

DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES MEDIANTE EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS EN DIENTES RESTAURADOS DIRECTA E INDIRECTAMENTE DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO ENDODÓNTICO

DISTRIBUTION OF STRAINS BY FINITE ELEMENT ANALYSIS IN DIRECTLY AND INDIRECTLY RESTORED TEETH AFTER ENDODONTIC TREATMENT

Felicita Mantilla Serna¹, Jimmy Málaga Rivera²

Mantilla F, Málaga J. Distribución de tensiones mediante el análisis de elementos finitos en dientes restaurados directa e indirectamente después de un tratamiento endodóntico. Kiru 2008, Vol4, N°1

RESUMEN

Objetivo: determinar la técnica restauradora que ofrece la mejor distribución de tensiones en dientes tratados endodónticamente, mediante el análisis de elementos finitos.

Material y método: se desarrolló el diseño o modelado de un premolar superior 3D en el programa CosmosWorks para el análisis de elementos finitos, en el cual se simuló una cavidad MOD para luego diseñarse las restauraciones. El análisis se realizó en el programa SolidWorks (SW). Sobre el modelo se aplicaron fuerzas verticales y oblicuas con respecto a la superficie, para poder observar el comportamiento de las tensiones creadas.

Resultados: los tres grupos presentaron una distribución de tensiones uniforme pero con picos de tensión en las siguientes zonas: Grupo N° 1 (grupo control), en la punta de cúspide vestibular y palatina, en la cresta marginal distal y mesial, además a nivel de la unión amelocementaria. El Grupo N° 2 (restaurado con técnica directa), en las crestas marginales, la unión amelocementaria y el borde superior de cavidad, en la resina a nivel del borde superior de la cara palatina y a nivel de los bordes externos de vestibular y distal. El Grupo N° 3 (restaurado con técnica indirecta), en la cara vestibular (tercio mesial y medio), en la cara palatina y distal (tercio oclusal y cervical), en la cara oclusal (cresta marginal mesial y la cresta triangular palatina) y en la parte superior de la pared vestibular de la cavidad MOD.

Conclusiones: la técnica de restauración directa genera una mejor distribución de tensiones a lo largo de todo el diente, en la resina compuesta y en la interface diente-resina, en comparación con la técnica indirecta.

Palabras clave: análisis de Elementos Finitos

ABSTRACT

Objective: to determine the restorative technique that provides better distribution of stresses in endodontically treated teeth for finite element analysis.

Material and method: we developed the design or modeling of a 3D upper premolar on the agenda for COSMOSWorks finite element analysis, which simulated an MOD cavity, and the restorations were created. The analysis was performed in the program SolidWorks (SW), on the model was applied forces in vertical and oblique to the surface, to observe the behavior of the tensions exerted by these forces.

Results: the findings from this study demonstrate that the three groups presented a uniform distribution of tension but with peaks of tension in the following areas: Group No. 1 (control group) at the tip of buccal cusp and palate in the mesial and distal marginal ridge, also at the level of union enamel-cement. Group No. 2 (restored by direct technique), marginal ridges, and the union enamel.cement the upper cavity in the resin at the top edge of the palatal side and at the outer edges of vestibular and distal. The Group No. 3 (restored by indirect technique) on the vestibular side (mesial third and a half) on the face and palate distal (third occlusal and cervical), in occlusal view (mesial marginal ridge triangular ridge and palate) and the top of the buccal cavity wall MOD.

Conclusions: the results of tests, including two restoration techniques directly and indirectly show that the first generates a better distribution of stress throughout the tooth, the composite and the tooth-composite resin interface.

Key words: finite Element Analysis

¹ Cirujano Dentista USMP

² Cirujano Dentista USMP

Correspondencia:

Jimmy Málaga

Correo electrónico: jimmycdma@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

El Análisis por Elementos Finitos (FEA) ha sido ampliamente utilizado en ingeniería desde los años 60, y constituyen una herramienta importante para

comprender del comportamiento mecánico de los materiales utilizados en la industria¹. Los avances en la tecnología nos ofrecen nuevas alternativas y tendencias, como es la reciente aplicación del FEA en el área de odontología para

la investigación de los materiales dentales. En algunos estudios bidimensionales de elementos finitos, el diente se modela como una simplificación de la configuración rectangular y conoide; actualmente, se han desarrollado técnicas de imagen digital, que ofrecen métodos más eficientes para el desarrollo de modelos anatómicamente exactos².

Actualmente los materiales dentales y las técnicas disponibles proporcionan nuevas alternativas de tratamiento, como es el caso de restauraciones de dientes tratados endodónticamente. Diversos estudios demuestran que no siempre es necesario colocar un poste o espigo en piezas con tratamiento de endodoncia antes de su restauración^{3,4,5,6}.

El primer artículo de Análisis con Elementos Finitos fue publicado por Farah y col en 1973⁷. Este tipo de análisis -y más aun la versión con imágenes 3D- no se encuentra ampliamente desarrollado en nuestro medio odontológico, debido a las siguientes razones: 1) La dificultad asociada a la elaboración de modelos, ya que el diente a ser analizado presenta distintas configuraciones morfológicas, y 2) La dificultad de reproducir las propiedades mecánicas de los tejidos constituyentes del diente: esmalte, dentina, cemento y pulpa.

El presente estudio compara por medio del análisis de elementos finitos la distribución de las tensiones en dientes restaurados con la técnica directa e indirecta después de un tratamiento endodóntico, con la finalidad de determinar la técnica que ofrece la mejor distribución de las tensiones.

MATERIAL Y MÉTODO

La investigación es de tipo experimental, prospectivo, transversal y comparativo. Para el estudio se realizó el modelo 3D de un primer premolar superior mediante el programa CosmosWorks, cuyas formas se tomaron de las fotografías y radiografías obtenidas de una diente real. El modelo fue enmallado para poder ser llevado al programa SolidWorks 2007, y en este programa se procedió a crear un archivo en el cual se incluyeron las propiedades mecánicas de los materiales y tejidos a analizar, para luego realizar el análisis de elementos finitos.

La muestra fue dividida en tres grupos de una pieza dentaria cada uno:

- Grupo 1: Primer premolar superior sin patología dentaria (grupo control).
- Grupo 2: Primer premolar superior con tratamiento de endodoncia, restaurado con técnica directa (resina compuesta)
- Grupo 3: Primer premolar superior con tratamiento de endodoncia, restaurado con técnica indirecta (incrustaciones tipo Inlay - Cerómero).

