° sobre la lima, la tensión más baja se obtiene con la herramienta optimizada de paso 10, seguida de la lima de paso 9,3. Por esta razón, puede asumirse que la lima con mejor resistencia a la torsión y a la flexión de manera conjunta es la lima de paso 9,3.

Con este tipo de esfuerzos, ocurre el mismo fenómeno comentado en el ensayo de torsión, las tensiones en el modelo optimizado se encuentran distribuidas a lo largo de una fibra. Particularmente en este ensayo supone una mejora extra, ya que este alivio de tensiones también contribuye a que haya menos posibilidad de fractura ante la torsión combinada con la flexión que se da en la propia herramienta al entrar en un canal curvado, por tanto, este perfil también contribuye a la mejora de la resistencia ante ambos esfuerzos.

#### **5.2.4 COMPARACIÓN CON LIMAS COMERCIALES:**

Realizado el análisis comparativo entre las limas comerciales y la lima obtenida tras la optimización paramétrica en dos y tres dimensiones, se llegan a las siguientes conclusiones:

- Comparada con la lima Hyflex, la lima de paso 9.3 queda por detrás de la resistencia que ésta ofrece.
- Comparándola con la lima Protaper Ultimate Sequence Shaper, sería mejor opción la lima optimizada, ya que tiene resultados muy similares para los ángulos de flexión de 0 y 90°, pero para 45° supone una reducción de las tensiones significativa.
- Comparada con la lima Protaper Ultimate Sequence Slider como se ha mencionado anteriormente, el modelo optimizado seleccionado mejora con creces el perfil de tensiones que presenta esta lima comercial en cuestión.
- Por último, haciendo referencia a la lima Protaper Gold, la lima de paso 9.3 presenta valores de tensión significativamente menores a los conseguidos con la lima Protaper Gold que se ha ensayado.

En resumen, en cuanto a las tensiones máximas registradas en este ensayo, la lima Hyflex registra tensiones menores que la lima optimizada, pero comparada con las otras tres limas presentadas en cuestión, podemos observar que el modelo optimizado ofrece mejores resultados.

Sin embargo, tras haber mencionado en numerosas ocasiones la mejoría del perfil de tensiones respecto de la lima de partida, es de gran relevancia observar las distribuciones de tensiones observadas en cada una de las limas comerciales en la Figura 41. Cabe destacar de este examen realizado que, en todos los casos las limas de las casas comerciales presentan una concentración de tensiones en zonas críticas en estas herramientas.

Por esta razón la herramienta optimizada presenta una clara diferenciación respecto a las limas presentes en el mercado, de manera que, gracias a esta nueva configuración, se mejora la distribución de tensiones a lo largo del perfil, mejorando su resistencia a la torsión y a la flexión, como se buscaba como objetivo principal del trabajo.

Anteriormente en el trabajo se comenta una no-linealidad en la respuesta de diferentes limas de Níquel Titanio en el estudio realizado por Arab-Chirani, y a la vista de los resultados de este trabajo, podemos corroborar que cada una de las herramientas tienen una serie de tendencias diferentes de crecimiento o decrecimiento de las tensiones según el ángulo de carga de la flexión en el último ensayo realizado. Este es el caso, por ejemplo, de la lima Hyflex que se menciona anteriormente, en la que su mayor tensión registrada corresponde con un ángulo de flexión de  $45^\circ$ , mientras que de manera contraria ocurre con la lima optimizada de paso 9.3, que para dicho ángulo obtiene su menor tensión equivalente.

Un último análisis que merece mención en esta discusión es la relación existente entre la resistencia de la herramienta y el perfil seleccionado para ésta, y estudiar qué perfil ofrece mejores resultados tensionales para este tipo de esfuerzos. En primer lugar, el perfil triangular que ofrece la lima Hyflex ofrece una buena resistencia a los esfuerzos torsionales y flectores, seguido de la S itálica optimizada en este trabajo.

Sin embargo, comparando las limas Protaper Ultimate Sequence, cuyos perfiles romboidales son iguales, podríamos apreciar resultados muy diferentes en sus tensiones, por tanto, surge la posibilidad de que haya otro parámetro que influya en la resistencia de la lima además del perfil. La lima con las tensiones equivalente de von Mises más altas, que es la lima Protaper Ultimate Sequence Slider es la única entre las limas comerciales que no posee una curvatura respecto del vástago, por ello, podría verse relacionada la resistencia de la herramienta por la curvatura de ésta.

Como consecuencia de este trabajo, se abre la posibilidad de un nuevo estudio acerca de este parámetro del ángulo de curvatura de la herramienta. Este ángulo podría evaluarse en estudios futuros de cara a una optimización de la resistencia de la herramienta, al igual que podría realizarse en adelante una evaluación del ángulo adecuado para una herramienta según la curvatura del conducto a trabajar, con vistas a evitar su atasco, y por tanto su fractura.

