



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO
ANÁLISIS DE FISURAS EN DIENTES
ENDODONCIADOS

Autor: Alejandra Arroyo Alonso-Villalobos

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Co-Director: Saúl Manuel Dorado Nuño

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Análisis de fisuras en dientes endodonciados
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 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 de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandra Arroyo Alonso-Villalobos

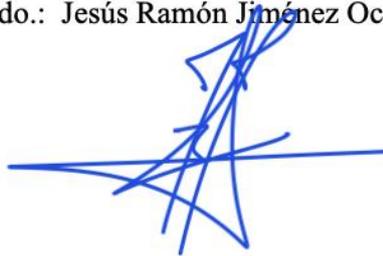
Fecha: 27/ 08/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Fecha: 27/ 08/ 2022



Fdo.: Saúl Manuel Dorado Nuño

Fecha: 27/ 08/ 2022





GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO ANÁLISIS DE FISURAS EN DIENTES ENDODONCIADOS

Autor: Alejandra Arroyo Alonso-Villalobos

Director: Jesús Ramón Jiménez Octavio

Co-Director: Saúl Manuel Dorado Nuño

Madrid

ANÁLISIS DE FISURAS EN DIENTES ENDODONCIADOS

Autor: Arroyo Alonso-Villalobos, Alejandra.

Director: Jiménez Octavio, Jesús Ramón.

Co-Director: Dorado Nuño, Saúl Manuel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: análisis de elementos finitos, endodoncia, fisura dental.

1. Introducción

El procedimiento de endodoncia se corresponde con una técnica mediante la cual se solucionan afecciones al nervio de los conductos radiculares de una pieza dental [1].

Este procedimiento está compuesto por cuatro fases: apertura en la pieza dental, limpieza y desinfección de los conductos radiculares, rellenado de dichos conductos tras el procedimiento y, por último, obturación, es decir, sellado de la corona dental.

Se trata de una técnica con la que se obtienen muy buenos resultados, llegando a conseguir una tasa de retención del 97% [2], pero a veces pueden llegar a producirse fisuras en la pieza dental posteriores a dicho tratamiento.

Dentro del procedimiento de endodoncia, se pueden distinguir varios métodos. El más conocido es el procedimiento de endodoncia tradicional, pero en los últimos años se ha empezado a implementar el proceso de endodoncia mínimamente invasiva. Esto se trata de un procedimiento muy similar al tratamiento tradicional, pero más rápido, preciso y de menor duración [3].

El fracaso en la endodoncia se produce al ocasionarse fisuras en la pieza dental posteriores a dicho tratamiento. Estas pueden surgir debido a numerosos factores, tanto externos como intrínsecos del propio diente.

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en estudiar el riesgo de fisura en una pieza dental posterior a un proceso previo de endodoncia mediante simulaciones llevadas a cabo utilizando la técnica de análisis de elementos finitos, aplicando distintas

condiciones de contorno, con la intención de imitar el efecto de la pieza dental dentro de la mandíbula, teniendo en cuenta la fuerza de masticación ejercida por los dientes directamente superiores a la misma. De este modo y con el objetivo de simplificar las geometrías, se sustituirán las piezas dentales superiores por esferas, aplicando fuerzas remotas sobre ellas, y se realizarán distintas simulaciones empleando una, dos y hasta tres esferas.

Existen muchas posibilidades de fractura dental, pero la más común tras el proceso de endodoncia es la fractura de raíz vertical o VRF (“vertical root fracture” en inglés). Según un estudio publicado por el “Journal of Investigative and Clinical Dentistry” estas aparecen entre el 2% y el 20% de los casos [4].

2. Definición del Proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo de investigación pretende analizar el riesgo de fractura de una pieza dental aislada y con la presencia de los dientes adyacentes a la misma.

La geometría de estudio principal, es decir, la pieza dental de estudio aislada se corresponde con el primer molar mandibular izquierdo número 36. A continuación, en la Figura 1, se muestra dicha pieza dental.

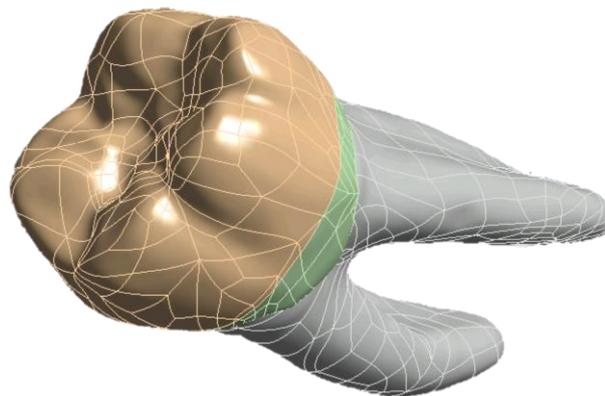


Figura 1. Geometría de estudio aislada

Para la correcta realización de esta investigación, se propusieron los siguientes objetivos. El primero consiste en identificar los aspectos técnicos que subyacen al fracaso de endodoncias por fisuras, el segundo en modelar una pieza dental mediante el método de

elementos finitos, el tercero en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes empleando una esfera y el cuarto en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes, empleando dos y tres esferas.

3. Descripción del modelo

Con el propósito de llevar a cabo los objetivos propuestos anteriormente, se llevarán a cabo un total de ocho simulaciones, realizadas con el software de ingeniería ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos). Para la realización de dichas simulaciones se emplearán una, dos o tres esferas, que pretenden simplificar la geometría de manera que estas simulan el efecto de la fuerza de masticación que ejercen los dientes directamente superiores sobre la pieza dental de estudio.

Se estudiarán un total de cuatro geometrías distintas. La primera se refiere a la pieza dental de estudio aislada, la segunda acompañada del diente directamente a su derecha, la tercera con el diente directamente a su izquierda y la cuarta geometría de estudio se corresponde con la pieza dental principal junto con ambos dientes adyacentes.

Para la consecución de los ensayos de cargas y previo a las simulaciones, se deberá realizar un mallado de la geometría, aparte de la previa elección de la fuerza de masticación y los materiales a emplear. Tras cada simulación, se analizarán los resultados mediante los métodos de Von Mises y de máxima tensión principal.

4. Resultados

Como se ha mencionado anteriormente, se realizaron un total de ocho simulaciones, con una, dos y tres esferas, cuyos resultados se muestran a continuación.

- Simulaciones con una esfera: tras las simulaciones realizadas se puede observar que las distribuciones de tensiones obtenidas coinciden con la distribución de tensiones del ensayo realizado con el diente aislado. Además, en las simulaciones realizadas con dos piezas dentales, segunda y tercera, se obtienen tensiones máximas y mínimas muy parecidas, mientras que, en la cuarta simulación, realizada con las tres piezas dentales, el valor de la tensión máxima resultó ser aproximadamente la mitad del valor obtenido de tensión máxima en la segunda y tercera simulación, cuyas

geometrías de estudio estaban compuestas por solo un diente adyacente a la pieza dental de estudio. Este resultado es coherente ya que la cuarta simulación resulta ser la combinación de la segunda y la tercera simulación. En todas las simulaciones realizadas con una esfera se puede llegar a producir fractura vertical si se superan las tensiones máximas, como se esperaba en un principio.

- Simulaciones con dos esferas: tras las simulaciones realizadas se puede observar que las distribuciones de tensiones obtenidas coinciden con la distribución de tensiones del ensayo realizado con el diente aislado. Las tensiones máximas obtenidas tras la realización de los ensayos con dos esferas son mayores que la tensión máxima obtenida en los ensayos con una esfera. En cuanto a las tensiones mínimas, estas resultan ser mayores en los estudios realizados con una esfera que en los realizados con dos. Tras todas las simulaciones, se pueden producir fracturas verticales si se superan las tensiones máximas.
- Simulación con tres esferas: la distribución de tensiones obtenida tras esta última simulación con tres esferas coincide con la distribución de tensiones obtenida tras el ensayo con el diente aislado. La tensión máxima en el ensayo realizado con tres esferas, octava simulación, es ligeramente superior que la del ensayo realizado con una sola esfera, cuarta simulación, pero de mucha menor magnitud que la del ensayo realizado con dos esferas, séptima simulación. En cuanto a las tensiones mínimas, estas resultan ser distintas comparando todas las simulaciones realizadas con tres esferas. En esta última simulación también se puede llegar a producir fractura vertical si se supera la tensión máxima.

A continuación, en la Figura 2, se muestran los resultados obtenidos tras la primera simulación, realizada con la pieza dental aislada, en la que se puede observar la forma de la distribución de tensiones con la que se compararon los demás ensayos. Cabe destacar que esta distribución de tensiones coincide con la obtenida en otros estudios realizados por otros investigadores de los elementos finitos.

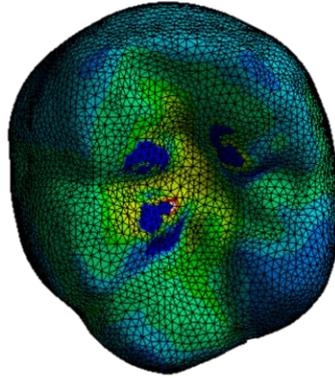


Figura 2. Distribución de tensiones de la pieza dental aislada

5. Conclusiones

Tras la realización de la investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones en base a los objetivos previamente propuestos.

El primer objetivo consistía en identificar los aspectos técnicos que subyacen al fracaso de endodoncias por fisuras. Este se ve reflejado en los tres primeros capítulos. En esencia, se comprobó que las fisuras dentales que se llegan a producir en los dientes tras el proceso de endodoncia suelen consistir en VRF (“vertical root fracture”).

El segundo objetivo de esta investigación consistía en modelar una pieza dental mediante el método de elementos finitos. Una vez obtenido el archivo que contenía la pieza dental de estudio y realizado el ensamblaje de esta con la esfera, se procedió al mallado y a la elección tanto de la fuerza de masticación a aplicar como de los parámetros de los materiales a emplear. Una vez definidos todos los parámetros, se procedió a la realización de la primera simulación sobre el diente aislado con una esfera.

El tercer objetivo propuesto en este trabajo de investigación consistía en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes empleando una esfera. Tras la realización de las ocho simulaciones, se observó como las distribuciones de tensiones coincidían con la obtenida en el ensayo efectuado con el diente aislado, por lo que se consideraron los ensayos realizados como buenos.

El cuarto objetivo consistía en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes, empleando dos y tres esferas. En estas últimas simulaciones, al igual que en los casos anteriores, las distribuciones de tensiones

coincidían con la distribución de tensiones obtenida al realizar el estudio de cargas sobre la pieza dental aislada.

En cuanto a las diferencias entre la realización del estudio de cargas con una pieza dental aislada y con la presencia de los dientes adyacentes a la misma, se puede concluir que las tensiones obtenidas en los ensayos, en la mayoría de los casos, son distintas, de manera que se necesita ejercer una menor fuerza de masticación para conseguir la fisura dental.

Entre los resultados obtenidos, se puede afirmar que la causa más notable por la que una pieza dental se fractura tras el proceso de endodoncia es debido al relleno de los conductos radiculares con un material distinto al de la pieza dental en cuestión.

Tras el análisis, llevado a cabo en el tercer capítulo, de los artículos sobre ensayos de cargas realizados por otros investigadores de los elementos finitos, se comprobó que uno de los factores más importantes para tener en cuenta era la dirección y posición de la carga a aplicar sobre la geometría de estudio, pero, por el contrario, la magnitud de la fuerza no afectaba a la distribución de tensiones.

Además, se comprobó que la distribución de tensiones de los ensayos llevados a cabo en los artículos analizados resultó ser similar a las obtenidas en las simulaciones realizadas en esta investigación, así como también las magnitudes de los valores máximos y mínimos de tensiones obtenidos se encuentran dentro del rango de valores obtenidos en ensayos realizados por otros investigadores.

En conclusión, las simulaciones realizadas a lo largo de esta investigación han demostrado la veracidad de los estudios realizados por otros investigadores de los elementos finitos, y han contribuido a el análisis de la pieza dental teniendo en cuenta además los dientes adyacentes a la misma.

6. Referencias

- [1] Real Academia de la Lengua Española. www.rae.es. <https://dle.rae.es/endodoncia> (accedido ene. 29 2022).
- [2] Y. Zadik, V. Sandler, R. Bechor, y R. Salehrabi, «Analysis of factors related to extraction of endodontically treated teeth», *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology*, vol. 106, n.o 5, pp. e31-e35, nov. 2008, doi: 10.1016/j.tripleo.2008.06.017 (accedido jul. 28 2022).

- [3] A. Anjum y S. Hegde. (2019). «Minimally Invasive Endodontics-A Review» <https://www.semanticscholar.org/paper/Minimally-Invasive-Endodontics-A-Review-AnjumHegde/b904b3e4615325d1ba2a283d4f32fb32d882c442> (accedido ene. 29 2022).
- [4] C. García-Guerrero, C. Parra-Junco, S. Quijano-Guauque, N. Molano, G. A. Pineda, y D. J. Marín-Zuluaga, «Vertical root fractures in endodontically-treated teeth: A retrospective analysis of possible risk factors», *J. Investig. Clin. Dent.*, vol. 9, n.o 1, feb. 2018, doi: 10.1111/jicd.12273 (accedido jul. 28 2022).

FISSURE ANALYSIS OF ENDODONTIC TEETH

Author: Arroyo Alonso-Villalobos, Alejandra.

Supervisor: Jiménez Octavio, Jesús Ramón.

Co-Supervisor: Dorado Nuño, Saúl Manuel.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Keywords: finite element analysis, endodontics, dental fissure.

1. Introduction

The endodontic procedure corresponds to a technique by means of which conditions affecting the nerve of the root canals of a tooth are resolved [1].

This procedure consists of four phases: opening the tooth, cleaning and disinfection of the root canals, filling the root canals after the procedure and, finally, obturation, i.e. sealing the dental crown.

This is a technique with which very good results are obtained, achieving a retention rate of 97% [2], but sometimes fissures can occur in the tooth after the treatment.

Within the endodontic procedure, several methods can be distinguished. The best known is the traditional endodontic procedure, but in recent years the minimally invasive endodontic process has started to be implemented. This is a procedure that is very similar to traditional treatment, but faster, more precise and shorter in duration [3].

Endodontic failure occurs when fissures develop in the tooth following endodontic treatment. These can arise due to numerous factors, both external and intrinsic to the tooth itself.

The aim of this research work is to study the risk of cracks in a tooth following a previous endodontic process by means of simulations carried out using the finite element analysis technique, applying different boundary conditions, with the intention of imitating the effect of the tooth inside the jaw, taking into account the chewing force exerted by the teeth directly above it. In this way, and with the aim of simplifying the geometries, the upper

teeth will be replaced by spheres, applying remote forces on them, and different simulations will be carried out using one, two and even three spheres.

There are many possibilities for tooth fracture, but the most common after endodontic treatment is the vertical root fracture (VRF). According to a study published in the Journal of Investigative and Clinical Dentistry, these occur in 2% to 20% of cases [4].

2. Project definition

As mentioned above, this research work aims to analyze the risk of fracture of a tooth in isolation and with the presence of the teeth adjacent to it.

The main study geometry, i.e., the isolated study tooth, corresponds to the left mandibular first molar number 36.

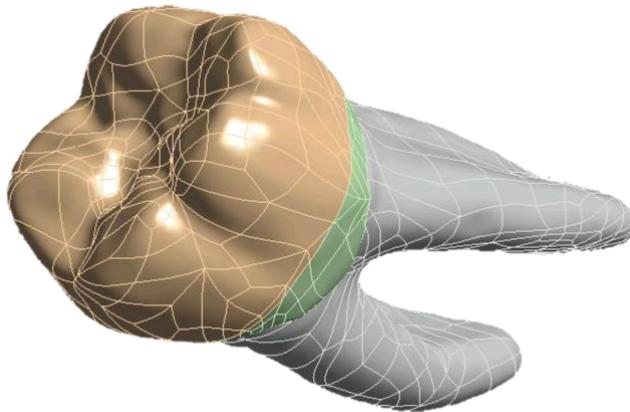


Figure 1. Isolated study geometry

In order to carry out this research properly, the following objectives were proposed. The first is to identify the technical aspects underlying the failure of fissure root canals, the second is to model a tooth using the finite element method, the third is to carry out a load study on an isolated tooth with adjacent teeth using one sphere, and the fourth is to carry out a load study on an isolated tooth with adjacent teeth using two and three spheres.

3. Model description

In order to achieve the objectives proposed above, a total of eight simulations will be carried out using ANSYS engineering software (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pennsylvania, USA). To carry out these simulations, one, two or three spheres will be used, which aim to simplify the geometry so that they simulate the effect of the chewing force exerted by the directly upper teeth on the tooth under study.

A total of four different geometries will be studied. The first one refers to the study tooth alone, the second one with the tooth directly to its right, the third one with the tooth directly to its left and the fourth study geometry corresponds to the main tooth together with both adjacent teeth.

In order to carry out the load tests and prior to the simulations, a meshing of the geometry must be carried out, apart from the previous selection of the mastication force and the materials to be used. After each simulation, the results will be analyzed using the Von Mises and maximum principal stress methods.

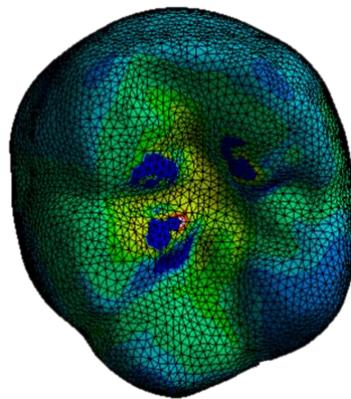


Figure 2. Stress distribution of the isolated tooth

4. Results

As mentioned above, a total of eight simulations were carried out, with one, two and three spheres, the results of which are shown below.

- Simulations with one sphere: after the simulations carried out, it can be seen that the stress distributions obtained coincide with the stress distribution of the test carried out with the isolated tooth. Furthermore, in the simulations carried out with two teeth,

the second and third, very similar maximum and minimum stresses are obtained, while in the fourth simulation, carried out with three teeth, the maximum stress value was approximately half the maximum stress value obtained in the second and third simulations, whose study geometries were composed of only one tooth adjacent to the study tooth. This result is consistent with the fourth simulation being the combination of the second and third simulation. In all simulations with a sphere, vertical fracture can occur if the maximum stresses are exceeded, as originally expected.