Preparación de la pieza dentaria:

El diente fue conservado en formol para lograr su preservación. Seguidamente se procedió a realizar la limpieza de la pieza dentaria con un micromotor de baja velocidad marca **LYNX**, con una escobilla y pasta profiláctica, para así poder retirar los restos orgánicos. Posteriormente se realizaron tomas radiográficas de la pieza dentaria en distintas orientaciones (mesial, distal, vestibular y platino), así como tomas fotográficas también en distintas orientaciones (vestibular, distal, apical y oclusal).

Diseño geométrico

El primer paso en la elaboración de modelos para el análisis de elementos finitos es la representación geométrica en el ordenador¹. En algunos estudios bidimensionales de elementos finitos, el diente se modela como una simplificación de la configuración rectangular y conoide. Recientemente se está haciendo uso de software especializado para la transformación directa del modelo a información tridimensional. Como ya se mencionó, existen hoy en día tecnologías que transforman la información de un modelo (diente) en piezas analizables por programas 3D como son los escáneres 3D⁹.

En este caso el modelado se hizo de la manera convencional, sin la ayuda de escáneres. Para dicho modelado se utilizó el software para ingeniería CosmosWorks, donde se siguieron determinadas restricciones de medidas y de forma. Por ejemplo, en el caso de los espesores tenían que ser variables, lo cual se obtuvo mediante el análisis de espesores (esmalte, dentina, cemento y pulpa) que es un complemento de SolidWorks.

Las medidas se realizaron con un micrómetro, y las formas se tomaron de las fotos obtenidas de la muestra (primer premolar superior) en diferentes posiciones y ángulos, para luego llevarlas al ordenador en diferentes planos tanto estándar como creados.



Figura 1: vista I



Figura 2: vista apical



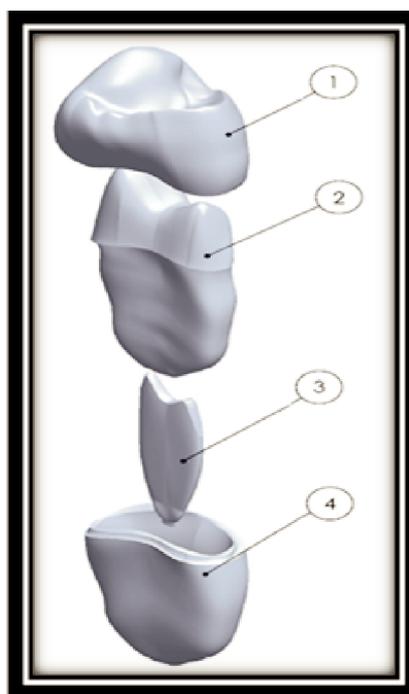
Figura 3: vista oclusal



Figura 4: frontal

El mismo procedimiento se utilizó para diseñar las superficies de separación entre esmalte, dentina, cemento radicular y pulpa, las cuales conforman cada una un sólido que compone el modelo. Para cada tejido dentario se confeccionó un sólido diferente;

una vez que se obtuvieron los cuatro sólidos se procedió a unirlos para obtener una sola estructura, que generó el modelado del primer premolar superior.



1. Esmalte
2. Dentina
3. Pulpa
4. Cemento

Figura 5: vista computarizada de las estructuras que conforman el modelado

Luego de realizar el modelado del primer premolar superior, se confeccionó el modelado de lo que sería la restauración tanto para la técnica directa (resina compuesta) como para la técnica indirecta

(incrustación inlay). Para la preparación parcial intracoronaria: Cavity Clase II – MOD se tomaron en cuenta las siguientes indicaciones:

Técnica directa: Resina Compuesta:

- Caja oclusal: Ancho vestíbulo-palatino no mayor a un tercio de la distancia intercúspidea, con una profundidad de 2.5 mm. El tallado se realizó con una fresa diamantada cilíndrica punta redonda N° 10, con una pieza de mano de alta velocidad Kavo.
- Caja proximal: Profundidad de 4 mm., y el piso gingival con un ancho de 1 mm. El tallado se realizó con una fresa diamantada cilíndrica punta redonda N° 10.

fresa diamantada cónica punta redonda 2131G, con una pieza de mano de alta velocidad Kavo.

- Caja proximal: Profundidad de 4 mm., y el piso gingival con un ancho de 1 mm. El tallado se realizó con una fresa diamantada cilíndrica punta redonda 2133.

Se realizó un modelo de la preparación parcial intracoronaria: Cavidad Clase II – MOD en una premolar superior, tanto para la técnica directa (resina compuesta) como para la técnica indirecta (incrustación Inlay).

Técnica indirecta:Incrustación tipo inlay:

- Caja oclusal: Ancho vestíbulo-palatino no mayor a un tercio de la distancia intercúspidea, con una profundidad de 2.5 mm. El tallado se realizó con una

Una vez que se realizó el procedimiento del modelado de la cavidad en el primer premolar superior se procedió a realizar el modelado del material restaurador.

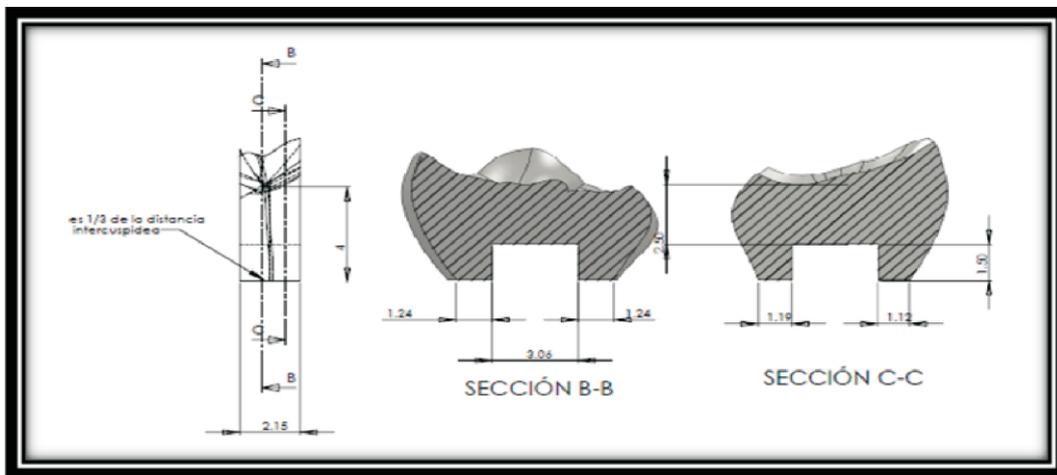


Figura 6: técnica indirecta:Incrustación tipo inlay

Procedimiento de Análisis de Elementos Finitos:

1.- Definir las características del material de cada componente: El programa SolidWorks (SW) entre una de sus opciones presenta una biblioteca en la cual se encuentran incluidas las propiedades de algunos materiales como son el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, entre otras. De este modo

podemos seleccionar un material y el sistema nos indicará sus propiedades mecánicas y las aplicará al sólido diseñado. En este caso se tuvo que crear una nueva biblioteca para poder insertar en el programa las propiedades de los tejidos que conforman el diente y los materiales restauradores que se utilizaron en el estudio, ya que no se encontraban incluidas en la biblioteca del programa^{10,11,12,13}.