En último lugar, por causa del trabajo de investigación realizado, surge un nuevo estudio que continúe en la línea del proyecto contrastando de manera experimental los ensayos realizados. De esta manera, se comprobaría el comportamiento optimizado de la herramienta, así como una verificación del método aplicado y de las simulaciones realizadas en el estudio presente.



## **Capítulo 6. CONCLUSIONES**

Tras la realización de estos tres ensayos, podemos concluir que, entre los modelos optimizados propuestos, en la flexión los mejores resultados a desplazamientos mayores se dan con la lima de paso 9, en la torsión en la lima de paso 10 y la combinación de torsión y flexión en la lima de paso 9.3.

Sin embargo, en los ensayos de flexión y torsión por separado, la lima de paso 9.3 es la segunda mejor opción en cada una de estas simulaciones, y al ser la mejor alternativa en el ensayo combinado, que es aquel que mejor que acerca a la realidad de la técnica, se puede concluir que la herramienta que mejor resistencia ofrece ante los tres ensayos es la lima de paso 9,3.

## Capítulo 7. ALINEACIÓN CON LOS ODS

Este trabajo se alinea con los objetivos y metas de desarrollo sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas.

- Salud y Bienestar:

El principal objetivo de este proyecto es ofrecer un producto mejorado y que garantice buenos resultados para el paciente, reduciendo el dolor y las molestias postoperatorias. Es nuestra prioridad realizar un avance que contribuya a la mejora del bienestar de la sociedad.

- Industria, Innovación e Infraestructuras:

El objeto de estudio no sólo reside en conseguir una lima optimizada, sino que con la mejora de la eficiencia de ésta se requiera menos reemplazos, y con ello, menos residuos. Esto se ajusta con el objetivo de innovación y progreso tecnológico, ya que con ello conseguimos una solución más duradera en el tiempo.

- Producción y consumo responsables:

Se trata sin duda del objetivo esencial de lo que un proceso de optimización conlleva. La propuesta descrita por la ONU la define a la perfección: “El consumo y la producción sostenibles consisten en hacer más y mejor con menos”. Y esto será lo que se ha tratado de cumplir de la mejor manera posible.



## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- Adby, P. (2013a). *Introduction to Optimization Methods*. Springer Science & Business Media.
- Adby, P. (2013b). *Introduction to Optimization Methods*. Springer Science & Business Media.
- Al Yahya, R. S., Al Attas, M. H., Javed, M. Q., Khan, K. I., Atique, S., Abulhamael, A. M., & Bahammam, H. A. (2023). Root Canal Configuration and Its Relationship with Endodontic Technical Errors and Periapical Status in Premolar Teeth of a Saudi Sub-Population: A Cross-Sectional Observational CBCT Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1142.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph20021142>
- Alrahabi, M., Zafar, M. S., & Adanir, N. (2019). Aspects of Clinical Malpractice in Endodontics. *European Journal of Dentistry*, 13(3), 450-458.  
<https://doi.org/10.1055/s-0039-1700767>
- Arbab-Chirani, R., Chevalier, V., Arbab-Chirani, S., & Calloch, S. (2011). Comparative analysis of torsional and bending behavior through finite-element models of 5 Ni–Ti endodontic instruments. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 111(1), 115-121.  
<https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2010.07.017>
- Canalda Sahli, C. (2014). *Endodoncia: Técnica y bases científicas*.

- Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation - WSC '97*, 118-126. <https://doi.org/10.1145/268437.268460>
- Chevalier, V., Arbab-Chirani, R., Arbab-Chirani, S., & Calloch, S. (2010). An improved model of 3-dimensional finite element analysis of mechanical behavior of endodontic instruments. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 109(3), e111-e121. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2009.10.039>
- Cruz, M. (2019, octubre 14). *Todo lo que debes saber sobre las limas de endodoncia: (I) Limas manuales.* Dentaltix - Depósito Dental Online. <https://www.dentaltix.com/es/blog/todo-lo-que-debes-saber-las-limas-endodoncia-i-limas-manuales>
- Kiefner, P., Ban, M., & De-Deus, G. (2014). Is the reciprocating movement *per se* able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments? *International Endodontic Journal*, 47(5), 430-436. <https://doi.org/10.1111/iej.12166>
- Kosti, E., Zinelis, S., Molyvdas, I., & Lambrianidis, T. (2011). Effect of root canal curvature on the failure incidence of ProFile rotary Ni–Ti endodontic instruments. *International Endodontic Journal*, 44(10), 917-925. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01900.x>
- Lozano, A. (2009, mayo 17). *Recomendaciones para el buen uso de las limas rotatorias de níquel-titanio—Gaceta Dental.* <https://gacetadental.com/2009/05/recomendaciones-para-el-buen-uso-de-las-limas-rotatorias-de-nquel-titanio-8086/>