- Simulations with two spheres: after the simulations carried out, it can be observed that the stress distributions obtained coincide with the stress distribution of the test carried out with the isolated tooth. The maximum stresses obtained after the tests with two spheres are higher than the maximum stress obtained in the tests with one sphere. As for the minimum stresses, these turn out to be higher in the studies carried out with one sphere than in those carried out with two spheres. After all simulations, vertical fractures can occur if the maximum stresses are exceeded.
- Simulation with three spheres: the stress distribution obtained after this last simulation with three spheres coincides with the stress distribution obtained after the test with the isolated tooth. The maximum stress in the test performed with three spheres, eighth simulation, is slightly higher than that of the test performed with a single sphere, fourth simulation, but of much lower magnitude than that of the test performed with two spheres, seventh simulation. As for the minimum stresses, these turn out to be different when comparing all the simulations carried out with three spheres. In the latter simulation, vertical fracture can also occur if the maximum stress is exceeded.

Figure 2 below shows the results obtained after the first simulation, carried out with the tooth in isolation, in which the shape of the stress distribution with which the other tests were compared can be observed. It should be noted that this stress distribution coincides with that obtained in other studies carried out by other finite element researchers.

5. Conclusions

After carrying out the research, the following conclusions were drawn based on the previously proposed objectives.

The first objective was to identify the technical aspects underlying the failure of fissure endodontics. This is reflected in the first three chapters. In essence, it was found that the dental fissures that occur in teeth after the endodontic process usually consist of VRF (vertical root fracture).

The second objective of this research was to model a tooth using the finite element method. Once the file containing the dental piece under study had been obtained and the assembly of the piece with the sphere had been carried out, the meshing and the choice of both the masticatory force to be applied and the parameters of the materials to be used were carried out. Once all the parameters had been defined, the first simulation was carried out on the tooth isolated with a sphere.

The third objective proposed in this research work consisted of carrying out a load study on an isolated tooth with the presence of adjacent teeth using a sphere. After carrying out the eight simulations, it was observed that the stress distributions coincided with those obtained in the test carried out with the isolated tooth, and therefore the tests carried out were considered to be good.

The fourth objective consisted of carrying out a load study on an isolated tooth and with the presence of adjacent teeth, using two and three spheres. In the latter simulations, as in the previous cases, the stress distributions coincided with the stress distribution obtained when carrying out the load study on the isolated tooth.

As for the differences between carrying out the load study with an isolated tooth and with the presence of the teeth adjacent to it, it can be concluded that the stresses obtained in the tests, in most cases, are different, so that less chewing force is needed to achieve the tooth crack.

With regard to the differences between carrying out the load study with an isolated tooth and with the presence of the teeth adjacent to it, it can be concluded that the stresses obtained in the tests, in most cases, are different, so that less chewing force is needed to achieve tooth fracture.

Among the results obtained, it can be affirmed that the most notable cause of tooth fracture after the endodontic process is due to the filling of root canals with a different material to that of the tooth in question.

Following the analysis, carried out in the third chapter of the articles on load tests carried out by other finite element researchers, it was found that one of the most important

factors to take into account was the direction and position of the load to be applied on the study geometry, but, on the contrary, the magnitude of the force did not affect the stress distribution.

Furthermore, it was found that the stress distribution of the tests carried out in the articles analyzed were similar to those obtained in the simulations carried out in this research, as well as the magnitudes of the maximum and minimum stress values obtained were within the range of values obtained in tests carried out by other researchers.

In conclusion, the simulations carried out throughout this research have demonstrated the veracity of the studies carried out by other finite element researchers, and have contributed to the analysis of the tooth, also taking into account the teeth adjacent to it.

6. Referencias

- [1] Real Academia de la Lengua Española. www.rae.es. <https://dle.rae.es/endodoncia> (accedido ene. 29 2022).
- [2] Y. Zadik, V. Sandler, R. Bechor, y R. Salehrabi, «Analysis of factors related to extraction of endodontically treated teeth», *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology*, vol. 106, n.o 5, pp. e31-e35, nov. 2008, doi: 10.1016/j.tripleo.2008.06.017 (accedido jul. 28 2022).
- [3] A. Anjum y S. Hegde. (2019). «Minimally Invasive Endodontics-A Review» <https://www.semanticscholar.org/paper/Minimally-Invasive-Endodontics-A-Review-AnjumHegde/b904b3e4615325d1ba2a283d4f32fb32d882c442> (accedido ene. 29 2022).
- [4] C. García-Guerrero, C. Parra-Junco, S. Quijano-Guauque, N. Molano, G. A. Pineda, y D. J. Marín-Zuluaga, «Vertical root fractures in endodontically-treated teeth: A retrospective analysis of possible risk factors», *J. Investig. Clin. Dent.*, vol. 9, n.o 1, feb. 2018, doi: 10.1111/jicd.12273 (accedido jul. 28 2022).

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Introducción a las endodoncias dentales	7
1.2 Motivación del proyecto	8
1.3 Objetivos del proyecto	10
1.4 Metodología de trabajo	11
1.5 Recursos necesarios para la realización de la investigación	12
1.5.1 Solid Works	13
1.5.2 ANSYS.....	13
Capítulo 2. BASE TEÓRICA	15
2.1 Tratamiento endodóntico	15
2.2 Estructura de la pieza dental	18
2.3 El fracaso en la endodoncia. Fracturas dentales tras el tratamiento endodóntico	19
2.3.1 Supervivencia de la pieza dental según el tipo de material empleado en la restauración posterior a la endodoncia	20
2.3.2 Tipos de fracturas dentales.	22
2.3.3 Microgrietas	25
2.3.4 Aparición de microgrietas durante el proceso de obturación	27
Capítulo 3. Estado del arte	29
3.1 Brief Communication: Comparing loading scenarios in lower first molar supporting bone structure using 3d finite element analysis, S. Benazzi, 2012.....	30
3.2 Dynamic modelling of tooth deformation using occlusal kinematics and finite element analysis, S. Benazzi, 2016.	33
3.3 Finite element analysis on tooth and periodontal stress under simulated occlusal loads, H. Zhang, 2017.	36

ÍNDICE DE LA MEMORIA

3.4	Finite element modelling of the periodontal ligament under a realistic kinetic loading of the jaw system, A. Karimi, 2019.	38
3.5	Conclusiones generales sobre los artículos	42
Capítulo 4. Modelado y simulación computacional		44
4.1	Modelado de la geometría de estudio en Solid Works.....	44
4.2	Operación geométrica en ANSYS	47
4.2.1	Simulación de la pieza dental de estudio aislada con una esfera.....	47
4.2.2	Simulaciones con la presencia de dientes adyacentes	58
Capítulo 5. Análisis de resultados y discusión.....		63
5.1	Análisis de los resultados obtenidos	63
5.1.1	Resultados obtenidos en los ensayos realizados con una esfera	63
5.1.2	Resultados obtenidos en los ensayos realizados con dos esferas	65
5.1.3	Resultados obtenidos en los ensayos realizados con tres esferas.....	67
5.2	Discusión de los resultados	68
5.2.1	Ensayos realizados con una esfera	68
5.2.2	Ensayos realizados con dos esferas	69
5.2.3	Ensayos realizados con tres esferas.....	70
Capítulo 6. Conclusiones.....		71
6.1	Conclusiones en base a los objetivos propuestos.....	71
6.2	Conclusiones en base al tratamiento de endodoncia	72
6.3	Conclusiones en base a los artículos analizados	73
Capítulo 7. Objetivos de desarrollo sostenible		75
Capítulo 8. Bibliografía.....		76

Índice de figuras

Figura 1. Proceso de endodoncia tradicional.....	14
Figura 2. Composición de una pieza dental.....	18
Figura 3. Fractura dental vertical.....	22
Figura 4. Fractura dental horizontal	22
Figura 5. Posición de la cúspide lingual en una pieza dental	23
Figura 6. Lima K de Nickel-Titanio	24
Figura 7. Lima Protaper.....	25
Figura 8. Lima Wave One	25
Figura 9. Pieza dental primer estudio	29
Figura 10. Resultados primer estudio	31
Figura 11. Pieza dental segundo estudio	32
Figura 12. Zonas de contacto oclusal pieza dental estudio.....	33
Figura 13. Distribución de tensiones segundo estudio	34
Figura 14. Distribución de tensiones tercera simulación.....	36
Figura 15. Pieza dental cuarto estudio.....	37
Figura 16. Contorno del estrés de Von Mises cuarto estudio.....	38
Figura 17. Deformación cuarto estudio	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 18. Diagrama de barras estrés cuarto estudio	40
Figura 19. Posición de la pieza dental de estudio	43
Figura 20. Oclusión del primer molar mandibular	43
Figura 21. Geometría de estudio sin esfera	44
Figura 22. Geometría de estudio con esfera	44
Figura 23. Intersección entre la esfera y el esmalte	46
Figura 24. Intersección entre el esmalte y la dentina	46
Figura 25. Mallado de la geometría de estudio	48
Figura 26. Distribución de tensiones de la malla con menor número de elementos	49
Figura 27. Distribución de tensiones de la malla final	49
Figura 28. Distribución de tensiones de la malla con mayor número de elementos	49
Figura 29. Distribución de tensiones utilizando 50 N	52
Figura 30. Dirección de la fuerza masticatoria	53
Figura 31. Geometría de estudio segunda simulación con una esfera	56
Figura 32. Geometría de estudio tercera simulación con una esfera	57
Figura 33. Geometría de estudio cuarta simulación con una esfera	57
Figura 34. Geometría de estudio quinta simulación con dos esferas	58
Figura 35. Geometría de estudio sexta simulación con dos esferas	58
Figura 36. Geometría de estudio séptima simulación con dos esferas	58
Figura 37. Geometría de estudio octava simulación con tres esferas	59
Figura 38. Distribución de tenciones segunda simulación con una esfera	60
Figura 39. Distribución de tensiones tercera simulación con una esfera	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 40. Distribución de tensiones cuarta simulación con una esfera..... 61

Figura 41. Distribución de tensiones quinta simulación con dos esferas 62

Figura 42. Distribución de tensiones sexta simulación con dos esferas..... 63

Figura 43. Distribución de tensiones séptima simulación con dos esferas..... 63

Figura 44. Distribución de tensiones octava simulación con tres esferas 64

Figura 45. Logo del objetivo de desarrollo sostenible número tres..... 72

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades de los materiales primer estudio	30
Tabla 2. Propiedades de los materiales segundo estudio	33
Tabla 3. Propiedades de los materiales tercer estudio	35
Tabla 4. Propiedades de los materiales cuarto estudio	38
Tabla 5. Parámetros de mallado diente aislado	47
Tabla 6. Comparación de tensiones entre las tres mallas	50
Tabla 7. Parámetros del acero estructural	54
Tabla 8. Parámetros de los materiales de la geometría de estudio	54
Tabla 9. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con una esfera	62
Tabla 10. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con dos esferas	63
Tabla 11. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con tres esferas	64

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN A LAS ENDODONCIAS DENTALES

Se conoce como procedimiento endodóntico al tratamiento, de los conductos radiculares de una pieza dental [1] con el objetivo de solucionar reacciones inflamatorias.

Está compuesto por cuatro fases. La primera consiste en la apertura del diente, la segunda tiene que ver con la limpieza y desinfección de los conductos, en la tercera se procede al rellenado de los conductos, también conocida como fase de obturación y finalmente la cuarta se refiere al sellado de la corona de la pieza dental.

Esta práctica se trata de un tratamiento predecible que cuenta con una tasa de retención de hasta el 97% de los dientes tratados, aunque un pequeño porcentaje (alrededor del 3%), de estos requieren un posterior tratamiento, a veces resultando en la extracción del diente [2].

En los últimos años, se ha empezado a implementar el proceso de endodoncia mínimamente invasiva. Se trata de un procedimiento muy similar al tratamiento de conductos tradicional, pero más rápido preciso y de menor duración. Resulta interesante investigar si existen diferencias significativas entre el proceso de endodoncia tradicional y mínimamente invasiva a la hora de analizar la tasa de supervivencia a fractura de una pieza dental. Entre las ventajas de este procedimiento, destacan el hecho de que ayuda a conservar la estructura del diente (factor importante ya que no precisa de tanta cantidad de material en el proceso de obturación o sellado de los canales radiculares y de la corona), que produce muy poco dolor en el paciente y que reduce el coste de la operación, comparado con un tratamiento de conductos más invasivo [3]. Por otro lado, este proceso endodóntico puede llegar a ocasionar fisuras en el diente, debido a numerosos factores, analizados en profundidad en el segundo capítulo, que pueden estar por un lado directamente relacionados

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

con la fisiología de la pieza dental o pueden ser ocasionados por factores externos, como son las condiciones ambientales de la sala de cirugías o la fuerza que el odontólogo ejerce sobre el diente mientras se encuentra realizando el tratamiento. Otros factores importantes para tener en cuenta a la hora de la realización del proceso de endodoncia tienen que ver con el material que será empleado en la obturación, es decir, el sellado de la corona una vez realizado el tratamiento, o los utensilios y técnicas utilizados en el proceso. Más adelante se analizarán estos factores y se determinará cuál de ellos es significativamente relevante en el proceso.

El objetivo de este trabajo de investigación consiste en estudiar el riesgo de fisura en una pieza dental posterior a un proceso previo de tratamiento de conductos mediante la simulación por elementos finitos, aplicando distintas condiciones de contorno, con la intención de imitar el efecto de la pieza dental en la mandíbula. No se tendrán en cuenta en este proyecto las condiciones relacionadas con los elementos externos, ya que no se pueden estimar con facilidad debido a que incluyen factores relacionados con la destreza del odontólogo especializado que realiza el procedimiento, por lo que el estudio se centrará en demostrar las diferencias que existen al producirse la rotura en un diente aislado o con dientes adyacentes a su alrededor.

Además, se estudiará el efecto de la fuerza masticatoria que ejercen los dientes situados en la parte superior de la mandíbula sobre las piezas dentales de estudio. De este modo y con el objetivo de simplificar las geometrías, se sustituirán las piezas dentales superiores por esferas, aplicando fuerzas remotas sobre ellas, y se realizarán distintas simulaciones empleando una, dos y hasta tres esferas.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La odontología es una rama del campo médico en la que se estudian las afecciones dentales que pueden llegar a producirse con el fin de solucionarlas. El proceso de endodoncia a simple vista puede parecer que solo tiene que ver con esta rama de medicina, pero también

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.***

tiene mucha relación con la resistencia de materiales. Esto es debido a que, una vez realizada la endodoncia en sí, el último paso consiste en la obturación o sellado de los conductos radiculares dentales y de la corona empleando un material determinado previamente por el odontólogo. Cada material tiene su propia resistencia dependiendo de sus características intrínsecas y, según el material elegido, la tasa de supervivencia a fractura de la pieza dental de estudio a lo largo de los años será mayor o menor. De este modo, se puede analizar el riesgo de fisura y las zonas de posible fractura del diente mediante un software informático de ingeniería, aplicando distintos materiales y de esta manera determinar cuál es la mejor opción.

Como se ha comentado en el apartado anterior, a lo largo de los años, se han realizado varios estudios de cargas sobre dientes aislados, con el objetivo de analizar el riesgo de fisura y las zonas de posible fractura de estos. Por el contrario, no existe abundante información con respecto a cómo afectan los dientes adyacentes a la pieza dental de estudio en la tasa de supervivencia a fractura, por lo que resulta interesante realizar una investigación sobre este campo, y compararla con los ensayos ya realizados por otros investigadores de los elementos finitos. Los estudios de cargas realizados por otros investigadores han sido llevados a cabo de manera aislada ya que se considera que no existen diferencias significativas al realizar estos ensayos con la presencia de los dientes adyacentes. Esta investigación pretende analizar si esta teoría es verdad o si realmente existen diferencias significativas.

Resulta interesante, para la realización de las simulaciones, el estudio de la fuerza masticatoria producida por los dientes superiores a la pieza dental de estudio, que ejercen presión sobre el mismo. Esta fuerza es distinta dependiendo de la persona a la que se le realiza el tratamiento de conductos, por lo que se deberán comparar los estudios realizados por otros investigadores y, con esto, determinar la fuerza a utilizar en las simulaciones.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

A continuación, se plantean los objetivos que se desarrollarán durante la realización de este proyecto de investigación.

- **OBJETIVO 1: Identificar los aspectos técnicos que subyacen al fracaso de endodoncias por fisuras.** Búsqueda bibliográfica necesaria para el planteamiento de la investigación. Para la realización del estudio de cargas sobre el primer molar, será necesario realizar una búsqueda sobre las cargas empleadas en otros trabajos de investigación.
- **OBJETIVO 2: Modelar una pieza dental mediante el método de elementos finitos.** Se realizará el mallado del diente y, posteriormente, el ensamblaje entre este y una esfera con el objetivo de simular el efecto que generan los dientes de la parte superior de la mandíbula sobre el primer molar a estudiar. Por último, se llevará a cabo un estudio de cargas utilizando el programa informático ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos).
- **OBJETIVO 3: Realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes empleando una esfera.** Este objetivo se plantea para identificar y analizar cuáles serán las posibles zonas de fisura en el primer molar de estudio, tanto de forma aislada como con la presencia de otras piezas dentales a su alrededor. La esfera empleada tiene como objetivo simplificar la geometría, de manera que la fuerza de masticación ejercida por los dientes superiores se aplica de manera remota sobre la misma. De esta manera, se facilita enormemente la realización de las distintas simulaciones sobre la geometría de estudio.
- **OBJETIVO 4: Realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes, empleando dos y tres esferas.** Una vez realizado el estudio de cargas presentado en el objetivo 3, se realizarán simulaciones con las mismas geometrías previamente definidas, con el diente aislado y con las

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

distintas combinaciones de dientes adyacentes a este, empleando dos y tres esferas de manera que estas simulen el esfuerzo de masticación realizado por las piezas dentales superiores a la de estudio.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La hipótesis de investigación consiste en analizar fisuras en una pieza dental tanto de forma aislada como teniendo en cuenta la presencia de dientes adyacentes a la misma. Para la elaboración de este proyecto, se deberá realizar una búsqueda bibliográfica exhaustiva de estudios realizados por otros investigadores de los elementos finitos en cuanto a fisuras posteriores a la realización de un tratamiento de endodoncia sobre una pieza dental y, en base a este, se definirán las condiciones de contorno y cargas aplicadas sobre la geometría de estudio en las diferentes fases de apertura y mecanizado propias del tratamiento endodóntico.