Tabla 1

MATERIAL / COMPONENTE	MODULO ELASTICO(MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
DENTINA	18.6	0.32
ESMALTE	84.1	0.33
CEMENTO	18.6 (ASUMIDO)	0.31
PULPA	2.7	0.45
OPALIS	9.9	0.3
ADORO	7	0.3

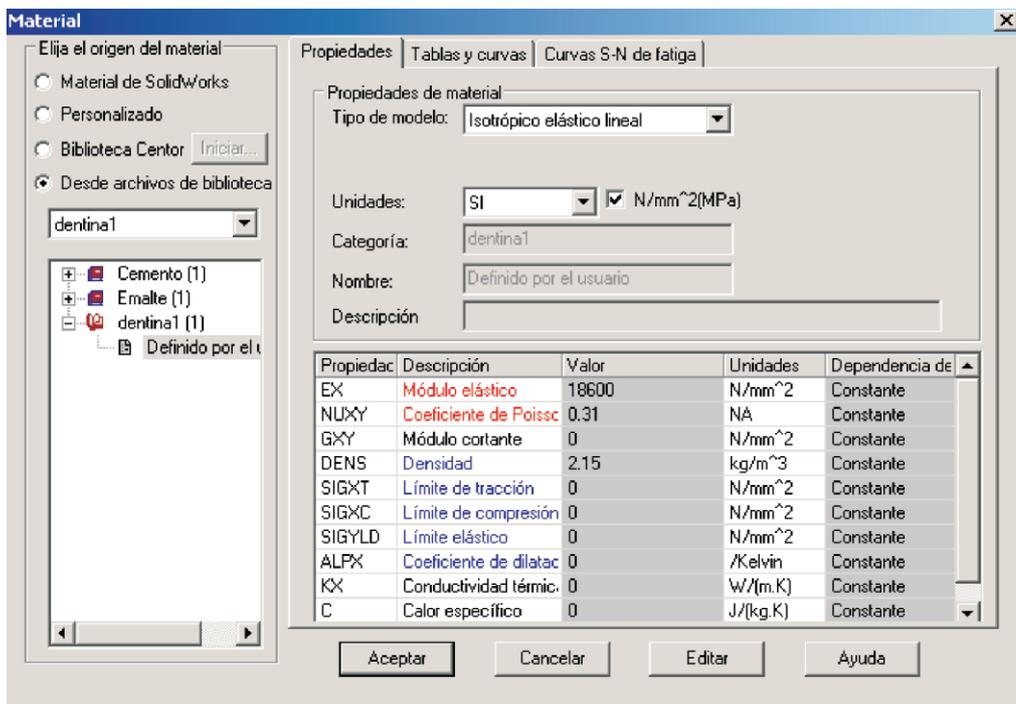


Figura 7: las propiedades de los materiales presentan una gran influencia en la distribución de tensiones de una estructura. La siguiente tabla presenta las propiedades mecánicas de cada uno de los tejidos y materiales restauradores utilizados en el análisis de elementos finitos.

2.- Definir las cargas y restricciones que se utilizaron: La carga fue la máxima que resiste un bicúspide. Esta carga fue aplicada sobre las caras de la superficie

intercuspídea. Además, se coloraron restricciones a nivel de la raíz para mantener a la pieza fija en su posición.

→ Indican que está siendo restringido como fijo toda el área sombreada.
 → Indican la dirección de dicha fuerza distribuida.

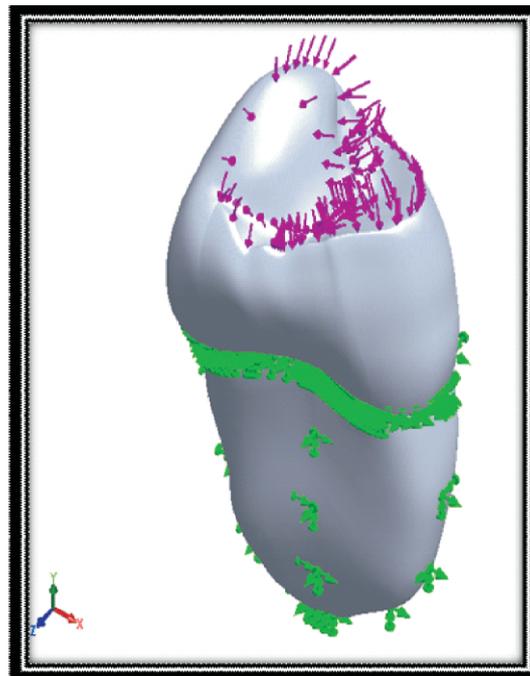


Figura 8: aplicación de fuerzas y restricciones

3.- Enmallado: En el análisis de elementos finitos el modelado se divide mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos, los cuales se encuentran conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o «nodos». Este complejo sistema de puntos configuran una red llamada «malla», la cual está programada para representar al material y las propiedades de su estructura que definen cómo reaccionará ante ciertas fuerzas (9). El modelado del premolar superior resultó complicado debido a su complejidad

morfológica (forma asimétrica y variable). Así mismo, los sólidos no compartían el mismo estándar de tamaño de malla, por que el esmalte, la dentina, la pulpa y el cemento presentaban distinta morfología y tamaño de modelado. Por esta razón se recurrió a un tipo de malla incompatible, para que las mallas de cada uno de los sólidos (esmalte, dentina, cemento y pulpa), sean independientes, y además adaptativa, ya que cada componente presentaba una geometría irregular.