- Madarati, A. A., Watts, D. C., & Qualtrough, A. J. E. (2008). Factors contributing to the separation of endodontic files. *British Dental Journal*, 204(5), Article 5. <https://doi.org/10.1038/bdj.2008.152>
- McGuigan, M. B., Louca, C., & Duncan, H. F. (2013). Endodontic instrument fracture: Causes and prevention. *British Dental Journal*, 214(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.324>
- McGuigan, M., Louca, C., & Duncan, H. (2013). Endodontic instrument fracture: Causes and prevention. *British dental journal*, 214(7), 341-348.
- Menis de Mutal, L., & Lía Arena, A. (2013). *Errores y/o accidentes durante la terapia endodóntica*.
- Nascimento, E. H. L., Gaêta-Araujo, H., Andrade, M. F. S., & Freitas, D. Q. (2018). Prevalence of technical errors and periapical lesions in a sample of endodontically treated teeth: A CBCT analysis. *Clinical Oral Investigations*, 22(7), 2495-2503. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2344-y>
- Ninan, E., & Berzins, D. W. (2013). Torsion and Bending Properties of Shape Memory and Superelastic Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of Endodontics*, 39(1), 101-104. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.08.010>
- Parashos, P., Gordon, I., & Messer, H. (2004). Factors Influencing Defects of Rotary Nickel-Titanium Endodontic Instruments After Clinical Use. *Journal of Endodontics*, 30(10), 722-725. <https://doi.org/10.1097/01.DON.0000129963.42882.C9>
- Pedullà, E., Grande, N. M., Plotino, G., Gambarini, G., & Rapisarda, E. (2013). Influence of Continuous or Reciprocating Motion on Cyclic Fatigue Resistance of 4 Different

Nickel-Titanium Rotary Instruments. *Journal of Endodontics*, 39(2), 258-261.

<https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.10.025>

Romero, P. (2018, diciembre 12). *Cómo se realiza una endodoncia*. Rodium Dental.

<https://rodiumdental.com/como-se-realiza-una-endodoncia-paso-a-paso/>

Sahli, C. C., & Agudé, E. B. (2019). *Endodoncia: Técnicas clínicas y bases científicas*.

Elsevier Health Sciences.

Soares, I. J., & Goldberg, F. (2003). *Endodoncia: Técnica y fundamentos*.

Tosati, M. (2019). *Introduction to Ansys DesignXplorer*.

Tosati, M. (2023). *Ansys Topology Optimization / Lightweighting & Shape Optimization*.

<https://www.ansys.com/applications/topology-optimization>





## Capítulo 9. ANEXO

Tabla 9. Resultados factibles obtenidos del DOE

| <u>Design Point</u> | <u>Izq 1 (mm)</u> | <u>Izq 2 (mm)</u> | <u>Izq 3 (mm)</u> | <u>Izq 4 (mm)</u> | <u>Dcha 4 (mm)</u> | <u>Dcha 3 (mm)</u> | <u>Dcha 2 (mm)</u> | <u>Dcha 1 (mm)</u> | <u>Tensión Equivalente Max (GPa)</u> | <u>Área (mm<sup>2</sup>)</u> |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1                   | 0.17564           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.8078                               | 0.054471                     |
| 2                   | 0.21467           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 4.9932                               | 0.05803                      |
| 3                   | 0.19515           | 0.14458           | 0.09              | 0.02252           | 0.0225             | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.2522                               | 0.055167                     |
| 4                   | 0.19515           | 0.17671           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 6.1475                               | 0.057788                     |
| 5                   | 0.19515           | 0.16064           | 0.081             | 0.020268          | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.7941                               | 0.05899                      |
| 6                   | 0.18292           | 0.16863           | 0.08552           | 0.02364           | 0.02475            | 0.0095             | 0.02361            | 0.069893           | 4.6657                               | 0.055479                     |
| 7                   | 0.19515           | 0.16064           | 0.099             | 0.02252           | 0.0275             | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 6.3052                               | 0.056305                     |
| 8                   | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.025931           | 0.066519           | 5.9061                               | 0.056349                     |
| 9                   | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.024772          | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.066519           | 5.8667                               | 0.056595                     |
| 10                  | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.009              | 0.023574           | 0.066519           | 5.8078                               | 0.05667                      |
| 11                  | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.011              | 0.023574           | 0.066519           | 6.1074                               | 0.056136                     |
| 12                  | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.021217           | 0.066519           | 5.9878                               | 0.056208                     |
| 13                  | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.07317            | 5.8078                               | 0.056497                     |
| 14                  | 0.19515           | 0.16064           | 0.09              | 0.02252           | 0.025              | 0.01               | 0.023574           | 0.059867           | 5.9061                               | 0.05636                      |