En primer lugar y una vez realizada la búsqueda bibliográfica, se realizará el modelado computacional de una pieza dental molar obtenida mediante micro-CT y se realizará un estudio de cargas sobre la misma. Previo a la realización de dicho estudio, se definirán las condiciones de contorno, previamente analizadas en la búsqueda bibliográfica, se realizará el diseño de la malla y se decidirá la magnitud de las cargas a aplicar en la pieza de estudio. Esta fuerza se corresponde con el esfuerzo de masticación aplicado sobre el diente de estudio por las piezas dentales superiores al mismo, como se ha comentado anteriormente. Cabe destacar que estos dientes superiores serán sustituidos por esferas con el objetivo de simplificar la geometría y facilitar la obtención de resultados. Se emplearán hasta tres esferas en los ensayos realizados con el programa informático.

Se emplearán cuatro geometrías de estudio distintas. La primera estará compuesta por la pieza dental de estudio aislada, la segunda junto al diente adyacente situado a su derecha, la tercera con el diente adyacente situado a su izquierda y la cuarta estará formada

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

por las tres piezas dentales, es decir, el diente de estudio junto a los dientes adyacentes a ambos lados.

Seguidamente, se llevarán a cabo un total de ocho simulaciones. La primera se realizará con la pieza dental de estudio y una esfera. Las tres siguientes se realizarán con el resto de las geometrías de estudio y una esfera, las tres siguientes se realizarán con las geometrías definidas y dos esferas, y la última se realizará con los tres dientes alineados, es decir, la pieza dental de estudio junto con los dos dientes adyacentes a la misma, empleando tres esferas.

Posteriormente, se analizarán los resultados obtenidos, mediante los métodos de Von-Mises y Rankine (máxima deformación principal), con el fin de medir el estrés y la deformación ocasionados en la pieza dental y comparar el riesgo de fractura de la misma al simular la carga ejercida en el tratamiento de conductos en las distintas simulaciones realizadas.

Por último, se compararán los resultados obtenidos en los ensayos anteriores, prestando especial atención a las diferencias en las distribuciones de tensiones que se perciben, en cuanto a las zonas de posible fisura de la pieza dental, entre los estudios de carga realizados sobre el diente aislado y con la presencia de los dientes adyacentes empleando una, dos y tres esferas. Además, se estudiarán las posibles mejoras aplicables a futuras investigaciones similares.

1.5 RECURSOS NECESARIOS PARA LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

En este trabajo de investigación, se utilizarán los softwares de simulación de ingeniería Solid Works (Solid Works 2022 SP2, Dassault Systems, Véliz-Villacoublay, Francia) y ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos).

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

1.5.1 SOLID WORKS

Este software de ingeniería, líder en el sector, se emplea en la elaboración de geometrías, simples o complejas, para su posterior estudio. Algunas de las industrias en las que se utiliza este software son las de aeroespacial y defensa, energía y materiales, construcción y naval, entre muchas otras. Aparte de ser un programa muy utilizado por empresas y particulares, está muy extendido en el ámbito académico ofreciendo licencias para estudiantes y profesores [5].

Cuenta con tres disciplinas de trabajo: CAD 2D, CAD 3D y 3DEXPERIENCE Works. El CAD 2D aporta las oportunidades que ofrece AUTOCAD, pero con un precio más económico, el CAD 3D permite al usuario realizar diseños en formato 3D y el 3DEXPERIENCE Works permite a las empresas o particulares la conexión en tiempo real de todos los aspectos de su negocio con el fin de conseguir una mejora en la productividad, aumentar la colaboración y acelerar la innovación. Para la realización de la investigación, se empleó el Solid Works CAD 3D (Solid Works 2022 SP2, Dassault Systems, Véliz-Villacoublay, Francia) [5].

1.5.2 ANSYS

Este programa tiene la capacidad de predecir si funcionarán o no los objetos de estudio en la realidad, a partir de la simulación computacional.

Este programa cuenta con gran cantidad de sistemas específicos de análisis de flujos, como “Random Vibration”, “Static Structural” o “Fluid Flow (Fluent)”. Para la realización de los ensayos de cargas necesarios para el desarrollo de esta investigación, se utilizará el sistema de análisis “Static Structural” ya que permite el análisis estático de la geometría de estudio.

Con este sistema se consigue la realización de una serie de simulaciones sobre la pieza dental de estudio, simulando el esfuerzo de masticación ejercido por los dientes maxilares directamente superiores a la misma. Para la realización de estos ensayos, el

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.***

programa permite la elección de las condiciones de contorno deseadas, el diseño exhaustivo de la malla y, a su vez, permite la aplicación de distintos tipos de cargas sobre la pieza. Además, este programa aporta numerosas formas de análisis de resultados, como la medida de estrés y deformación por el método de Von-Mises o Rankine [7].

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Capítulo 2. BASE TEÓRICA

2.1 TRATAMIENTO ENDODÓNTICO

El procedimiento de endodoncia de una pieza dental consiste en un tratamiento predecible que se emplea como último recurso a una afección en el nervio dental con el objetivo de evitar la extracción del diente.

En la Figura 1 se pueden observar los pasos a seguir durante el procedimiento de endodoncia tradicional, proceso que culmina con el rellenado de los conductos dentales mediante un material de previa elección y el fijado de la corona de la pieza dental afectada.

La primera fase se corresponde con la apertura del diente, que consiste en la perforación de la pieza dental con el objetivo de visualizar los conductos radiculares. La segunda fase es la de limpieza y desinfección de los conductos una vez matado el nervio dental. Seguidamente se procede al rellenado de dichos conductos previamente perforados con el material elegido por el especialista y, por último, se procede al fijado de la corona de la pieza dental.



Figura 1. Proceso de endodoncia tradicional [8]

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Existen tres tipos de procesos de endodoncia dependiendo del número de conductos radiculares que la pieza dental en cuestión presente. Según la anatomía del diente sobre el que se va a practicar la endodoncia, este presentará un mayor o menor número de conductos, de modo que para la completa localización de todos ellos, el odontólogo deberá emplear las técnicas más adecuadas [9].

Las endodoncias unirradiculares son aquellas en las que el diente sobre el que se va a realizar el tratamiento presenta solamente un conducto radicular y por tanto una sola raíz: incisivos centrales, incisivos laterales, caninos tanto superiores como inferiores y primeros y segundos premolares inferiores. Por otro lado, las endodoncias birradiculares se corresponden con aquellas en las que la pieza dental expuesta al tratamiento presenta dos conductos radiculares: los molares inferiores en su raíz mesial y los segundos premolares superiores que, aunque solo estén formados por una raíz, es común en ellos la presencia de dos conductos radiculares. El último tipo se corresponde con las endodoncias multirradiculares, realizadas sobre piezas dentales que están compuestas por tres o más conductos radiculares: molares superiores [9].

Aunque este procedimiento de endodoncia cuenta con una tasa de retención del 97%, durante el proceso el dentista procede a taladrar la pieza dental en cuestión con el objetivo de matar el nervio, lo que puede llegar a provocar la posterior fractura del diente entorno a un 3% de los casos [2].

Algunas de las causas más comunes de realización de la endodoncia se corresponden con dientes diagnosticados con pulpitis irreversible o periodontitis apical. Este proceso puede llegar a producir debilitamiento del diente debido a la pérdida de la dureza dental, haciendo los dientes más propensos a fracturarse [3].

El tratamiento de conductos tradicional cuenta con una gran tasa de éxito, como se ha mencionado anteriormente, pero no siempre se consigue el resultado esperado. Estas piezas dentales pueden llegar a fracturar hasta años después del tratamiento endodóntico debido al debilitamiento del diente ocasionado bien por el propio dentista durante la

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

realización del tratamiento, por el material aportado en el proceso de endodoncia o bien por causas intrínsecas a dicha pieza dental.

En los últimos años, se ha procedido a implementar el proceso de endodoncia mínimamente invasivo, que ha supuesto una reducción en la tasa de fractura de los dientes, ya que resulta un tratamiento más conservador eliminando menor cantidad de tejido duro que mediante el proceso de endodoncia tradicional. De este modo, mientras que en el tratamiento de endodoncia tradicional se eliminan la pulpa y los canales dentales con el objetivo de alcanzar el nervio y, de este modo, detener la infección, situación que implica el posterior rellenado de los conductos de un material previamente definido, mediante la técnica mínimamente invasiva se consigue mantener la fisiología de la pieza dental en cuestión al no ser necesaria la eliminación de tanto tejido dental [3].

Entre las ventajas que se observan al realizar este tipo de procedimiento mínimamente invasivo, destacan la conservación de la estructura del diente, la simplificación de los procedimientos de tratamiento, que supone un coste más reducido y menor molestia para el paciente en comparación con el proceso tradicional de endodoncia [3].

Existen varias soluciones a la afeción del nervio dental, entre las que destacan el tratamiento de endodoncia y la restauración de la pieza dental. Aunque ambos procedimientos resultan en una pérdida de rigidez del diente en cuestión un estudio publicado por el “Journal of Endodontics” [10], en el que se compararon ambos procedimientos con la pérdida de fuerza de la pieza dental, destaca que los procedimientos de endodoncia redujeron la rigidez dental en solo un 5%, debido a la apertura del canal, mientras que los procedimientos de restauración supusieron una reducción de rigidez en mucha mayor medida, del 60%. De este modo, en cuanto a la pérdida de rigidez dental, el tratamiento endodóntico resulta la mejor opción a elegir.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

2.2 ESTRUCTURA DE LA PIEZA DENTAL

Existen distintos tipos de piezas dentales según la posición en la mandíbula, pero todas ellas están formadas por dos partes principales: corona y raíz. La corona se corresponde con la parte superior del diente. Esta está formada por el esmalte, parte de la dentina y la pulpa. La raíz está formada por los conductos radiculares, el ligamento periodontal y la dentina.

Para la investigación, se tendrán en cuenta el esmalte, la dentina y los conductos radiculares.

- **Esmalte:** se corresponde con la parte de la pieza dental que es de color blanco y se percibe a simple vista al abrir la boca.
- **Dentina:** es la parte del diente que se encuentra enterrada en las encías y, por lo tanto, no es posible su visualización sin la extracción de la pieza dental en cuestión.
- **Conductos radiculares:** estos se corresponden con los conductos interiores a la dentina, dentro de los cuales se encuentran los nervios de la pieza dental estudiada.

El ligamento periodontal no es de gran importancia en el estudio ya que su grosor es lo suficientemente pequeño como para que no sea relevante a la hora de realizar los ensayos. La cámara pulpar, al estar contenida en la dentina, no es de relevancia para el estudio de cargas que se pretende realizar.

A continuación, en la Figura 2, se encuentra esquematizada una pieza dental en la que se pueden observar las partes anteriormente mencionadas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

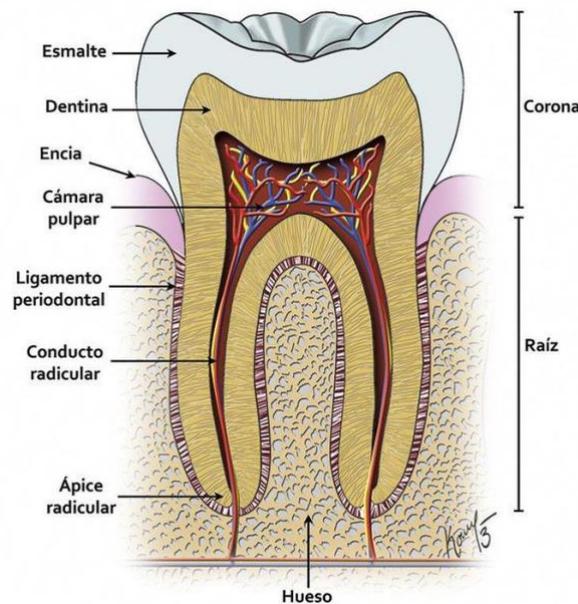


Figura 2. Composición de una pieza dental [11]

2.3 EL FRACASO EN LA ENDODONCIA. FRACTURAS DENTALES TRAS EL TRATAMIENTO ENDODÓNTICO

Tanto en el caso de la realización de un tratamiento endodóntico tradicional como mínimamente invasivo, uno de los factores más importantes para tener en cuenta en el proceso de endodoncia es la integridad estructural de la pieza dental en tratamiento, ya que se encuentra directamente relacionada con la tasa de supervivencia de esta. Por este motivo, el mantenimiento de la resistencia y la rigidez de la pieza dental se consideran los factores más importantes en los procesos restaurativos dentales, en concreto en el tratamiento de conductos [3].

El fracaso en la endodoncia suele ser producido por una pérdida de rigidez del diente, lo que resulta en la fractura de este. Estas fisuras se pueden llegar a producir años después

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

del tratamiento endodóntico, y pueden ser debidas tanto a factores externos al paciente, como son la precisión del dentista o las condiciones de la operación, o pueden estar relacionadas con factores intrínsecos de la pieza dental en tratamiento [12].

Según un estudio realizado en Dinamarca por el “Institute of Dental Materials and Technology” [12], en el que se evaluó el patrón de fractura de 1.639 dientes endodonciados, el 28% de estos se fracturaron después de 3 años, el 57% 10 años más tarde y el 73% después de 20 años. Estas estadísticas muestran que la mayor parte de las piezas dentales que sufren debilitamiento posterior a el tratamiento de conductos terminan fracturando pasados al menos 10 años.

Por otro lado, en un estudio retrospectivo [13] se comprobó que el 94% de las piezas dentales fracturadas de raíz presentaban antecedentes de tratamiento endodóntico. Este análisis resulta interesante para reafirmar la importancia del estudio de las fracturas ocasionadas en los dientes posteriores a un tratamiento endodóntico.

2.3.1 SUPERVIVENCIA DE LA PIEZA DENTAL SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL EMPLEADO EN LA RESTAURACIÓN POSTERIOR A LA ENDODONCIA

Los dientes que presentan antecedentes de tratamiento de endodoncia son susceptibles a la aparición de fracturas en la cúspide. En este apartado, se pretende comparar si este porcentaje de fractura es mayor en piezas dentales previamente tratadas con endodoncia o, por el contrario, resulta mayor en dientes en los que se ha practicado otro tipo de tratamiento. Además, se compararán las tasas de supervivencia de las piezas dentales según el tipo de material utilizado en la restauración.

Los resultados de estudio realizado en Holanda, sobre el riesgo de fracturas dentales posterior a la realización de un tratamiento dental general [14], revelan que la tasa de incidencia de fracturas de cúspide es de 20,5 por cada 1000 habitantes con riesgo de fractura dental. Además, el mismo estudio indica que la causa de fractura más frecuente fue la masticación, con un 54% de personas que sufrieron fracturas dentales.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Por otro lado, un estudio retrospectivo publicado por la revista “Restorative Dentistry & Endodontics” [15] en el que se estudió la supervivencia a fractura en piezas dentales tratadas previamente con endodoncia restaurados con composite o con corona. Los resultados de este estudio afirman que la tasa de supervivencia global, tanto para dientes endodonciados restaurados con composite como con corona, fue del 87%. La tasa de supervivencia para piezas dentales tratadas con endodoncia y restauradas con composite fue superior a la restaurada con corona en el corto plazo (12-24 meses), 97,6% y 83,7% respectivamente, reflejando una diferencia significativa al ser el p-valor menor del 5%, pero no en el largo plazo (más de 24 meses), siendo estas tasas de 87,8% y 79,5%. De este estudio se concluye que existen diferencias significativas entre la restauración con composite y con corona de piezas dentales con previo tratamiento endodóntico en el corto plazo, pero una vez superados los dos años desde el tratamiento no existen grandes diferencias entre ambos métodos de restauración.

Tras el tratamiento endodóntico, resulta conveniente la restauración mediante corona, pero esto no resulta posible para algunas piezas dentales. Un estudio retrospectivo, publicado por el “Journal of Prosthetic Dentistry” [17], investigó la tasa de supervivencia en el largo plazo de piezas dentales previamente tratadas con endodoncia en las que no se pudo realizar una cobertura de corona. Los resultados de este estudio reflejan que las tasas generales de supervivencia tras uno, dos y cinco años del tratamiento fueron del 96%, 88% y 36% respectivamente. De este modo, se puede observar que a medida que pasan los años los años, estas piezas dentales presentan mayor riesgo a fractura.

Comparando los estudios mencionados anteriormente, se puede concluir que el tipo de restauración empleada tras el tratamiento endodóntico afecta significativamente a la tasa de supervivencia de la pieza dental, de modo que esta aumenta al emplear una restauración dental por composite en vez de con corona.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

2.3.2 TIPOS DE FRACTURAS DENTALES.

Existen varios tipos de fracturas dentales, clasificadas según las partes del diente afectadas. Dentro de los más comunes destacan al siguientes [17].

- Fisura del esmalte: se produce, como su nombre indica, cuando se rompe parte del esmalte de la pieza dental. En este caso, no se llega a producir fractura del diente y es de fácil tratamiento.
- Fractura coronaria sin afección de la pulpa: producida al fracturarse la corona, pero esta no llega a afectar a la cámara pulpar. Este tipo de fractura, también conocida como fractura simple, suele ser tratada mediante la reconstrucción dental, sin necesidad de la realización de un tratamiento de endodoncia.
- Fractura coronaria con impacto pulpar: este tipo de fractura, al contrario que el anterior, si afecta a la cámara pulpar. Este tipo de fractura se conoce también como fractura compleja, ya que también afecta al nervio, y, de este modo, será necesaria la realización de un tratamiento de endodoncia.
- Fractura radicular intraalveolar: es el tipo de fractura dental de mayor gravedad, ya que afecta a la propia raíz del de la pieza dental dañada. La mayoría de los dientes afectados por este tipo de fractura tienen que ser extraídos ya que han sufrido demasiado daño.
- Fractura corono-radicular: este tipo de fractura se corresponde con una combinación de las anteriores, produciéndose fractura tanto coronaria como radicular.