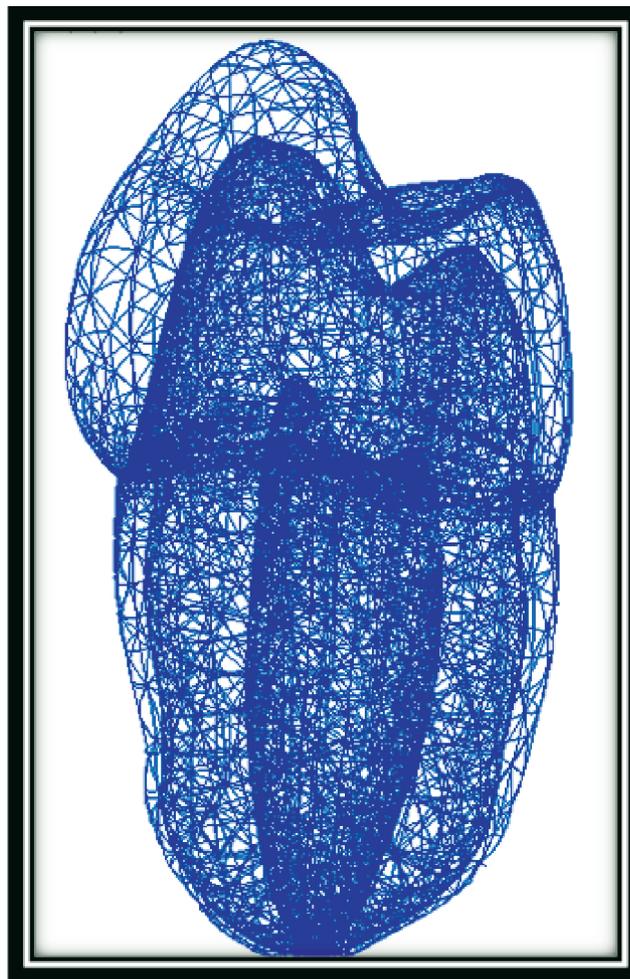


Figura 9: vista computarizada del enmallado del primer premolar superior modelo PLC-05

4.- Los contactos: Se optó por considerar que el contacto global entre componentes sea una conexión entre los miembros estructurales que impidan la rotación y el desplazamiento en cualquier dirección de uno de los miembros con respecto a los demás.

5.- Una vez obtenido el modelo según las consideraciones mencionadas, se ejecutó en el

programa SolidWorks (SW) el análisis de elementos finitos de la distribución de tensiones en el diente.

Los datos fueron procesados en una computadora Pentium IV Windows 2007, en la cual se trabajó con los siguientes programas: SolidWorks (SW) para el análisis de elementos finitos, CosmosWorks para realizar el modelado de cada uno de los sólidos

(esmalte, dentina, pulpa y cemento), Word 2007 para procesar el texto, y Microsoft Photo Editor para hacer algunas modificaciones en las imágenes obtenidas de las radiografías dentales y las tomas fotográficas.

RESULTADOS

La muestra fue dividida en tres grupos de una pieza dentaria cada uno:

- Grupo 1: Primer premolar superior sin patología dentaria (grupo control).
- Grupo 2: Primer premolar superior con tratamiento de endodoncia, restaurado con técnica directa (resina compuesta «OPALLIS»)
- Grupo 3: Primer premolar superior con tratamiento de endodoncia, restaurado con técnica indirecta (incrustaciones tipo Inlay – Cerómero «SRADORO»).

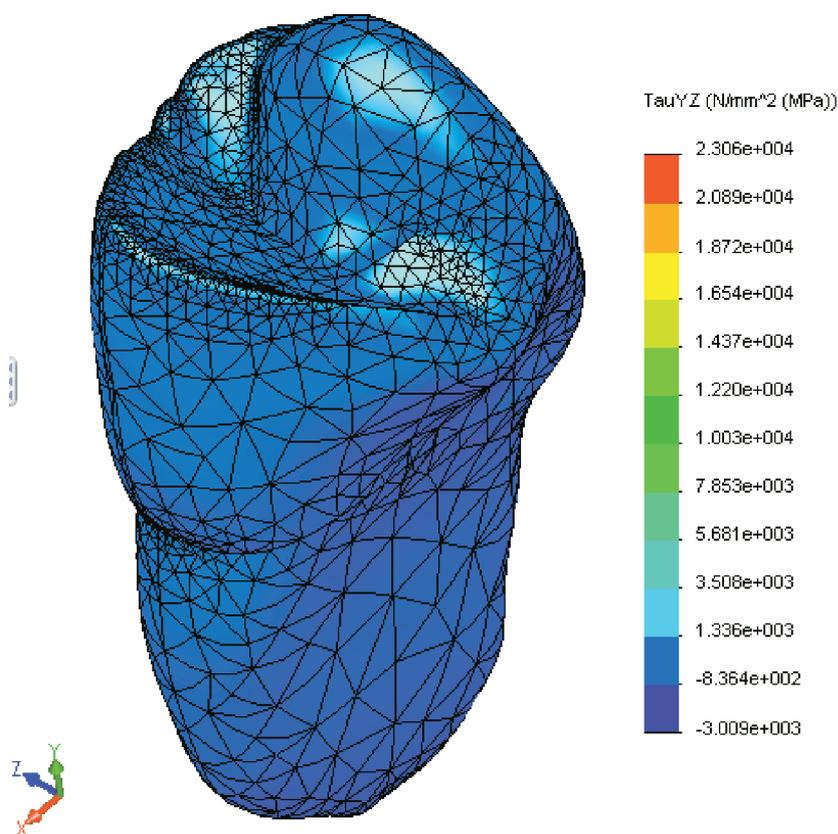


Figura 10: grupo 1: primer premolar superior sano. Distribución de tensiones en el plano YZ

Los valores de la tensión fluctúan entre $3.508e+003$ y $-3.009e+003$ N/mm², generando una distribución de éstas en forma homogénea en todo el diente, lo cual se ve representado por el color azul en su totalidad, encontrándose excepciones en zonas con mayor

tensión que se observan en color turquesa en la cara oclusal, exactamente en la punta de cúspide vestibular y palatina, y la cresta marginal distal y mesial.

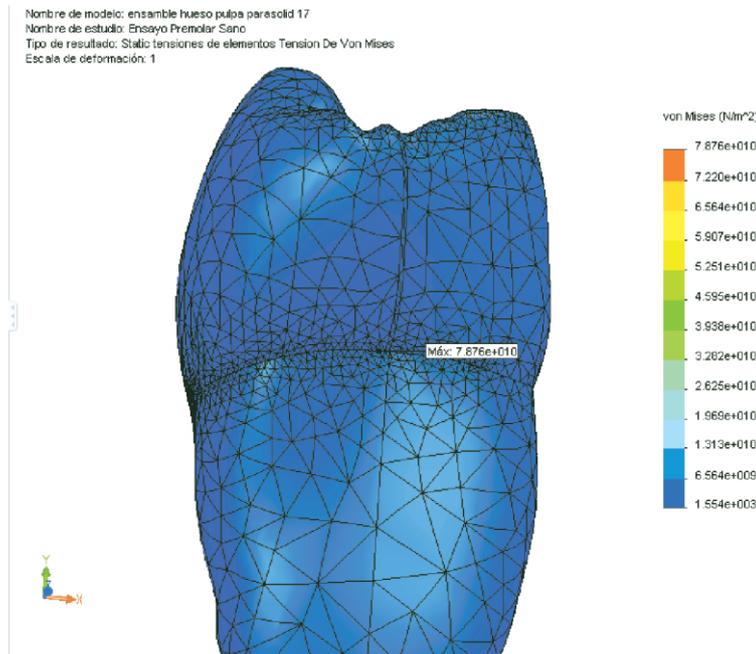


Figura 11: grupo 1: primer premolar superior sano. Distribución de tensiones en el plano XZ

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.313e+010$ y $1.554e+003$ N/mm², generando una distribución de estas casi homogénea en todo el diente, representado

por el color azul, encontrándose mayor tensión, zonas con color azul un poco más claros en la cara mesial y a lo largo de la raíz.

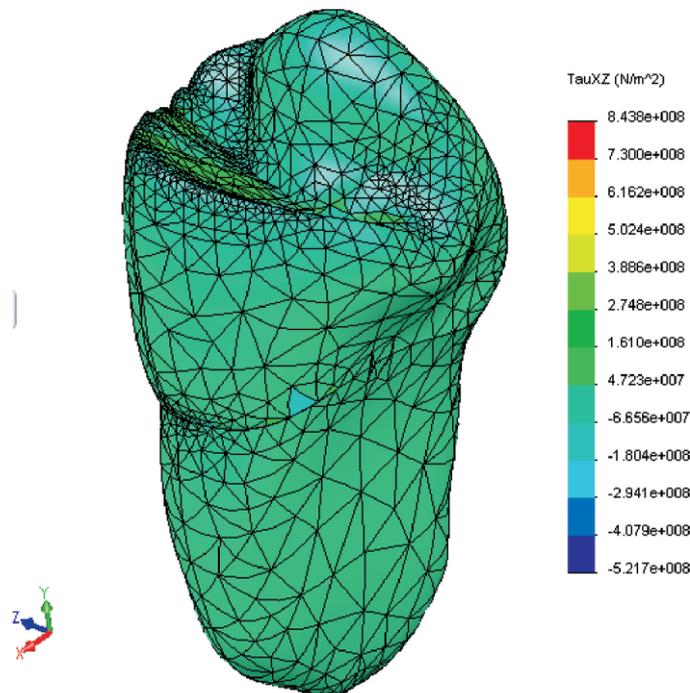


Figura 12: grupo 1: primer premolar superior sano. Tensión cortante en dirección Z en el plano YZ

Los valores de la tensión fluctúan entre $3.886e+008$ y $-2.941e+008$ N/mm², generando una distribución de estas casi homogénea en todo el diente, lo cual se puede distinguir por la coloración verde claro. Se observa menor tensión en la cara oclusal. También se distinguen las zonas de color turquesa, exactamente

en la punta de cúspide vestibular y palatina, en la cresta marginal distal y mesial, y en la cresta triangular de la cúspide vestibular. Además, se genera zonas con mayor tensión en la cresta marginal mesial del diente y en la cresta triangular de la cúspide palatina, las cuales la podemos identificar por el color verde claro.

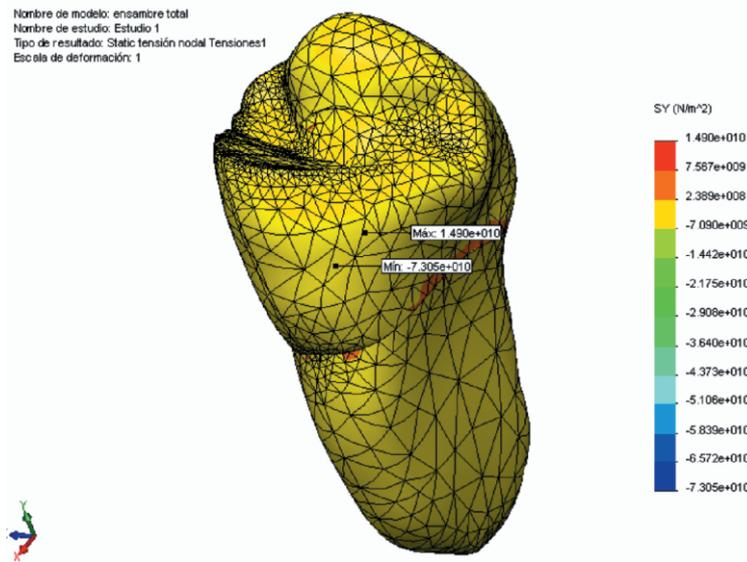


Figura 13: grupo 1: primer premolar superior sano. Distribución de tensiones en Y

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.490e+010$ y $-7.305e+010$ N/mm², distribuyéndose casi homogéneamente en todo el diente, lo cual se puede identificar por el color amarillo. Además, se

encontraron ciertas áreas mínimas con mayor tensión en la cara oclusal y también se encontró zonas con mayor tensión a nivel de la unión amelo cementaria que se representan por el color rojo.