En esta investigación, se presentará atención a las fracturas dentales producidas tras el proceso de endodoncia. Entre ellas, destaca la fractura radicular vertical, conocida con las siglas VRF “vertical root fracture”. Esta consiste en la fractura de la pieza dental afectando tanto a la corona como a la raíz. Se denomina como vertical ya que rompe el diente según se muestra en la Figura 3. Por el contrario, una fractura horizontal rompería la pieza dental como se muestra en la Figura 4.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

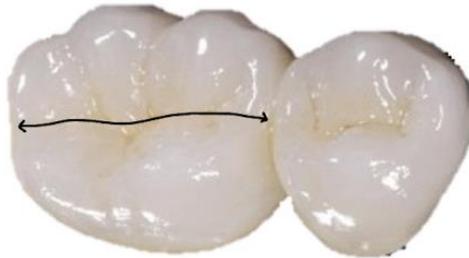


Figura 3. Fractura dental vertical [18]

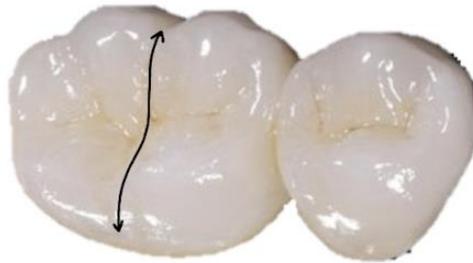


Figura 4. Fractura dental horizontal [18]

Como se puede observar la línea de fractura vertical y horizontal se produce según se muestra en las Figuras 3 y 4.

A continuación, en el siguiente apartado, se evalúa la relación que existe entre las VRF y las fracturas posteriores al proceso de endodoncia.

2.3.2.1 VRF (Vertical root fracture), estructura residual coronaria y restauración (comparación, cual es mejor, etc.)

Como se ha comentado anteriormente, las fracturas verticales radiculares son comúnmente producidas después de un tratamiento de endodoncia. Según un estudio

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

publicado por el “Journal of Investigative and Clinical Dentistry” [13] estas aparecen entre el 2% y el 20% de los casos.

Un estudio retrospectivo [12], publicado por la revista “Dental Traumatology”, evaluó el patrón de fractura de piezas dentales tratadas previamente con endodoncia. Se descubrió que, generalmente, la cúspide más propensa a la fractura era la lingual, es decir, la zona de la corona directamente en contacto con la lengua. En la Figura 5, se puede observar la cúspide lingual de una pieza dental, que se corresponde con la mitad del diente que se encuentra más próxima a la lengua.

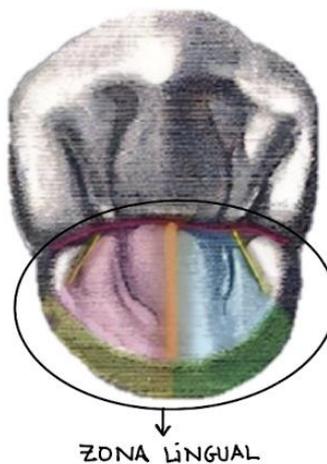


Figura 5. Posición de la cúspide lingual en una pieza dental [19]

Por otro lado, en ese mismo estudio [12] se descubrió que las fracturas en la cúspide lingual provocaban un daño significativamente mayor en los tejidos periodontales que las fracturas parciales o totales de la corona.

La revista “Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology” publicó un artículo que pretendía analizar los factores relacionados con la extracción de dientes tratados con tratamiento endodóntico [2]. Según este estudio, la VRF

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

fue más común en los primeros molares mandibulares que en los primeros molares maxilares. Además, el fracaso endodóntico y las VRF se produjeron con mayor frecuencia en piezas dentales que han sido restauradas que en las no restauradas. Los dientes que tuvieron que ser extraídos fueron en mayor medida los que presentaban caries, aunque también se extrajeron dientes a causa de fallo en el tratamiento de endodoncia.

En cuanto a la prevalencia de VRF en piezas dentales extraídas posteriormente al tratamiento de endodoncia, el “International Endodontic Journal” publicó un artículo [17] en que se concluyó que las principales razones de la extracción de estas piezas dentales fueron un fallo en la restauración en un 43,5%, un fallo en el propio tratamiento de endodoncia en un 21,1% y por la VRF en un 10,9%. De este modo, se puede concluir que el tratamiento de endodoncia resulta de gran utilidad para tratar la infección del nervio y, además, el porcentaje de extracción por fallo no es significativamente grande comparado con porcentaje de extracción por fallo en la restauración.

2.3.3 MICROGRIETAS

Las VRF, como se ha mencionado en el apartado anterior, son comúnmente el tipo de fractura que se produce tras un tratamiento de endodoncia sobre una pieza dental, pero también pueden llegar a aparecer microfisuras, es decir, pequeñas grietas en los conductos radiculares del diente.

Durante el proceso de endodoncia, se utilizan limas para agrandar los conductos radiculares de la pieza dental, una vez desbridados, para facilitar el proceso de obturación. Un artículo publicado por el “International Endodontic Journal” [20] compara el efecto de utilizar un tipo de lima u otra con respecto a la formación de microfisuras en los conductos radiculares de la pieza dental. Los distintos tipos de limas estudiados fueron lima K de Nickel-Titanio, lima Protaper y lima Wave One. En las Figuras 6, 7 y 8 se pueden observar los distintos tipos de limas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.



Figura 6. Lima K de Nickel-Titanio [21]



Figura 7. Lima Protaper [22]



Figura 8. Lima Wave One [23]

En los resultados del estudio [20], se comprobó como existe una diferencia muy significativa, con p-valor menor del 1%, entre utilizar los distintos tipos de limas mencionados anteriormente. Mientras que la utilización de la lima K de Nickel-Titanio no está relacionada con la aparición de microfisuras, las limas Protaper y Wave One producen una gran cantidad de microfisuras. Cabe destacar que entre estas dos últimas no se observan diferencias significativas frente a la aparición de microfisuras en la pieza dental.

Otro artículo, esta vez publicado por la revista “Clinical Oral Investigations” [24], comparó, como en el caso anterior, el efecto que tiene emplear un tipo u otro de lima ante la formación de microfisuras en los conductos radiculares de la pieza dental estudiada. Se compararon los tres tipos de lima mencionados en el estudio anterior, observables en las Figuras 6, 7 y 8. En este caso, las microfisuras aparecieron en el 30% y 20% de los conductos radiculares de la dentina de la pieza dental empleando las limas Protaper y WaveOne, respectivamente, pero, por el contrario, no hubo presencia de microfisuras en las piezas

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

dentales tratadas con la lima tipo K, con porcentaje de aparición de microgrietas situado en el 5%.

El “Journal of Endodontics” publicó otro artículo sobre el empleo de las limas anteriormente mencionadas en el proceso de endodoncia frente a la aparición de microfisuras en la pieza dental [25]. En este caso, se compararon las limas Protaper Next sistema, Protaper Universal y Wave One. Se concluyó que la lima Protaper Next system fue la que menor porcentaje de microgrietas produjo en la pieza dental, con diferencias significativas frente a los otros dos tipos de limas mencionados, con p-valor menor del 5%.

Comparando los artículos anteriormente mencionados, se puede concluir que la elección de la lima a utilizar por el odontólogo resulta de gran importancia frente a la aparición de microfisuras en el diente tratado con endodoncia, que posteriormente puede llegar a ocasionar una VRF.

2.3.4 APARICIÓN DE MICROGRIETAS DURANTE EL PROCESO DE OBTURACIÓN

El último paso para culminar el proceso de endodoncia sobre la pieza dental se corresponde con la obturación. Según la Real Academia de la Lengua Española [26], se define obturar como “tapar o cerrar una abertura o conducto introduciendo o aplicando un cuerpo”. De este modo, el proceso de obturación coincide con el relleno final con el material elegido con el fin de sellar la pieza dental tras el proceso de endodoncia.

Estos conductos radiculares se pueden rellenar de gran cantidad de materiales, de elección por el odontólogo previamente a la endodoncia, y según el material elegido la pieza dental en cuestión tendrá más o menos resistencia a fractura en el futuro. Además, existen distintas técnicas de obturación de los canales radiculares, como la condensación lateral fría, condensación vertical cálida y técnicas de gutapercha inyectables utilizando tomografía micro computarizada.

En un estudio publicado por el “Journal of Conservative Dentistry” [27], se evaluó la formación de microfisuras, en la parte de la dentina que está situada en la zona radicular

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

de la pieza dental, tras la obturación de los conductos radiculares con las diferentes técnicas mencionadas anteriormente. Entre los resultados obtenidos, destaca la identificación de un aumento del 1,66% en las microgrietas producidas en los conductos radiculares empleando la técnica de obturación de condensación lateral. Por el contrario, empleando las técnicas de gutapercha vertical o inyectable no se registraron diferencias significativas en el porcentaje de microgrietas obtenido después del proceso de obturación, siendo el p-valor mayor del 5%.

Por otro lado, un artículo publicado por el “International Endodontic Journal” [28] evaluó, como en el caso anteriormente comentado, la formación de microfisuras en los conductos radiculares de la pieza dental tras el procedimiento de obturación, pero en este caso las técnicas comparadas fueron la técnica de GuttaCore (GC), la técnica de comparación lateral en frío (CLC) y la técnica de compactación vertical en caliente (WVC). Los resultados de este estudio mostraron que, en general, el 30,75% de las piezas dentales estudiadas presentaron microfisuras posteriormente al proceso de obturación. En cuanto al empleo de las distintas técnicas mencionadas, el porcentaje de microfisura empleando GC, CLC y WVC fue del 16,68%, 15,99% y 11,34%, respectivamente. Como se puede apreciar comparando los porcentajes, la mayor tasa de aparición de microfisura se produce empleando la técnica de GuttaCore y, así mismo, el menor se produce empleando la técnica de compactación en caliente. De este modo, se puede observar que el empleo de las distintas técnicas de obturación no presenta diferencias significativas en la aparición de microfisuras en los conductos radiculares de la pieza dental.

Comparando los dos artículos mencionados, se puede concluir que el empleo de cualquiera las técnicas de obturación mencionadas anteriormente no suponen diferencias significativas en la aparición o propagación de microfisuras en los conductos radiculares de la pieza dental.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

Capítulo 3. ESTADO DEL ARTE

Los artículos encontrados [29-32] que estudian las fracturas en dientes tras un procedimiento de tratamiento de conductos se analizan en base a una muestra, que suele abarcar entre 100-1000 casos. En estos estudios se realizaron ensayos de carga sobre una pieza dental aislada, y se analizaron los resultados en base a los datos obtenidos de otros estudios similares.

La técnica más utilizada para la realización de los estudios de cargas entre los investigadores se corresponde con el análisis de elementos finitos, conocido como FEA (finite element análisis). Este método se emplea con el objetivo de evaluar las distribuciones de tensión y deformación en las piezas dentales [29].

Hasta la fecha se han realizado estudios de cargas sobre piezas dentales aisladas, pero no se ha llegado a investigar la influencia que ejercen los dientes adyacentes sobre el diente de estudio, es decir, si estudiar el caso aislado se asemeja suficientemente a la realidad o si analizar la pieza dental teniendo en consideración la presencia de los dientes adyacentes modifica significativamente los ensayos de rotura de esta. Se entiende por dientes adyacentes aquellos que se encuentran directamente adheridos a la pieza dental de estudio, tanto a la derecha como a la izquierda.

El objetivo de este capítulo es revisar las cargas aplicadas en estudios previos al ámbito dental, que se corresponde con el primer objetivo del trabajo de investigación. Para ello, se abordarán a continuación cuatro estudios, llevados a cabo por otros investigadores, publicados en distintas revistas científicas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

3.1 BRIEF COMMUNICATION: COMPARING LOADING SCENARIOS IN LOWER FIRST MOLAR SUPPORTING BONE STRUCTURE USING 3D FINITE ELEMENT ANALYSIS, S. BENAZZI, 2012.

Un estudio publicado en el “American Journal of Physical Anthropology” [29], analiza la distribución de tensiones de la estructura ósea del primer molar inferior mediante la técnica de análisis de elementos finitos. Cabe destacar que, al igual que en la pieza dental analizada en esta investigación, el primer molar inferior analizado en el estudio presentaba oclusión. En la Figura 9, se puede observar la pieza dental estudiada en este ensayo.

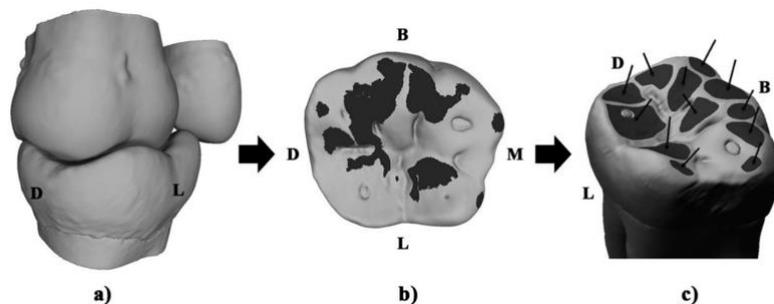


Figura 9. Pieza dental primer estudio [29]

En la parte a) de la Figura 9 se aprecia el máximo contacto entre el diente estudiado y los antagonistas, en la parte b) se aprecian los contactos producidos por la oclusión, marcados en color gris oscuro, y en la parte c) se pueden observar los vectores normales a las distintas zonas de contacto [29].

Una vez realizado el mallado de dicha pieza dental, se procedió a la elección de los materiales a emplear en el estudio de cargas. En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros necesarios para el estudio (módulo de elasticidad y coeficiente de poisson).

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Material	Módulo de Young (Gpa)	Coefficiente de Poisson
Esmalte	8,4100E+01	3,000E-01
Dentina	1,8600E+01	3,100E-01

Tabla 1. Propiedades de los materiales primer estudio [29]

Se estudiaron dos casos distintos:

- Primer caso: carga situada en la cuenca oclusal de la pieza de estudio.
- Segundo caso: máximo contacto de intercuspidadón, es decir, posición en la que las piezas dentales presentan mayor contacto oclusal.

Finalmente, se procedió a la realización del estudio de cargas y se obtuvieron los siguientes resultados [29].

- En el primer caso de estudio, la carga es transferida directamente del molar superior a la parte inferior del mandibular, y no afecta de manera considerable a la boca.
- En el segundo caso de estudio, las tensiones a tracción obtenidas aumentaron con respecto al primer caso de estudio. Cabe destacar como las tensiones a tracción se encuentran situadas tanto en el tercio superior medio como en el distal de la mandíbula, mientras que las tensiones a compresión se sitúan en el cuerpo medio y, principalmente, en la superficie mediolingual de la boca.

Los resultados comentados se encuentran representados en la Figura 10, donde aparecen representadas las distribuciones de tensiones en ambos ensayos según el método de Von Mises.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

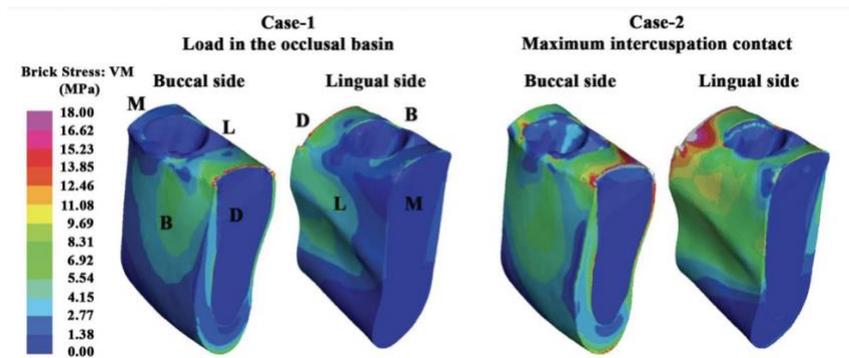


Figura 10. Resultados primer estudio [29]

Tras el análisis de resultados, posterior a la realización del análisis de elementos finitos, destacan las siguientes conclusiones [29].

- Mientras que en los estudios realizados anteriormente por otros investigadores la carga se situaba en el centro de la cuenca oclusal de la pieza dental de estudio, como se analiza en el primer caso, se demostró que existen diferencias significativas en comparación con el segundo caso de estudio.
- La dirección y la posición de la carga afectan considerablemente a las distribuciones de tensiones, mientras que la magnitud de la fuerza no afecta.
- Se obtuvieron distintas distribuciones de tensiones aplicando la fuerza según los casos primero y segundo.
- La distribución de tensiones del primer caso de estudio coincide con la distribución de tensiones obtenida por otros investigadores.
- Se determinó que las áreas de contacto oclusal deben ser consideradas en su totalidad, ya que se conseguirían resultados inexactos de no ser así.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

3.2 DYNAMIC MODELLING OF TOOTH DEFORMATION USING OCCLUSAL KINEMATICS AND FINITE ELEMENT ANALYSIS, S. BENAZZI, 2016.

Otro estudio publicado por la revista “PLOS ONE” [30], emplea también la técnica de análisis de elementos finitos con el objetivo de demostrar como aplicando condiciones de carga poco realistas puede afectar en gran consideración a la distribución de tensiones final obtenida. En este caso, la pieza dental de estudio se corresponde con el primer molar inferior derecho (M1) y, al igual que en la investigación que se está llevando a cabo, presenta oclusión. En la Figura 11, se puede observar la oclusión entre la pieza dental estudiada y el primer molar superior derecho.

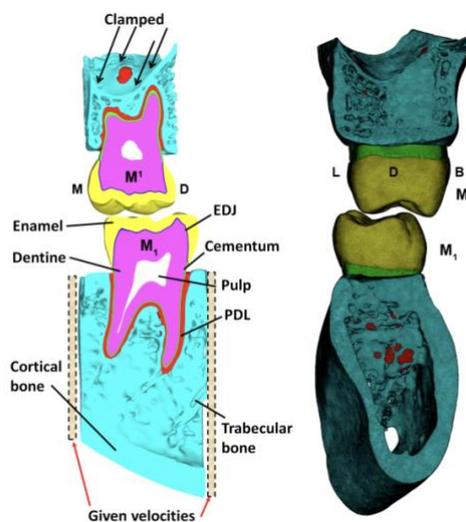


Figura 11. Pieza dental segundo estudio [30]

En cuanto a las zonas de contacto oclusal, en la parte a) de la Figura 12 aparecen representadas en color rojo. A su vez, en la parte b) de dicha figura, se muestra la dirección y el ángulo de la fuerza de masticación.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

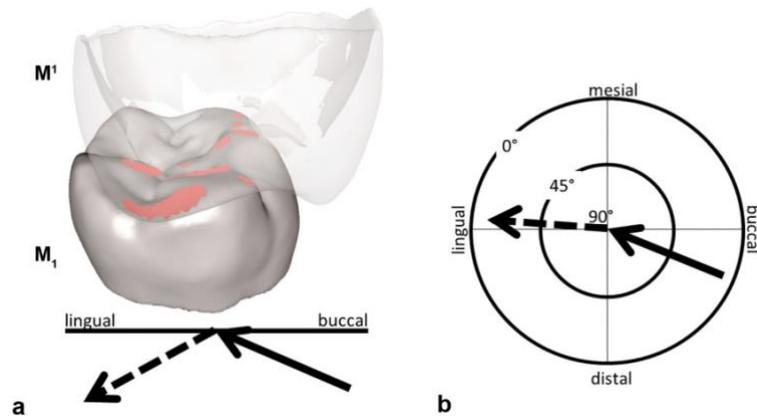


Figura 12. Zonas de contacto oclusal pieza dental segundo estudio [30]

El siguiente paso, una vez realizado el mallado de dicho molar, fue la elección de los materiales a utilizar en el estudio de cargas. En la Tabla 2 se observan el módulo de elasticidad y el coeficiente de poisson de dichos materiales, parámetros importantes para la realización del estudio.