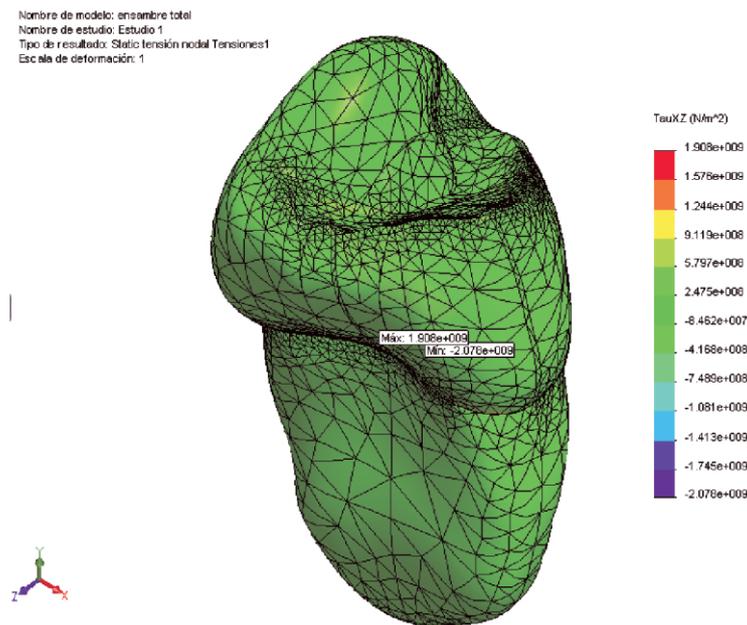


Figura 14: grupo 1: primer premolar superior sano. Distribución de tensiones en dirección Z en el plano YZ

Los valores de la tensión fluctúan entre $5.797e+008$ y $-7.489e+009$ N/mm². Este es uno de los análisis que presentó la distribución de tensiones en forma

homogénea en todo el modelo, representado por el color verde.

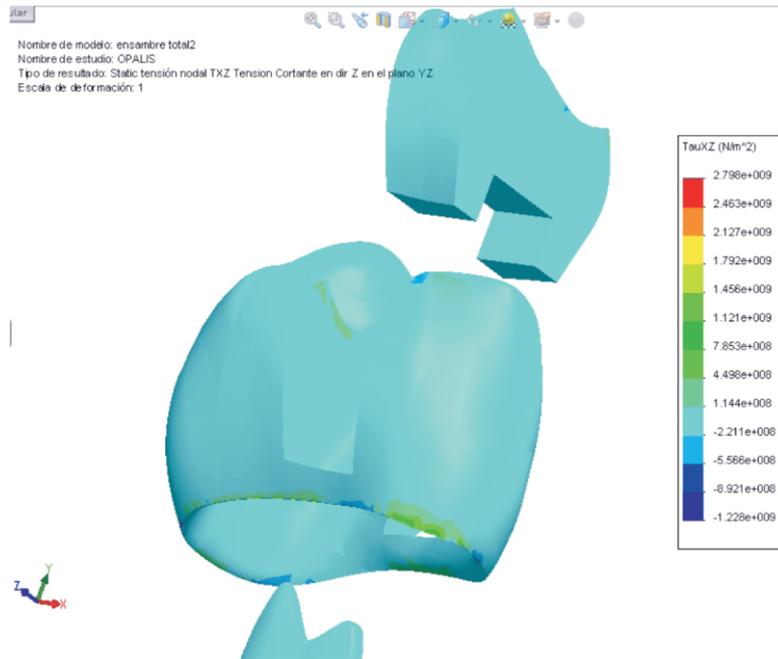


Figura 15: grupo 2: primer premolar superior restaurado con técnica directa. Tensión cortante en dirección Z plano YZ.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría que se encuentran en $-2.211e+008$ N/mm², representado por el color turquesa, el cual se distribuye de forma homogénea, con variaciones a nivel de la unión amolocementaria que presentó dos

tonalidades verde claro y azul oscuro. En el borde superior de cavidad en la cara vestibular por distal se observa el color verde claro, lo cual indica que es una zona con aumento de tensión. En la resina existe mayor tensión en la parte media del borde superior de la cara palatina, la cual se observa de color azul.

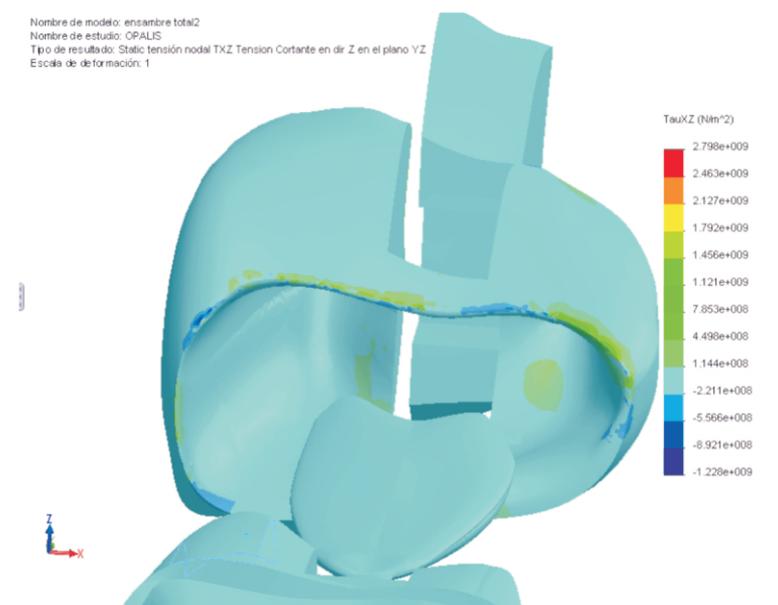


Figura 16: grupo 2: primer premolar superior restaurado con técnica directa. Tensión cortante en dirección Z plano YZ.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría se encuentran en $-2.211e+008$, representadas por el color turquesa. Las tensiones se

distribuyen de forma homogénea, con variaciones a nivel de la unión amelocementaria que presentó dos tonalidades verde claro y azul oscuro, en la cual a la vez existen variaciones en ciertas zonas.

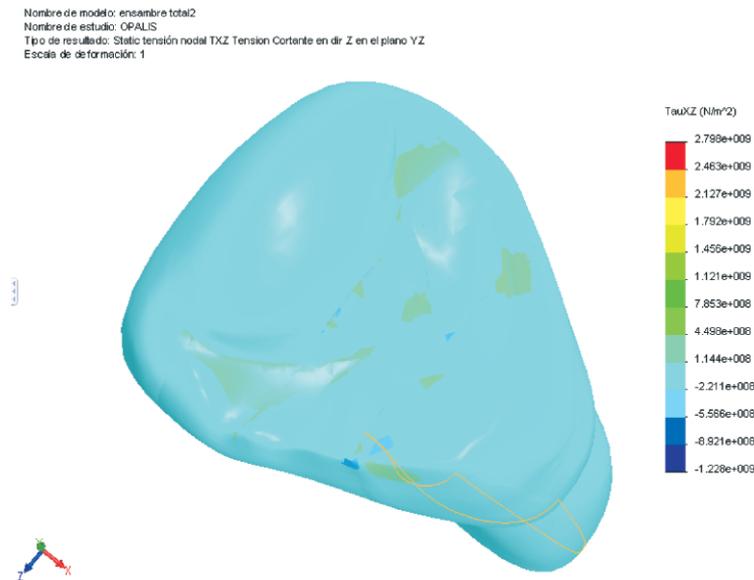


Figura 17: grupo 2: primer premolar superior restaurado con técnica directa. Tensión cortante en dirección Z plano YZ.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría se encuentra en $-2.211e+008$ N/mm², representado por el color turquesa. Las tensiones se distribuyen de forma homogénea con variaciones en la cara oclusal; se presenta mayor tensión a nivel de

las crestas marginales, representadas por el color verde claro, y en la resina compuesta OPALLIS se presenta variación a nivel de los bordes externos de la resina tanto por vestibular como por distal, representados por el color verde claro y el azul.

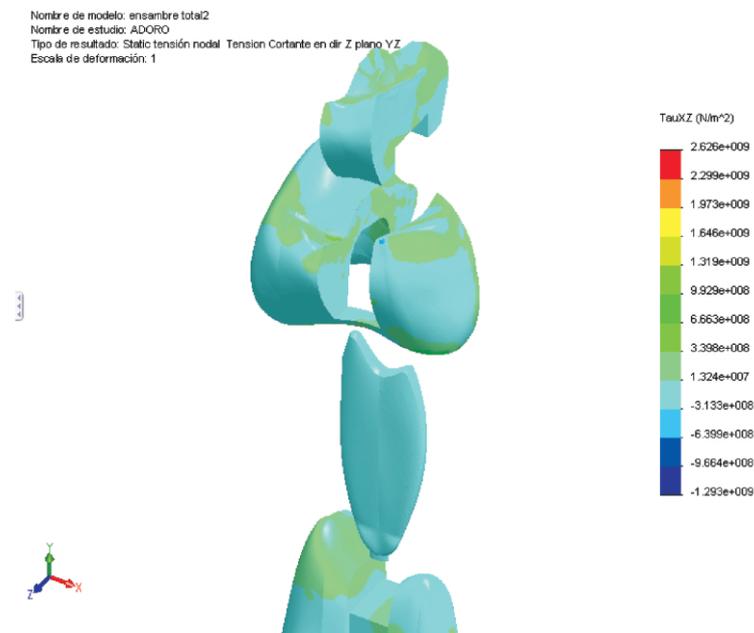


Figura 18: grupo 3: primer premolar superior restaurado con técnica indirecta. Tensión cortante en dirección Z plano YZ.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$ N/mm² representadas por el color turquesa, con variaciones en la cara distal y en el tercio oclusal y cervical, en la cara oclusal en la cresta marginal mesial y la cresta triangular palatina, en el tercio oclusal de la cara palatina, y en la parte

superior de la pared vestibular y en el piso pulpar de la cavidad MOD, representado por el color verde.

A nivel de la incrustación tipo Inlay también se presentó zonas con mayor tensión, representadas en color verde en la cara oclusal.

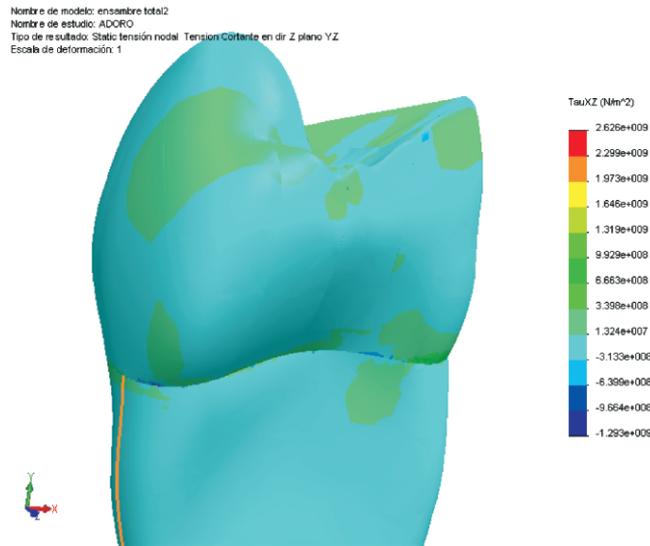


Figura 19: grupo 3: primer premolar superior restaurado con técnica indirecta. Tensión cortante en dirección Z plano Y.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$ N/mm², las cuales se distribuyen de forma homogénea, y representadas por el color turquesa, con variaciones en la cara distal

del diente en el tercio oclusal y cervical, en la cara vestibular en el tercio distal, y en la cara oclusal en la cresta marginal mesial y la cresta triangular palatina, que se encuentran representadas por el color verde claro.

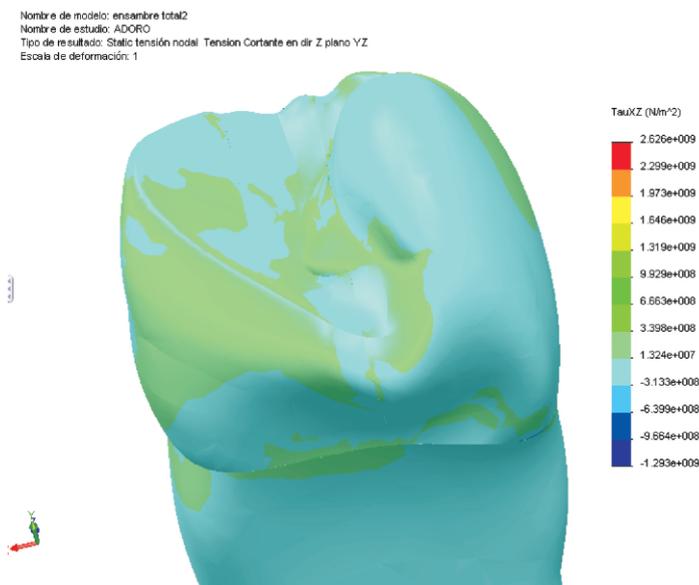


Figura 20: grupo 3: primer premolar superior restaurado con técnica indirecta. Tensión cortante en dirección Z plano YZ.

Los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$, que se distribuyen de forma homogénea y representadas en tono turquesa, con variaciones en la cara palatina del diente que en su mayoría es de $1.319e+009$ N/mm², representado por el color verde claro. También se presenta esta coloración en la cara vestibular en el tercio mesial y medio. Además, se presenta la misma tonalidad en la cara oclusal, en la cúspide palatina y vestibular, y en la interface prótesis-diente.