Material	Módulo de Young (Gpa)	Coefficiente de Poisson
Esmalte	84,10	0,30
Dentina	24,50	0,31

Tabla 2. Propiedades de los materiales segundo estudio [30]

Finalmente, tras la realización del estudio de cargas se obtuvieron los siguientes resultados [30].

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- La máxima fuerza de contacto obtenida tras el análisis fue de 923 N. Esta magnitud de la fuerza se alcanza durante el máximo contacto de intercuspidadación.
- Las distribuciones de tensiones entre los ensayos realizados con las dos piezas dentales antagonistas coinciden.

En la Figura 13, aparecen representadas las distribuciones de tensiones del esmalte de la pieza dental en distintos momentos de la simulación. La parte a) se corresponde con 0,335s, la parte b) con 0,375s, la parte c) con 0,394s y la parte d) con 0,425s.

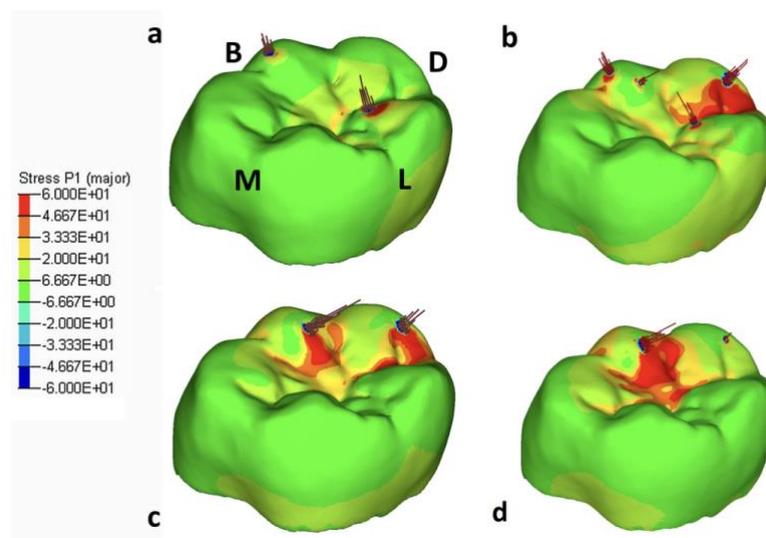


Figura 13. Distribución de tensiones segundo estudio [30]

Tras el análisis de los resultados, se destacaron las siguientes conclusiones a cerca del análisis de elementos finitos llevado a cabo [30].

- La máxima fuerza registrada de masticación se encuentra dentro de los valores obtenidos en ensayos realizados por otros investigadores.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- Las distribuciones de tensiones obtenidas en los ensayos realizados son coinciden con las obtenidas por otros investigadores.

3.3 FINITE ELEMENT ANALYSIS ON TOOTH AND PERIODONTAL STRESS UNDER SIMULATED OCCLUSAL LOADS, H. ZHANG, 2017.

Un tercer estudio publicado en el “Journal of Oral Rehabilitation” [31], analiza el estrés producido en una pieza dental provocado por el contacto de oclusión durante el proceso de masticación mediante la técnica de análisis de elementos finitos. En este estudio, la pieza dental de estudio consiste en el primer molar mandibular derecho y también presentaba oclusión.

Posteriormente, se realizó el mallado de la geometría y se procedió a la elección de los materiales, cuyos parámetros relevantes (módulo de elasticidad y coeficiente de poisson) se muestran a continuación en la Tabla 3.

Material	Módulo de Young (Gpa)	Coefficiente de Poisson
Esmalte	84,10	0,30
Dentina	18,60	0,31

Tabla 3. Propiedades de los materiales tercer estudio [31]

Una vez realizado el análisis de elementos finitos y llevado a cabo el estudio de cargas, se obtuvieron los siguientes resultados [31].

- En general, los valores de magnitud de tensión obtenidos tras el análisis fueron menores en las zonas internas de la pieza dental de estudio que en las zonas externas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- Al aumentar la profundidad, la magnitud de la tensión obtenida se redujo.
- El valor de la magnitud de la tensión obtenida en la dentina fue menor que el valor obtenido en el esmalte.
- Cuanto más cerca del centro de la pieza dental apuntara la dirección de la carga aplicada, menor tensión en la parte interior dental se obtenía comparada con la parte exterior del diente.

A continuación, en la Figura 14 se muestra la distribución de tensiones de la pieza dental sometida a una carga vertical en un solo plano triangular. A la izquierda se observa el diente partido por la mitad con el objetivo de apreciar dicha distribución de tensiones en la parte interior del esmalte.

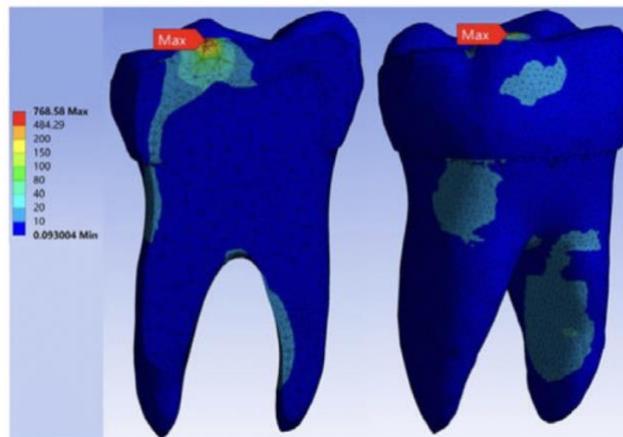


Figura 14. Distribución de tensiones tercera simulación [31]

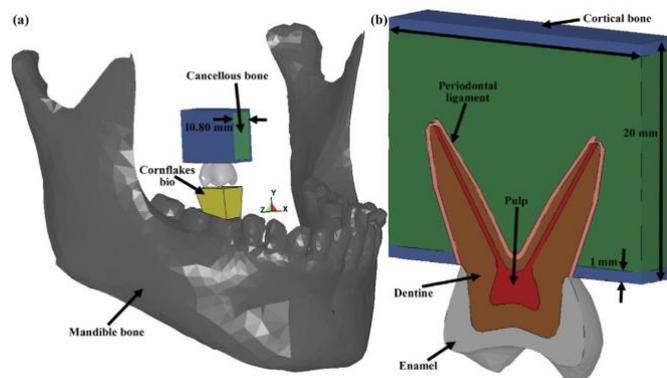
Finalmente, tras el análisis de los resultados, en este estudio se presentaron las siguientes conclusiones [31].

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- La dirección y la posición en la que se coloca la carga aplicada son factores muy importantes ya que afectan en gran medida a la distribución de tensiones que se obtiene tras la realización de los ensayos.
- Las distribuciones de tensiones obtenidas en los ensayos realizados coinciden con las distribuciones de tensiones obtenidas en análisis de elementos finitos realizados anteriormente por otros investigadores.

3.4 FINITE ELEMENT MODELLING OF THE PERIODONTAL LIGAMENT UNDER A REALISTIC KINETIC LOADING OF THE JAW SYSTEM, A. KARIMI, 2019.

El último estudio analizado en esta investigación fue publicado en el “Saudi Dental Journal” [32]. En este se analizó mediante la técnica de análisis de elementos finitos el estrés producido sobre la pieza dental de estudio debido al contacto de oclusión, de igual manera que en los tres estudios mencionados anteriormente. En este caso, la geometría que se empleará para el análisis se corresponde con el primer molar superior derecho. A continuación, se muestra la Figura 15, que se encuentra dividida en dos partes. La parte a) se corresponde con la estructura del modelo de elementos finitos y la parte b) representa la pieza dental de estudio incluyendo todos sus componentes.



ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Figura 15. Pieza dental cuarto estudio [32]

En este estudio se utilizaron tres tipos de materiales distintos, elastoplástico (“elastic”), hiperelástico (“hyperelastic”) y viscoelástico (“viscoelastic”), como se muestra en la Tabla 4, en la que se encuentran recogidos los parámetros necesarios para la realización del estudio de cargas (módulo de elasticidad y coeficiente de poisson) [32].

Material	Módulo de Young (Gpa)	Coficiente de Poisson
Esmalte	77,90	0,33
Dentina	18,60	0,31

Tabla 4. Propiedades de los materiales cuarto estudio [32]

Una vez realizado el estudio de cargas mediante la técnica de análisis de elementos finitos, se obtuvieron los resultados que se comentan a continuación [32].

- Para el modelo hiperelástico, el valor del estrés de contorno, en magnitudes de presión, fue de 620,14 kPa, para el modelo elastoplástico fue de 388,30 kPa y para el modelo viscoelástico fue de 192,14 kPa. De este modo, se obtuvieron los mayores valores de estrés de contorno sobre la pieza dental empleando el modelo hiperelástico. Estos resultados aparecen representados en la Figura 16. La parte a) de la figura representa un modelo elastoplástico, la parte b) un modelo hiperelástico y la parte c) un modelo viscoelástico.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

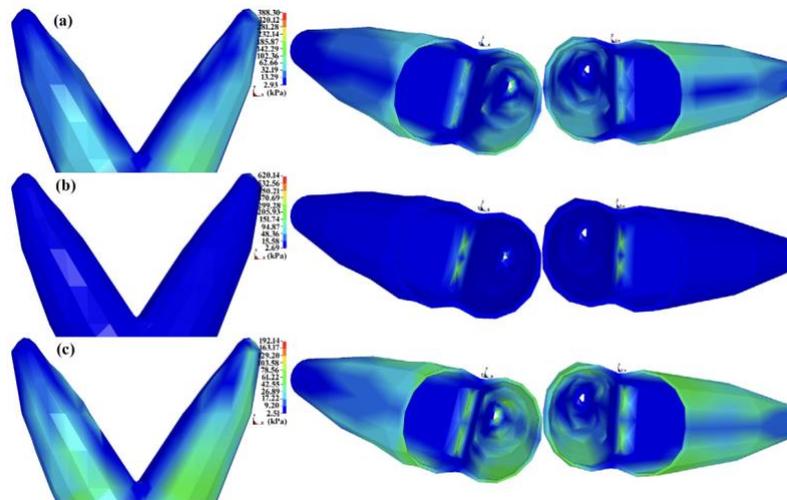


Figura 16. Contorno del estrés de Von Mises cuarto estudio [32]

- En cuanto a los valores de deformación, medidos en términos de desplazamiento resultante, para el modelo elastoplástico el valor más alto fue de 0,21 mm, para el modelo hiperelástico fue de 0,16 mm y para el modelo viscoelástico fue de 0,23 mm. De este modo, se registraron las deformaciones más altas en el modelo viscoelástico y más bajas en el modelo hiperelástico. Esto se puede observar en la Figura 17, dividida en tres partes. La parte a) se corresponde con el modelo elastoplástico, la parte b) con el modelo hiperelástico y la parte c) con el modelo viscoelástico.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

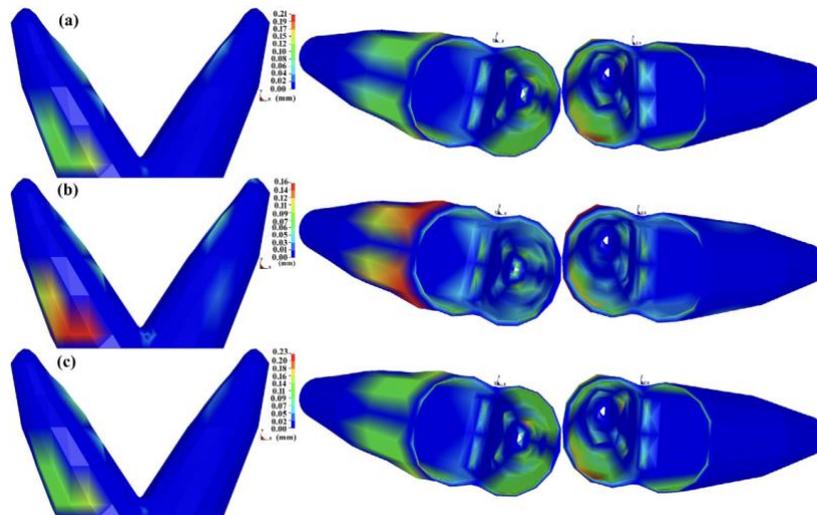
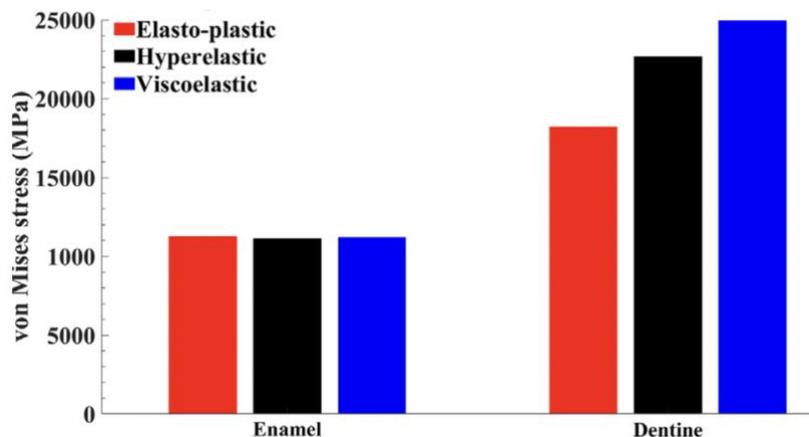


Figura 17. Deformación cuarto estudio [32]

- Como se puede observar en la Figura 18, el estrés producido, comparado en magnitudes de presión (MPa), en el esmalte (“enamel”) fue muy similar empleando cualquiera de los tres métodos mencionados anteriormente, pero, en cuanto a la dentina, el mayor estrés se aprecia empleando el método viscoelástico y el menor empleando el método elastoplástico.



ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Figura 18. Diagrama de barras estrés cuarto estudio [32]

Finalmente, tras el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de cargas, se desarrollaron las siguientes conclusiones.

- Los mayores valores de estrés de contorno fueron registrados empleando el modelo hiperelástico y los menores empleando el modelo viscoelástico.
- Los mayores valores de deformación, medidos en términos de desplazamiento resultante, se registraron para el modelo viscoelástico y los menores para el modelo hiperelástico.
- Los mayores valores de estrés en el esmalte se registraron para el modelo elastoplástico y los menores para el modelo hiperelástico, aunque cabe destacar que se obtuvieron valores de magnitud muy similares.
- Los mayores valores de estrés en la dentina se registraron empleando el modelo viscoelástico y los menores empleando el modelo elastoplástico.
- Las distribuciones tanto de tensión como de deformación obtenidas en los ensayos coinciden con las distribuciones obtenidas en estudios similares realizados por otros investigadores de los elementos finitos.

3.5 CONCLUSIONES GENERALES SOBRE LOS ARTÍCULOS

En conclusión, de los artículos comentados anteriormente se resumen las siguientes conclusiones, con el objetivo de ser comparadas posteriormente con los ensayos que se realizarán.

- La dirección y la posición de la carga afectan considerablemente a las distribuciones de tensiones, mientras que la magnitud de la fuerza no afecta.
- La distribución de tensiones de los estudios realizados en los artículos coincide con la distribución de tensiones obtenida por otros investigadores.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- Se determinó que las áreas de contacto oclusal deben ser consideradas en su totalidad, ya que se conseguirían resultados inexactos de no ser así.
- La máxima fuerza registrada de masticación se encuentra dentro de los valores obtenidos en ensayos realizados por otros investigadores.
- La dirección y la posición en la que se coloca la carga aplicada son factores muy importantes ya que afectan en gran medida a la distribución de tensiones que se obtiene tras la realización de los ensayos.
- Los mayores valores de estrés en el esmalte se registraron para el modelo elastoplástico y los menores para el modelo hiperelástico, aunque cabe destacar que se obtuvieron valores de magnitud muy similares.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

Capítulo 4. MODELADO Y SIMULACIÓN

COMPUTACIONAL

4.1 MODELADO DE LA GEOMETRÍA DE ESTUDIO EN SOLID WORKS

El segundo objetivo de esta investigación plantea el modelado de una pieza dental mediante el método de elementos finitos, y para ello las geometrías de trabajo se obtuvieron de muestras extraídas y posteriormente escaneadas mediante una micro CT. Mediante este escaneado se consigue una imagen de la muestra que posteriormente se puede trasladar a un formato .stl, que seguidamente será transferido a el programa Geomagic Studio (Geomagic Studio 12, 3D Systems, Monterrey, NL, México). Este programa permite la modificación de la geometría con el objetivo de limpiarla de ruido y suavizar sus contornos, obteniendo un formato .igs, que, posteriormente, será transferido al software de ingeniería conocido como Solid Works (Solid Works 2022 SP2, Dassault Systems, Véliz-Villacoublay, Francia).

La geometría de estudio consiste, en el primer molar mandibular izquierdo número 36, previamente escaneado, unido a una esfera de cinco milímetros de diámetro diseñada en Solid Works (Solid Works 2022 SP2, Dassault Systems, Véliz-Villacoublay, Francia). A continuación, en la Figura 19, se observa la posición del diente de estudio en la mandíbula.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

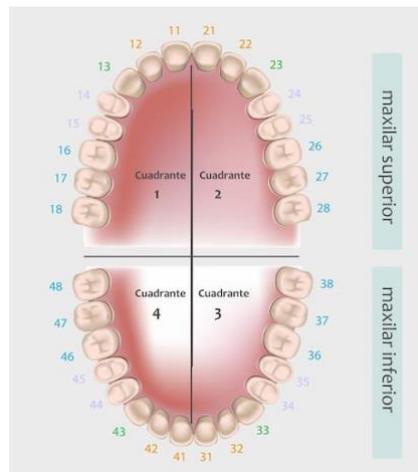


Figura 19. Posición de la pieza dental de estudio [33]

Esta esfera fue colocada de manera que presenta tres secciones de contacto con la parte superior del esmalte. Con ella se pretende representar el contacto masticatorio del primer molar de estudio con los dientes maxilares. El paciente del que se extrajo la muestra presentaba una oclusión del primer molar mandibular, por lo que el contacto masticatorio se produce entre la pieza dental de estudio número 36, el primer molar maxilar izquierdo número 26 y el segundo premolar maxilar número 25. En la Figura 20 se puede observar una representación gráfica de dicha oclusión.



ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Figura 20. Oclusión del primer molar mandibular [34]

La utilización de la esfera, que permite la simplificación de la geometría de estudio, es posible debido a que para esta investigación resulta de mayor relevancia la magnitud de la fuerza de masticación y su dirección que la sección del contacto masticatorio. De este modo, se estudiará previamente el valor adecuado de dicha fuerza con el objetivo realizar dicha simplificación. A continuación, en las Figuras 21 y 22 se muestra la geometría de estudio con y sin la esfera.

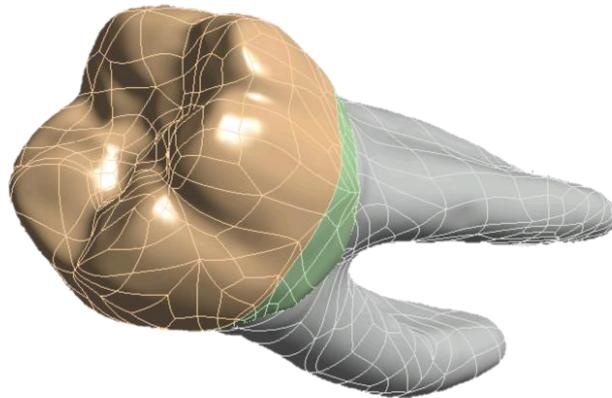
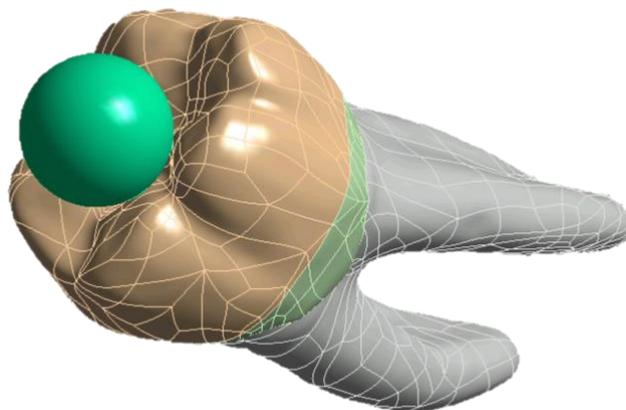


Figura 21. Geometría de estudio sin esfera



ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Figura 22. Geometría de estudio con esfera

Una vez perfeccionada la pieza de estudio en Solid Works (Solid Works 2022 SP2, Dassault Systems, Véliz-Villacoublay, Francia), se procedió a la operación geométrica en el programa informático ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos). La geometría se guardó en formato *.x_t*. En la Figura 21 se muestra dicha geometría.

4.2 OPERACIÓN GEOMÉTRICA EN ANSYS

En este trabajo de investigación, se realizaron distintas simulaciones sobre la pieza dental de estudio tanto de manera aislada como teniendo en cuenta la presencia de los dientes adyacentes a la misma. Estas simulaciones se realizaron teniendo en cuenta la fuerza masticatoria producida por las piezas dentales maxilares superiores, representándolas mediante esferas, como se explica más adelante en este apartado. Para el estudio, se simularon los distintos casos empleando una, dos y tres esferas.

A continuación, se recoge la operación geométrica en el software de ingeniería ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos) para el caso del estudio del diente aislado con una sola esfera.

4.2.1 SIMULACIÓN DE LA PIEZA DENTAL DE ESTUDIO AISLADA CON UNA ESFERA

4.2.1.1 Configuración de la geometría

En primer lugar, se procedió a insertar la geometría previamente guardada en formato *.x_t*. Se efectuó un cambio a escala 20:1 ya que la geometría de estudio obtenida era veinte veces mayor que la pieza dental real. El siguiente paso fue crear dos operaciones booleanas para eliminar las intersecciones entre la esfera y el esmalte, y entre el esmalte y la dentina. De esta manera, se generaron hundimientos en la esfera correspondientes a su intersección

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

con el esmalte y en el esmalte por su intersección con la dentina. Estas hendiduras ayudan en la definición del contacto entre los elementos que conforman la geometría y, de esta manera, simplifican el trabajo a la hora de generar la malla. En las Figuras 23 y 24, se pueden observar dichas intersecciones. Por otro lado, se dividió el esmalte en dos partes, mediante la creación de un “slice” a partir de un plano, separando la sección más próxima a la dentina ya que es la zona que más problemas presenta a la hora de la definición del mallado.

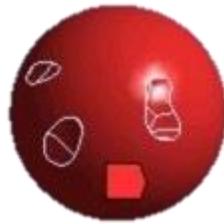


Figura 23. Intersección entre la esfera y el esmalte



Figura 24. Intersección entre el esmalte y la dentina

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

4.2.1.2 Definición y calidad de la malla

Después de haber configurado la geometría, se procede a la definición de la malla. Al tratarse de una geometría tan compleja, hubo que dividirla en 4 partes: esfera, esmalte superior, esmalte inferior y dentina.

Entre los parámetros más importantes a tener en cuenta para realización del mallado destacan el factor de skewness y el número de elementos de la geometría total.

El mallado de la esfera se realizó directamente con la configuración por defecto, mientras que el mallado de la pieza dental se realizó por partes, separando la dentina del esmalte.

Existen numerosos métodos de mallado de una geometría, pero en este caso se utilizaron los dos siguientes métodos. En primer lugar, se realizaron varios “sizing” en las zonas que presentaban un skewness superior a 0,8 de cada sección. Este método permite reducir el tamaño de los elementos de la sección seleccionada y, por tanto, disminuir el skewness en esa zona. En segundo lugar, las zonas de la dentina que presentaba mayor factor de skewness y mayor dificultad para mallar coincidían con los conductos interiores a la misma. Al encontrarse estos conductos en el interior de la pieza dental fue necesaria la realización de cortes mediante planos de sección con el objetivo de reducir este factor y, con esto, mejorar la calidad de la malla.

A continuación, en la Tabla 5, se recogen los parámetros obtenidos tras la realización del mallado de la pieza dental de estudio, entre los que se encuentran el factor de skewness y el número total de elementos de la geometría.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Parte	Skewness	Número de elementos
Esfera	0,79703	
Esmalte superior	0,89778	
Esmalte inferior	0,99645	
Dentina	0,96096	
Total	0,99645	

Tabla 5. Parámetros de mallado diente aislado

Seguidamente, en la Figura 25, se muestra la geometría total una vez realizado el procedimiento de mallado.

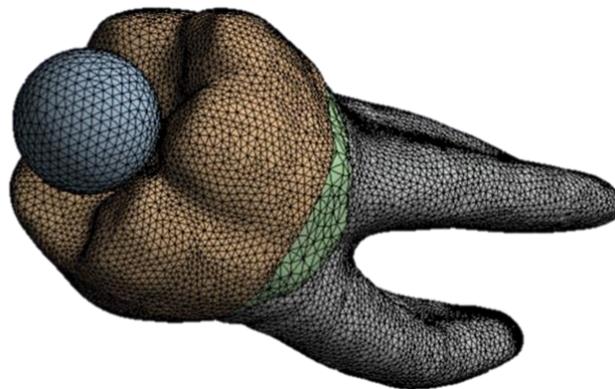


Figura 25. Mallado de la geometría de estudio

Resulta deseable que el factor de “skewness” de la pieza dental resulte lo más pequeño posible. Se obtuvieron valores elevados en ciertas regiones de la geometría de estudio, como se puede observar más adelante en la Tabla 6, debido a la complejidad de esta, pero las zonas de mayor factor de “skewness” se corresponden con los elementos de la geometría cuya localización no es relevante para el desarrollo de la investigación. De este modo y con el objetivo de asegurar la buena calidad de la malla de la geometría de estudio

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

para la realización de los ensayos, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de esta. Esto consiste en, una vez terminado el proceso de mallado y realizado el primer ensayo de prueba de la geometría aislada, obtener una nueva malla con menor número de elementos que la anterior y otra con mayor número de elementos. Una vez obtenidas, se realizará un ensayo con cada malla. Si los resultados obtenidos en estas simulaciones no difieren en gran medida con respecto al ensayo con la malla final, se puede asegurar que la calidad de esta es buena.

A continuación, en las Figuras 26, 27 y 28 se muestran las distribuciones de tensiones de dichos ensayos.

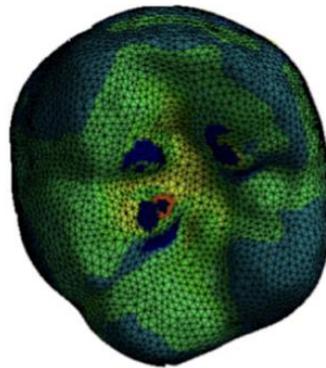


Figura 26. Distribución de tensiones de la malla con menor número de elementos

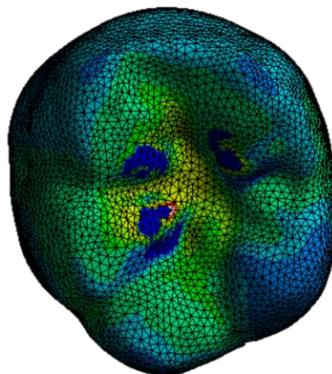


Figura 27. Distribución de tensiones de la malla final

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

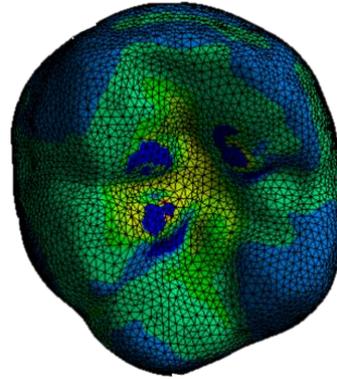


Figura 28. Distribución de tensiones de la malla con mayor número de elementos

Como se puede observar en las figuras anteriores, la distribución de tensiones de los tres ensayos estudiados presenta similitudes significativas. A continuación, en la Tabla 6 se comparan las tensiones máximas y mínimas de las tres mallas mencionadas anteriormente.

Tipo de malla	Tensión máxima (Pa)	Tensión mínima (Pa)	Número de elementos
Más elementos	1,0745E+08	-4,327E+08	346822
Final	1,0681E+08	-4,441E+08	330946
Menos elementos	1,0513E+08	-4,657E+08	327596

Tabla 6. Comparación de tensiones entre las tres mallas

Como se puede observar en la Tabla 6, las tres mallas realizadas presentan diferencias de tensión, tanto máxima como mínima, menores del 5%, por lo que se puede afirmar que la malla final, representada en la Figura 27, presenta una calidad considerada como buena. De cara a los ensayos que se realizarán posteriormente con una, dos y tres esferas, para el mallado de dichas geometrías se utilizaron los mismos parámetros que para el mallado de la geometría de estudio aislada, de manera que estas mallas obtenidas también son consideradas como de buena calidad.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

4.2.1.3 Definición de las fuerzas a aplicar

Para la elección de la magnitud de la fuerza de masticación a aplicar, se consultaron los artículos [15-22] en los que otros investigadores realizaron ensayos similares con distintas magnitudes de fuerza.

La primera simulación de prueba se realizó aplicando una fuerza remota sobre la esfera, definida previamente como cuerpo flexible, no rígido, de magnitud 140 N [15-22] en dirección perpendicular hacia abajo (eje -z). El soporte fijo se localizó en la parte baja de las raíces de la dentina, ya que de esta manera se simula el agarre que presenta el diente en el paladar. Esta primera simulación sirvió de referencia para demostrar que existe coherencia entre los resultados obtenidos y los ensayos realizados por otros autores.

Para la realización del primer ensayo, se aplicó una fuerza remota de 120 N en dirección perpendicular hacia abajo (eje -z) que pretende imitar la fuerza de masticación entre el molar de estudio y las piezas dentales maxilares, mencionadas anteriormente, que hacen contacto. El valor de esta fuerza no era de gran relevancia debido a que se trataba solo de un ensayo de prueba con el objetivo de comprobar que la distribución de tensiones obtenida resultaba ser la esperada.

Para la realización del resto de simulaciones que, si presentan relevancia en el proyecto, se decidió optar por asignar un valor de 150 N a la magnitud de la fuerza masticatoria ya que el rango de esta en los artículos encontrados [15-22] está comprendido entre 50-150 N, y eligiendo el mayor valor extremo se consigue simular el caso más desfavorable de estudio. Además, debido a que la distribución de tensiones es la misma para todas las simulaciones realizadas, independientemente de la magnitud del valor aplicado de la fuerza masticatoria, interesa elegir el caso más desfavorable. A continuación, se muestra en la Figura 29 la distribución de tensiones del ensayo realizado utilizando 50 N como valor de la magnitud de la fuerza de masticación. La distribución de tensiones del ensayo realizado con 150 N como valor de la magnitud de la fuerza se puede observar en la Figura 27. Como se ha mencionado anteriormente, se puede observar como la distribución de tensiones es la

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

misma para ambas simulaciones, aunque el color de estas sea distinto, correspondiendo el color azul oscuro con tensiones a compresión y el resto de los colores con tensiones a tracción, siendo el rojo el color que representa la tracción máxima. Esto es debido a que comparando los valores de las tensiones entre los ensayos si se encuentran diferencias de magnitud significativas.

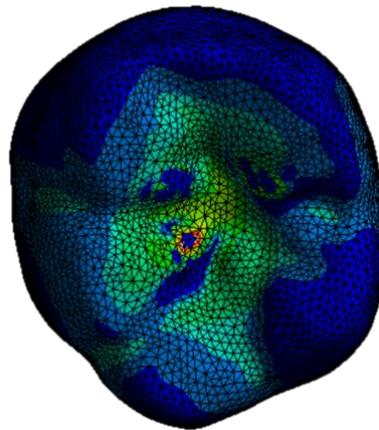


Figura 29. Distribución de tensiones utilizando 50 N

Además, esta fuerza se aplicó con un ángulo de 17,5 grados con la vertical, siendo esta la recta que une el centro de la cabeza con la columna vertebral [35], como se puede observar, más adelante, en la Figura 30. Si no existiera una oclusión mandibular, la fuerza masticatoria actuaría en la dirección del eje paralelo a la columna vertebral, pero, debido a dicha oclusión, también presenta movimiento en la dirección paralela a la lengua. Se consideró la ausencia de movimiento entre los dientes mandibulares, correspondientes con el eje “y” y, por tanto, la magnitud de esta fuerza se calculó teniendo en cuenta las proyecciones sobre los ejes “x” e “z”, es decir, tomando el eje “x” como la fuerza vertical entre los dientes y el eje “z” como la fuerza horizontal entre los mismos. De este modo, en

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

la Figura 30 se puede observar dichos ejes, así como la dirección de la fuerza total, es decir, compuesta por las dos componentes, tanto vertical como horizontal.

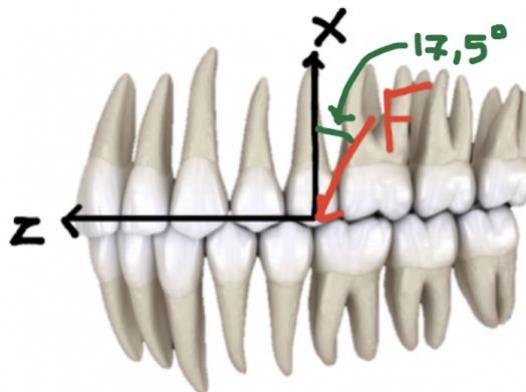


Figura 30. Dirección de la fuerza masticatoria [36]

La magnitud de la fuerza masticatoria encontrada en los artículos mencionados anteriormente está definida según el eje central de la propia pieza dental de estudio, por lo que hubo que descomponer la misma en las distintas direcciones del espacio, como se muestra a continuación.

$$F_z = 150 * \cos (17,5) = 143,057 \text{ N}$$

$$F_x = 150 * \sin (17,5) = 45,106 \text{ N}$$

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Por otro lado, se realizó un “remote displacement” en la esfera con el objetivo de bloquear el movimiento rotativo de la misma en todas las direcciones del espacio.

4.2.1.4 Definición de los materiales a utilizar

En la primera prueba realizada con la geometría importada en ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos), se utilizó acero estructural como material tanto en la pieza dental de estudio como en la esfera. Para el ensayo de prueba no hizo falta definir los materiales reales que se iban a utilizar en cada zona del diente ya que lo que se pretendía con esta primera simulación era comprobar que la distribución de cargas, una vez realizado el estudio, coincidía con lo esperado en un principio.

En la Tabla 7 se encuentran recogidos los parámetros correspondientes al acero estructural, material definido por defecto en ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos).

Acero estructural	
Módulo de Young (Pa)	2,0000E+11
Coefficiente de Poisson	3,0000E-01

Tabla 7. Parámetros del acero estructural

Para la realización del primer ensayo de carga se realizó una búsqueda bibliográfica de la que se obtuvieron distintos parámetros de los materiales utilizados en estudios de cargas realizados por otros autores [37-35], y se realizó la media aritmética de los mismos para definir el tipo de material que se utilizará en cada una de las tres secciones del diente: dentina, esmalte y esfera.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

A continuación, en la Tabla 8, se recogen los materiales utilizados en cada zona de la pieza dental de estudio (esmalte y dentina), definidos mediante su módulo de Young y coeficiente de Poisson.

	Parámetro	Valor
Esmalte	Módulo de Young (GPa)	79,27
	Coefficiente de Poisson	0,3
Dentina	Módulo de Young (GPa)	16,31
	Coefficiente de Poisson	0,31

Tabla 8. Parámetros de los materiales de la geometría de estudio

En cuanto a la esfera, esta se definirá empleando el mismo material que para el esmalte, ya que simula el contacto masticatorio.

4.2.1.5 Métodos utilizados para la obtención de resultados

Para el cálculo de las tensiones a las que se somete la pieza, mediante la simulación computacional, se emplearán tres métodos distintos: “Equivalent Stress” y “Maximum Principal Stress”. Estos criterios de plasticidad son empleados con el fin de conocer los puntos de máxima tensión y deformación a los que puede llegar a estar sometida la geometría de estudio y, por tanto, averiguar la tensión máxima que puede alcanzar hasta el instante de rotura.

El método “Equivalent Stress” es más comúnmente conocido como el criterio de plasticidad de Von-Mises o criterio de la máxima energía de distorsión. Este propone que la tensión máxima equivalente se alcanza en el punto del sólido que satisface la siguiente relación, según los ejes principales [45].

$$\sigma_{equivalente} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad [45]$$

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Por otro lado, el criterio “Maximum Principal Stress”, también conocido como criterio de Rankine, que consiste en considerar como tensión máxima equivalente la máxima tensión principal en valor absoluto.

4.2.2 SIMULACIONES CON LA PRESENCIA DE DIENTES ADYACENTES

Finalmente, y una vez realizada la primera simulación con el diente aislado, se procedió al desarrollo de un nuevo estudio de la pieza dental, pero esta vez teniendo en consideración la influencia de los dientes adyacentes al mismo. Para ello, se llevó a cabo el mismo procedimiento que para el estudio del diente aislado.

Para el resto de las simulaciones, detalladas a continuación, se emplearán los mismos parámetros que para el estudio del diente aislado, por lo que la calidad de la malla se considera buena.

Por otro lado, la fuerza masticatoria resulta ser la misma en todas las esferas ya que la magnitud de la fuerza que ejercen los dientes maxilares sobre los mandibulares es igual sobre todas las piezas dentales de la mandíbula. Los métodos de análisis de resultados fueron los mismos que para la primera simulación con el diente aislado.

4.2.2.1 Simulaciones con una esfera

Se realizaron cuatro simulaciones distintas con una sola esfera, situada en todo momento sobre la pieza dental de estudio, es decir, el primer molar mandibular izquierdo número 36. La primera se realizó sobre la pieza dental de estudio aislada, la segunda con la presencia del segundo premolar mandibular izquierdo número 35, la tercera con la presencia del segundo molar mandibular izquierdo número 37 y la cuarta combinando las tres piezas dentales mencionadas, es decir, con la presencia del segundo premolar mandibular izquierdo (35) y del segundo molar mandibular izquierdo (37). En la Figura 22, se encuentra representada la geometría de estudio para el caso de la pieza dental de estudio aislada. En

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

las Figuras 31, 32, 33 se pueden observar las distintas geometrías de estudio para las simulaciones con una esfera.

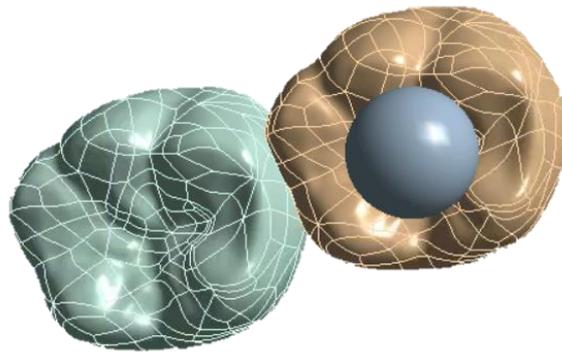


Figura 31. Geometría de estudio segunda simulación con una esfera

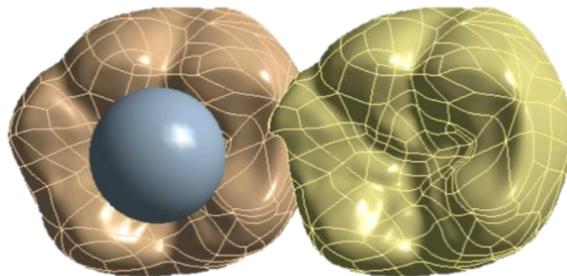


Figura 32. Geometría de estudio tercera simulación con una esfera

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

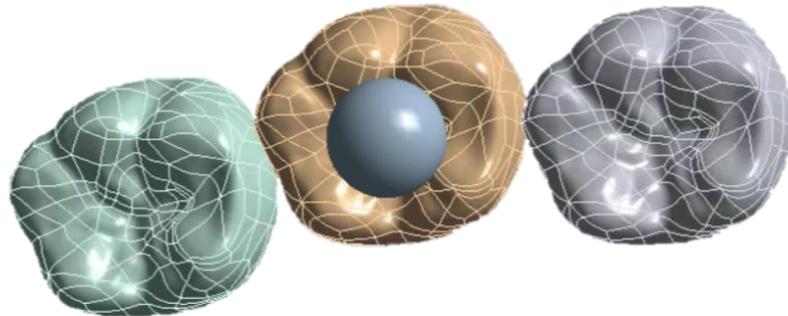


Figura 33. Geometría de estudio cuarta simulación con una esfera

4.2.2.2 Simulaciones con dos esferas

Con dos esferas, se realizaron tres simulaciones distintas: quinta, sexta y séptima. La quinta y la sexta coinciden con las simulaciones segunda y tercera, pero añadiendo otra esfera en la pieza dental adyacente a la de estudio. La séptima simulación coincide con la cuarta, pero en este caso las esferas están colocadas en las piezas dentales adyacentes a la de estudio. En las Figuras 34, 35 y 36, se pueden observar las geometrías mencionadas anteriormente.

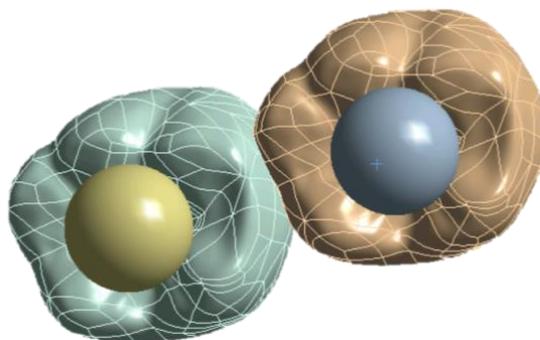


Figura 34. Geometría de estudio quinta simulación con dos esferas

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

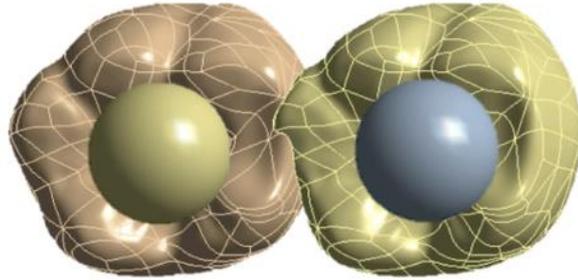


Figura 35. Geometría de estudio sexta simulación con dos esferas

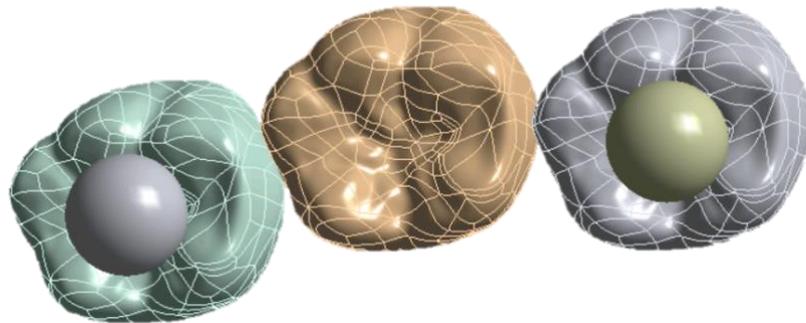


Figura 36. Geometría de estudio séptima simulación con dos esferas

4.2.2.3 Simulaciones con tres esferas

Con tres esferas, se realizó una única simulación, la octava, que coincide con la cuarta simulación, pero en este caso se colocó una esfera en cada pieza dental. En la Figura 37 se puede observar dicha geometría.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

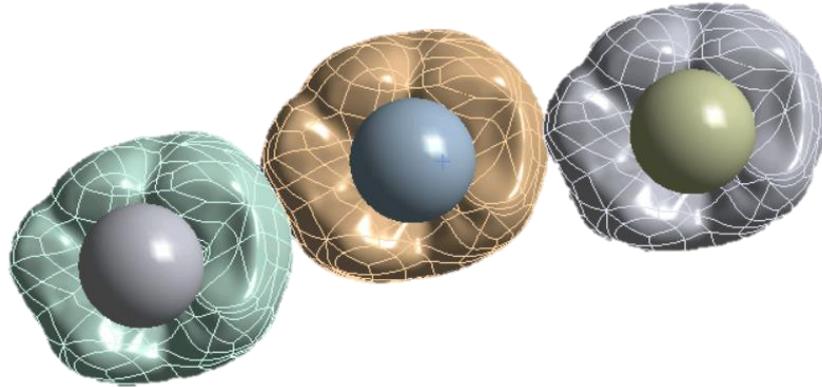


Figura 37. Geometría de estudio octava simulación con tres esferas

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizadas las simulaciones, se procede al análisis y discusión de los resultados obtenidos. Como se ha mencionado anteriormente, se realizaron ocho simulaciones; una con el diente de estudio aislado, tres con una esfera, tres con dos esferas y la última con tres esferas.

Cabe destacar, que en todos los casos las zonas que presentan un color más rojizo se corresponden con las partes del esmalte que están directamente en contacto con la esfera y, por lo tanto, no se tendrán en cuenta esas zonas para el análisis.

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

5.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS CON UNA ESFERA

A continuación, en las Figuras 38, 39 y 40 se pueden apreciar las distribuciones de tensiones obtenidas en las simulaciones realizadas con una esfera.

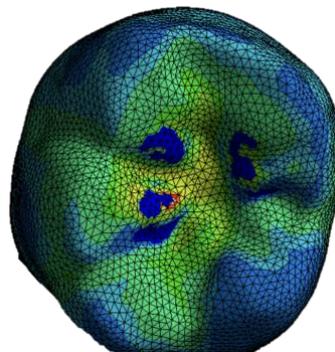


Figura 38. Distribución de tensiones segunda simulación con una esfera

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

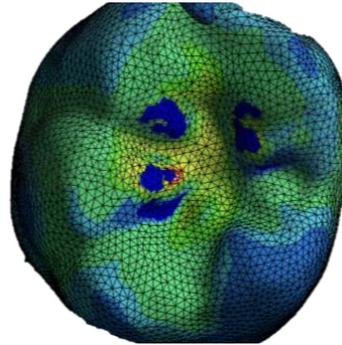


Figura 39. Distribución de tensiones tercera simulación con una esfera

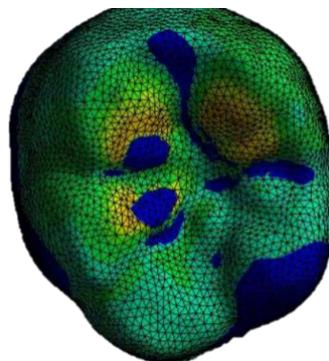


Figura 40. Distribución de tensiones cuarta simulación con una esfera

Como se puede observar en las figuras anteriores, las distribuciones de tensiones entre los ensayos con dos y tres dientes son muy similares a la del ensayo realizado con la pieza dental aislada, representada en la Figura 22.

A continuación, en la Tabla 9 se recogen los valores de tensión máxima y mínima de las cuatro simulaciones anteriores.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Simulación	Tensión máxima (Pa)	Tensión mínima (Pa)
Primera	1,0520E+08	-4,357E+08
Segunda	8,2236E+07	-4,136E+08
Tercera	8,2195E+07	-4,113E+08
Cuarta	4,3421E+07	-3,552E+07

Tabla 9. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con una esfera

5.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS CON DOS ESFERAS

En las Figuras 41, 42 y 43 se muestran las distribuciones de tensiones para las tres siguientes simulaciones, quinta, sexta y séptima, realizadas con dos esferas.

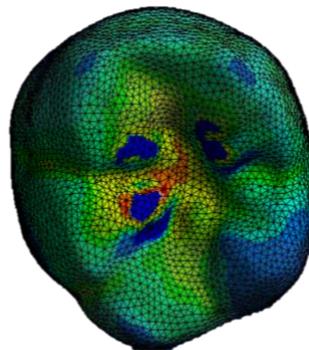


Figura 41. Distribución de tensiones quinta simulación con dos esferas

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

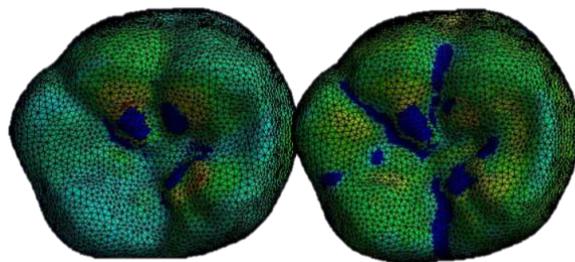


Figura 42. Distribución de tensiones sexta simulación con dos esferas

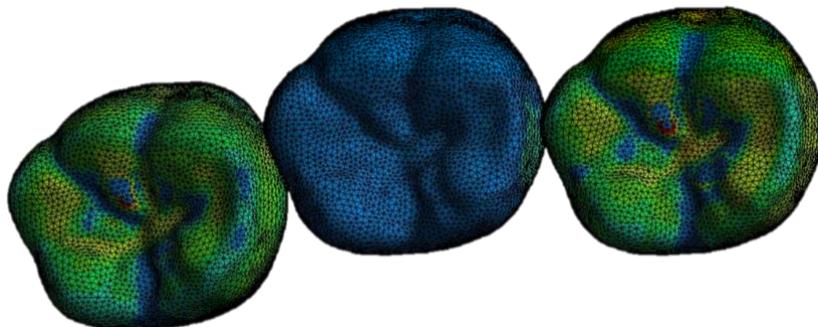


Figura 43. Distribución de tensiones séptima simulación con dos esferas

A continuación, en la Tabla 10 se recogen los valores de tensión máxima y mínima de las tres simulaciones realizadas empleando dos esferas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Simulación	Tensión máxima (Pa)	Tensión mínima (Pa)
Quinta	9,0813E+07	-5,427E+08
Sexta	1,0610E+08	-1,096E+08
Séptima	1,3113E+08	-5,703E+08

Tabla 10. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con dos esferas

5.1.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS CON TRES ESFERAS

En la Figura 44 se muestra la distribución de tensiones obtenida al realizar la octava y última simulación, cuya geometría de estudio consistía en la pieza dental de estudio justo a los dos dientes adyacentes a la misma y empleando tres esferas.

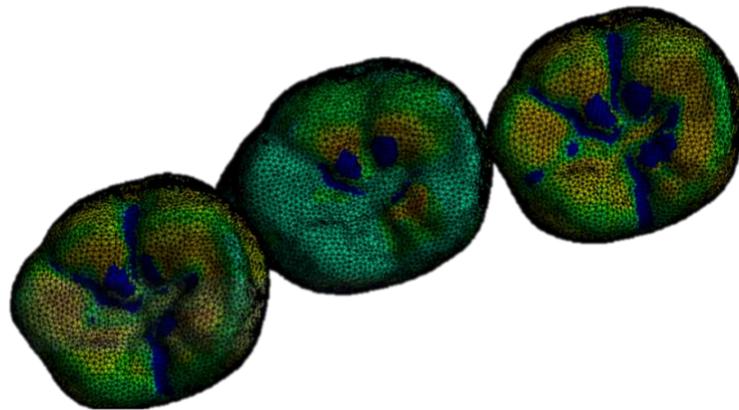


Figura 44. Distribución de tensiones octava simulación con tres esferas

A continuación, en la Tabla 11 se recogen los valores de tensión máxima y mínima obtenidos en la simulación realizada empleando tres esferas.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Simulación	Tensión máxima (Pa)	Tensión mínima (Pa)
Octava	6,1405E+07	-1,635E+08

Tabla 11. Tensiones máximas y mínimas en simulaciones con tres esferas

5.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

5.2.1 ENSAYOS REALIZADOS CON UNA ESFERA

En la segunda y la tercera simulación se obtuvieron tensiones máximas y mínimas muy parecidas, cuyos valores se recogen a continuación en la Tabla 9, siendo estas menores a las del ensayo con el diente aislado.

En la cuarta simulación, cuya geometría de estudio estaba compuesta de las tres piezas dentales, el valor de la tensión máxima resultó ser aproximadamente la mitad del valor obtenido de tensión máxima en la segunda y tercera simulación, cuyas geometrías de estudio estaban compuestas por solo un diente adyacente a la pieza dental de estudio. Este resultado es coherente ya que la cuarta simulación resulta ser la combinación de la segunda y la tercera simulación.

Se puede observar, tanto en las Figuras 38, 39 y 40 como en la Figura 22, que, en las cuatro simulaciones, se puede llegar a producir una fisura vertical (VRF), aunque también una fisura horizontal. Esto sucedería si se llegasen a superar las tensiones máximas. De este modo, dichas fracturas se producirían en la zona central de la pieza dental, es decir, en las líneas centrales de la pieza dental tanto en vertical como en horizontal.

En cuanto a las tensiones mínimas, en todas las simulaciones presentan valores similares salvo en la cuarta simulación en la que el valor es un poco menor, como se aprecia en la Tabla 9.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

5.2.2 ENSAYOS REALIZADOS CON DOS ESFERAS

Como se puede observar en las Figuras 41, 42 y 43, las distribuciones de tensiones entre los ensayos realizados con dos y tres piezas dentales empleando dos esferas coincide con la distribución de tensiones obtenida en los ensayos, mencionados anteriormente, realizados con una sola esfera.

En cuanto a la tensión máxima obtenida en los ensayos con dos esferas, es mayor que la tensión máxima obtenida tras la simulación de los mismos ensayos con una esfera. Esto se debe a que en los ensayos realizados con dos esferas la fuerza de masticación afecta a ambos dientes, mientras que en las simulaciones efectuadas con una esfera dicha fuerza actúa solamente sobre el diente de estudio.

La tensión máxima obtenida tras la realización de la séptima simulación, realizada teniendo en cuenta la presencia de las dos piezas dentales adyacentes al premolar de estudio, es mayor que la tensión máxima obtenida tras la cuarta simulación, realizada de la misma manera que la séptima pero solo con una esfera. De este modo, en el ensayo con dos esferas la fuerza de masticación es ejercida desde ambos dientes, mientras que en los ensayos con una esfera es puntual.

En las simulaciones realizadas con dos esferas, al igual que en las realizadas con una esfera, se puede observar en las distribuciones de tensiones, representadas en las figuras mencionadas anteriormente, como se puede llegar a producir una fisura vertical en las piezas dentales sobre las que se aplica la fuerza de masticación, aunque también una fisura horizontal. Al igual que en las simulaciones con una esfera, estas fisuras aparecerían si se llegasen a superar las tensiones máximas a las que está sometida la pieza dental.

En cuanto a las tensiones mínimas o de compresión, estas resultan ser mayores en los ensayos realizados con una esfera, exceptuando la simulación llevada a cabo con dos dientes, colocando la pieza dental de estudio a la izquierda, en el cual la tensión mínima obtenida resulta mayor empleando dos esferas en vez de una.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

5.2.3 ENSAYOS REALIZADOS CON TRES ESFERAS

Como se puede observar en la Figura 44, la distribución de tensiones obtenida tras la realización de la octava simulación coincide con la distribución de tensiones obtenida tras la realización del resto de ensayos mencionados anteriormente.

Comparando las simulaciones realizadas con tres piezas dentales, cuarta, séptima y octava, se obtienen los siguientes resultados.

La tensión máxima en el ensayo realizado con tres esferas, octava simulación, es ligeramente superior que la del ensayo realizado con una sola esfera, cuarta simulación, pero de mucha menor magnitud que la del ensayo realizado con dos esferas, séptima simulación.

En cuanto a las tensiones mínimas o de compresión obtenidas, estas resultan ser distintas en todas las simulaciones realizadas con tres dientes, obteniéndose el mayor valor de dicha tensión en el ensayo llevado a cabo con una esfera y la menor en el ensayo realizado con dos esferas.

Se puede observar como en la octava simulación, cuya distribución de tensiones se ve representada en la Figura 44, se puede llegar a producir una fisura vertical, al igual que en el resto de las simulaciones realizadas anteriormente, aunque también puede formarse una fisura horizontal. Al igual que en las simulaciones con una y dos esferas, estas fisuras aparecerán en el caso de que se llegarán a superar las tensiones máximas a las que está sometida la geometría de estudio.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.*

Capítulo 6. CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES EN BASE A LOS OBJETIVOS PROPUESTOS

Para la realización de este trabajo de investigación se propusieron cuatro objetivos principales, de los que se obtuvieron las siguientes conclusiones.

El primer objetivo consistía en identificar los aspectos técnicos que subyacen al fracaso de endodoncias por fisuras. Este se ve reflejado en los tres primeros capítulos. En esencia, se comprobó que las fisuras dentales que se llegarán a producir en los dientes, si se superan las tensiones máximas, tras el proceso de endodoncia suelen consistir en fracturas verticales, aunque también se ha demostrado en las simulaciones realizadas la aparición de fracturas horizontales. Además, se efectuó una búsqueda bibliográfica intensiva con el objetivo de elegir tanto de la fuerza de masticación como los parámetros de los materiales a utilizar en los ensayos de cargas mediante la comparación de estudios similares llevados a cabo por otros investigadores de los elementos finitos.

El segundo objetivo de esta investigación consistía en modelar una pieza dental mediante el método de elementos finitos. Esto se consiguió empleando el software de ingeniería ANSYS (ANSYS 2021 R2, ESSS, Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos). Una vez obtenido el archivo que contenía la pieza dental de estudio y realizado el ensamblaje de esta con la esfera, se procedió al mallado y a la elección tanto de la fuerza de masticación a aplicar como de los parámetros de los materiales a emplear. Una vez definidos todos los parámetros, se procedió a la realización de la primera simulación sobre el diente aislado con una esfera, en la que se comprobó que la distribución de tensiones obtenida en dicho ensayo coincidía con lo esperado, es decir, era similar a las distribuciones de cargas obtenidas como resultado de ensayos de carga realizados por otros investigadores de los elementos finitos.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

El tercer objetivo propuesto en este trabajo de investigación consistía en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes empleando una esfera. Como se ha mencionado a lo largo de este estudio, la esfera pretende simular la fuerza de masticación ejercida por las piezas dentales que se encuentran directamente en contacto con el diente de estudio, de modo que el cálculo y análisis de los resultados, así como la realización de los estudios de carga se realicen de manera más fácil. Tras la realización de dichos ensayos, se observó como las distribuciones de tensiones coincidían con la obtenida en el ensayo efectuado con el diente aislado, por lo que se consideran como buenos.

El cuarto objetivo consistía en realizar un estudio de cargas sobre una pieza dental aislada y con la presencia de dientes adyacentes, empleando dos y tres esferas. En estas últimas simulaciones, al igual que en los casos anteriores, las distribuciones de tensiones coincidían con la distribución de tensiones obtenida al realizar el estudio de cargas sobre la pieza dental aislada.

En cuanto a las diferencias entre la realización del estudio de cargas con una pieza dental aislada y con la presencia de los dientes adyacentes a la misma, se puede concluir que las tensiones obtenidas en los ensayos, en la mayoría de los casos, son distintas, de manera que se necesita ejercer una menor fuerza de masticación para conseguir la fisura dental.

6.2 CONCLUSIONES EN BASE AL TRATAMIENTO DE ENDODONCIA

En el tercer capítulo de esta investigación, se analizaron una serie de artículos en los que se realizaron estudios de carga sobre piezas dentales que no habían sufrido un previo tratamiento de endodoncia. Por el contrario, en esta investigación, la pieza dental de estudio consistía en un premolar tratado con endodoncia previamente a la realización de las simulaciones. Entre los resultados obtenidos, se puede afirmar que la causa más notable por la que una pieza dental se fractura tras el proceso de endodoncia es debido al relleno de los conductos radiculares con un material distinto al de la pieza dental en cuestión.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Este estudio realizado, sirve para comparar los ensayos realizados con otros investigadores de los elementos finitos, desde el punto de vista de las fracturas que se pueden llegar a generar en el diente, pero también se puede comparar hasta qué punto una pieza dental sometida a un proceso previo de endodoncia presenta una menor tasa de retención que un diente sin este tratamiento. Como se analizó en el segundo capítulo, en el que se estudian las fracturas posteriores a un tratamiento de endodoncia, se determinó que los dientes endodonciados, como era de esperar, son más propensos a fractura posterior por masticación que las piezas dentales que no han sufrido ningún proceso de este tipo.

6.3 CONCLUSIONES EN BASE A LOS ARTÍCULOS ANALIZADOS

Tras el análisis, llevado a cabo en el tercer capítulo, de los artículos sobre ensayos de cargas realizados por otros investigadores de los elementos finitos, se comprobó que uno de los factores más importantes para tener en cuenta era la dirección y posición de la carga a aplicar sobre la geometría de estudio, pero, por el contrario, la magnitud de la fuerza no afectaba a la distribución de tensiones. Es por este motivo por el que, para el primer ensayo de prueba realizado con 120 N, como se explica en el cuarto capítulo, se consideró un valor de magnitud de fuerza aleatorio.

Además, se comprobó que la distribución de tensiones de los ensayos llevados a cabo en los artículos analizados resultó ser similar a las obtenidas en las simulaciones realizadas en esta investigación, así como también las magnitudes de los valores máximos y mínimos de tensiones obtenidos se encuentran dentro del rango de valores obtenidos en ensayos realizados por otros investigadores.

Otro factor importante que se determinó tras el análisis de los artículos encontrados fue que las áreas de contacto oclusal deben ser consideradas en su totalidad para la obtención de los resultados con mayor exactitud. En esta investigación, se consideraron tres zonas de contacto oclusal entre la esfera y el esmalte.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.***

Por último, se comprobó que, aunque existían diferencias entre las tensiones obtenidas empleando un modelo elastoplástico, viscoelástico o hiperelástico, la diferencia de magnitud entre ellas resultó ser lo suficientemente pequeña como para que la decisión del modelo a utilizar no suponga un factor importante en la investigación.

En conclusión, las simulaciones realizadas a lo largo de esta investigación han demostrado la veracidad de los estudios realizados por otros investigadores de los elementos finitos, y han contribuido a el análisis de la pieza dental teniendo en cuenta además los dientes adyacentes a la misma.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

Capítulo 7. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la ONU, este trabajo se encuentra relacionado con el tercero, que corresponde con salud y bienestar, ya que se centra en garantizar una vida sana y promover el bienestar en todas las edades, para la construcción de sociedades prósperas [46].

A pesar de los grandes avances que se han logrado en los últimos años, todavía siguen existiendo desigualdades en la salud y el bienestar de las personas en el mundo. Estas desigualdades están presentes sobre todo en el acceso a la asistencia sanitaria. Sin esta asistencia, mueren un gran número de personas cada año debido a no poder recibir los tratamientos necesarios contra epidemias como el VIH [47].

Este objetivo se ha visto enormemente afectado por la crisis mundial del COVID-19, ya que muchos países no estaban preparados para esta enorme crisis [46]. Este trabajo de investigación pretende aportar información interesante acerca de la posibilidad de fractura de una pieza dental posterior a la realización de un tratamiento endodóntico. En la Figura 45 se muestra el logo de dicho objetivo de desarrollo sostenible.



Figura 45. Logo del objetivo de desarrollo sostenible número tres [48]

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.**

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Real Academia de la Lengua Española. www.rae.es. <https://dle.rae.es/endodoncia> (accedido ene. 29 2022).
- [2] Y. Zadik, V. Sandler, R. Bechor, y R. Salehrabi, «Analysis of factors related to extraction of endodontically treated teeth», *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endodontology*, vol. 106, n.o 5, pp. e31-e35, nov. 2008, doi: 10.1016/j.tripleo.2008.06.017 (accedido jul. 28 2022).
- [3] A. Anjum y S. Hegde. (2019). «Minimally Invasive Endodontics-A Review» <https://www.semanticscholar.org/paper/Minimally-Invasive-Endodontics-A-Review-AnjumHegde/b904b3e4615325d1ba2a283d4f32fb32d882c442> (accedido ene. 29 2022).
- [4] (2022). SolidWorks Logo [Figura]. Recuperado de <https://1000marcas.net/solidworks-logo/>.
- [5] Solid Works. www.solidworks.com. <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/solidworks/> (accedido abr. 19 2022).
- [6] ANSYS logo [Figura]. Recuperado de <https://www.ansys.com/>.
- [7] Workbench User's Guide. www.ansys.com. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v212/en/wb2_help/wb2h_overview.html (accedido feb. 28 2022).
- [8] Tratamiento de endodoncia [Figura]. Recuperado de <https://birbe.org/blog/que-es-una-endodoncia/>.
- [9] Hospital Fuensanta. «Endodoncia. Qué es, en qué consiste y qué tipos hay» www.hospitalfuensanta.com. <https://hospitalfuensanta.com/especialidades/unidad-dental/endodoncia/> (accedido jul. 21 2022).

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO I TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- [10] E. S. Reeh, H. H. Messer, y W. H. Douglas, «Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures», *J. Endod.*, vol. 15, n.o 11, pp. 512-516, nov. 1989, doi: 10.1016/S0099-2399(89)80191-8 (accedido jul. 21 2022).
- [11] Oral Hygiene [Figura]. Recuperado de <https://www.pinterest.es/pin/387520742935902038/>.
- [12] E. K. Hansen, E. Asmussen, y N. C. Christiansen, «In vivo fractures of endodontically treated posterior teeth restored with amalgam», *Endod. Dent. Traumatol.*, vol. 6, n.o 2, pp. 49-55, abr. 1990, doi: 10.1111/j.1600-9657.1990.tb00389.x. (accedido jul. 28 2022).
- [13] C. García-Guerrero, C. Parra-Junco, S. Quijano-Guauque, N. Molano, G. A. Pineda, y D. J. Marín-Zuluaga, «Vertical root fractures in endodontically-treated teeth: A retrospective analysis of possible risk factors», *J. Investig. Clin. Dent.*, vol. 9, n.o 1, feb. 2018, doi: 10.1111/jicd.12273 (accedido jul. 28 2022).
- [14] W. M. M. Fennis, R. H. Kuijs, C. M. Kreulen, F. J. M. Roeters, N. H. J. Creugers, y R. C. W. Burgersdijk, «A survey of cusp fractures in a population of general dental practices», *Int. J. Prosthodont.*, vol. 15, n.o 6, pp. 559-563, dic. 2002 (accedido jul. 28 2022).
- [15] K. Chotvorrarak, W. Suksaphar, y D. Banomyong, «Retrospective study of fracture survival in endodontically treated molars: the effect of single-unit crowns versus direct-resin composite restorations», *Restor. Dent. Endod.*, vol. 46, n.o 2, p. e29, may 2021, doi: 10.5395/rde.2021.46.e29 (accedido jul. 28 2022).
- [16] R. Nagasiri y S. Chitmongkolsuk, «Long-term survival of endodontically treated molars without crown coverage: a retrospective cohort study», *J. Prosthet. Dent.*, vol. 93, n.o 2, pp. 164-170, feb. 2005, doi: 10.1016/j.prosdent.2004.11.001 (accedido jul. 28 2022).

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO I TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- [25] S. Li et al., «Occurrence of Dentinal Microcracks in Severely Curved Root Canals with ProTaper Universal, WaveOne, and ProTaper Next File Systems», *J. Endod.*, vol. 41, n.o 11, pp. 1875-1879, nov. 2015, doi: 10.1016/j.joen.2015.08.005 (accedido jul. 30 2022).
- [26] Real Academia de la Lengua Española. www.rae.es.
<https://dle.rae.es/obturar?m=form> (accedido jul. 29 2022).
- [27] P. K. Chellapilla, M. R. Boddeda, M. Jyothi, L. V. Uppalapati, R. K. Konagala, y L. Dasari, «Influence of obturating techniques on root dentin crack propagation: A micro-computed tomography assessment», *J. Conserv. Dent. JCD*, vol. 24, n.o 1, pp. 72-76, feb. 2021, doi: 10.4103/JCD.JCD_591_20 (accedido jul. 30 2022).
- [28] G. De-Deus et al., «Micro-CT assessment of dentinal micro-cracks after root canal filling procedures», *Int. Endod. J.*, vol. 50, n.o 9, pp. 895-901, sep. 2017, doi: 10.1111/iej.12706 (accedido jul. 30 2022).
- [29] S. Benazzi, O. Kullmer, I. Grosse y W. Weber. (2012). «Brief Communication: Comparing Loading Scenarios in Lower First Molar Supporting Bone Structure Using 3D Finite Element Analysis», *American Journal of Physical Anthropology*, 147(1), 128–134, doi: 10.1002/ajpa.21607.
- [30] S. Benazzi, H. N. Nguyen, O. Kullmer, K. Kupczik. (2016). «Dynamic Modelling of Tooth Deformation Using Occlusal Kinematics and Finite Element Analysis», *PLOS ONE*, 11(3): e0152663, doi: 10.1371/journal.pone.01526.
- [31] H. Zhang, J. Cui, X. L. Lu, M. Wang. (2017). «Finite element analysis on tooth and periodontal stress under simulated occlusal loads», *Journal of Oral Rehabilitation*. doi: 10.1111/joor.12512.
- [32] A. Karimi, R. Razaghi, H. Biglari, S. M. Rahmati, A. Sandbothe, M. Hasani. (2019). «Finite element modelling of the periodontal ligament under a realistic kinetic

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- loading of the jaw system». Saudi Dental Journal. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sdetj.2019.10.005>.
- [33] (2019). Nomenclatura dentaria: el Código Internacional (FDI) [Figura]. Recuperado de <https://www.ilerna.es/blog/aprende-con-ilerna-online/sanidad/codigo-internacional-dientes-fdi/>.
- [34] Premolares y oclusiones en los premolares [Figura]. Recuperado de <https://image.slidesharecdn.com/premolaresyolcusionenlospermolares-120508160541-phpapp01/95/premolares-y-olcusion-en-los-permolares-5-728.jpg?cb=1336493674> (accedido ago. 13 2022).
- [35] G. Wang, M. Cong, X. Ren, H. Wen, y W. Qin, «Chewing-cycle trajectory planning for a dental testing chewing robot», *Int. J. Robot. Autom.*, vol. 34, abr. 2019, doi: 10.2316/J.2019.206-5388.
- [36] Best Dental Occlusion Stock Fotos [Figura] (accedido ago. 13 2022).
- [37] R. G. Craig, F. A. Peyton, y D. Johnson, «Comprehensive Properties of Enamel, Dental Cements, and Gold», 1961, doi: 10.1177/00220345610400051901.
- [38] D. J. Haines, «Physical properties of human tooth enamel and enamel sheath material under load», *J. Biomech.*, vol. 1, n.º 2, pp. 117-125, jul. 1968, doi: 10.1016/0021-9290(68)90014-6.
- [39] E. Mahoney, A. Holt, M. Swain, y K. NT, «The hardness and modulus of elasticity of primary molar teeth: An ultra-micro-indentation study», *J. Dent.*, vol. 28, pp. 589-94, nov. 2000, doi: 10.1016/S0300-5712(00)00043-9.
- [40] S. Dejsuvan, V. Sirimaharaj, y S. Wanachantarak, «Nanohardness and Elastic Modulus Properties of Enamel and Dentin of Primary Molars in Vitro, in People with Various Caries Experiences, Using a Nano-indentation Technique», vol. 42, n.º 1, p. 8 2021.

ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO I TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.

- [41] M. L. Oyen, Ed. *Handbook of nanoindentation with biological applications*. Singapore: Pan Stanford Pub, 2011.
- [42] F. A. Peyton, D. B. Mahler, y B. Hershenov, «Physical Properties of Dentin», *J. Dent. Res.*, 1952, doi: 10.1177/00220345520310031401.
- [43] R. G. Craig y F. A. Peyton, «Elastic and Mechanical Properties of Human Dentin», *J. Dent. Res.*, vol. 37, n.º 4, pp. 710-718, ago. 1958, doi: 10.1177/00220345580370041801.
- [44] S. Muslov, «Anisotropy of Poisson's Ratio of Dentin and Enamel», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 441, p. 012032, nov. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/441/1/012032.
- [45] S. Torrano, y D. Herrero Pérez. «Criterios de plasticidad y de rotura», pp. 65-66, 2011. https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5470/mod_resource/content/1/T5-criterios-plasticidad-rotura_v1.pdf (accedido may. 28 2022).
- [46] Objetivos de desarrollo sostenible. www.un.org. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/> (accedido ene. 29 2022).
- [47] Objetivos de desarrollo sostenible. www.un.org. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wpcontent/uploads/sites/3/2016/10/3_Spanish_Why_it_Matters.pdf (accedido ene. 29 2022).
- [48] Icono web 3 [Figura]. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2019/09/S-WEB-Goal-03.png>.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR
HERE.***