DISCUSIÓN

El concepto de elementos finitos surgió gracias a los avances en el análisis estructural de las aeronaves. Este método consiste en un modelo informático del material o diseño que es tensado y analizado para conseguir resultados específicos; es un método eficiente para resolver problemas de cálculo de esfuerzos y desplazamientos de estructuras, ya sean planas o espaciales^{2,9}. La presente investigación se realizó en base a estudios previos sobre Elementos Finitos en Odontología, encontrándose que este tema no ha sido ampliamente desarrollado en nuestro medio^{10,14,15,16}.

Los hallazgos obtenidos en este estudio demostraron que la primera premolar permanente sana mantuvo una distribución de tensiones en su mayoría uniforme, pero con picos de tensión en la cara oclusal. Como se observa en el gráfico de «Distribución de tensiones en el plano YZ», los valores de tensión fluctúan entre $3.508e+003$ y $-3.009e+003$ N/mm², representado por el color azul en su totalidad, encontrándose excepciones en zonas con mayor tensión que se observan en color turquesa (cara oclusal). En el gráfico de «Distribución de tensiones en el plano XZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.313e+010$ y $1.554e+003$ N/mm², representado por el color azul, encontrándose mayor tensión en zonas con color azul (raíz). En el gráfico de «Distribución de tensión cortante en dirección Z en plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $3.886e+008$ y $-2.941e+008$ N/mm², representado por el color verde claro; se encuentra una menor tensión en la cara oclusal, de color turquesa, (en la punta de cúspide vestibular y palatina, en la cresta marginal distal y mesial, y en la cresta triangular de la cúspide vestibular). Además, se genera zonas con mayor tensión en la cresta marginal mesial del diente y en la cresta triangular de la cúspide palatina, las cuales la podemos identificar por el color verde claro.

En el gráfico de «Distribución de tensión normal en Y», los valores de la tensión fluctúan entre $1.490e+010$ y $-7.305e+010$ N/mm², representado por el color amarillo. Además, se encontraron ciertas áreas con mayor tensión en la cara oclusal y a nivel de la unión amelocementaria que se representan por el color rojo. En el gráfico de «Distribución de tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $5.797e+008$ y $-7.489e+009$ N/mm², representado por el color verde.

En cuanto al premolar con tratamiento de endodoncia restaurado con técnica directa (resina compuesta), mantiene una distribución de tensiones en su mayoría uniforme pero con picos de tensión en el diente a nivel de las crestas marginales y de la unión amelocementaria, en el borde superior de cavidad en la cara vestibular por distal. En la resina existe mayor tensión en la parte media del borde superior de la cara palatina y a nivel de los bordes externos por vestibular como por distal. Como se observa en el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría que se encuentran en $-2.211e+008$ N/mm², representado por el color turquesa, la cual se distribuye de forma homogénea, con variaciones a nivel de la unión amelocementaria que presentó dos tonalidades verde claro y azul oscuro; con respecto a la cavidad, el borde superior de la cara vestibular por distal se observa de color verde claro, lo cual indica que es una zona con aumento de tensión. En la resina existe mayor tensión en la parte media del borde superior de la cara palatina, la cual se observa de color azul. En el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría se encuentran en $-2.211e+008$ N/mm², representado por el color turquesa, con variaciones a nivel de la unión amelocementaria que presento dos tonalidades verde claro y azul oscuro. En el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.792e+009$ y $-1.228e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría se encuentra en $-2.211e+008$ N/mm², representado por el color turquesa, con variaciones en la cara oclusal; en el diente se presenta mayor tensión a nivel de las crestas marginales, representados por el color verde claro, y en la resina compuesta OPALLIS se presenta variación a nivel de los bordes externos de la resina tanto por vestibular como por distal, representados por el color verde claro y el azul.

En cuanto a la premolar con tratamiento de endodoncia restaurado con técnica indirecta (incrustación Inlay - ADORO) se mantiene una distribución de tensiones en su mayoría uniforme pero con picos de tensión en el diente en la cara vestibular en el tercio mesial y medio, en la cara palatina, en la cara distal del diente en el tercio oclusal y cervical, en la cara oclusal en la cresta marginal mesial y la cresta triangular palatina, y en la parte superior de la pared vestibular de la cavidad MOD. Como se observa en el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z, plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$ N/mm², representadas de color turquesa, con variaciones en la cara distal del diente en el tercio oclusal y cervical, en la cara oclusal en la cresta marginal mesial, en la cresta triangular palatina, en el tercio oclusal de la cara palatina, en la parte superior de la pared vestibular y en el piso pulpar de la cavidad MOD, representado por el color verde. A nivel de la incrustación tipo Inlay también se presentó zonas con mayor tensión que se encuentran indicadas de color verde, en la cara oclusal. En el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$ N/mm², representadas por el color turquesa, con variaciones en la cara distal del diente, en el tercio oclusal y cervical, en la cara vestibular en el tercio distal, en la cara oclusal en la cresta marginal mesial y en la cresta triangular palatina, que se encuentran representadas por el color verde claro. En el gráfico de «Distribución de tensiones: Tensión cortante en dirección Z plano YZ», los valores de la tensión fluctúan entre $1.319e+009$ y $-1.293e+009$ N/mm², generando tensiones que en su mayoría están en $-3.133e+008$, que se distribuyen de forma homogénea, y se puede observar en tono turquesa, con variaciones en la cara palatina del diente que en su mayoría es de $1.319e+009$ N/mm², representado por el color verde claro; también se presenta esta coloración en la cara vestibular en el tercio mesial y medio. Además, se presenta la misma tonalidad en la cara oclusal, en la cúspide palatina y vestibular, y en la interface prótesis-diente.

Magne (2003) realizó un estudio en el cual empleó el modelado bidimensional por elementos finitos con el fin de simular la flexión cuspidéa y las tensiones en la superficie y en la interface diente-restauración de un molar superior restaurado mediante tres materiales

de restauración (porcelana feldespática, resinas compuestas con módulos elásticos altos y bajos) y distintas preparaciones dentales (incrustaciones intra y extracoronarias pequeñas y grandes). Se aplicaron de forma simulada dos cargas oblicuas de 25 N sobre las cúspides. Todos los materiales y preparaciones dentales mostraron patrones similares de tensión tangencial de superficie, con una zona de compresión definida en las crestas marginales de las cúspides, una zona de tracción en la superficie oclusal y picos de tensión por compresión en la unión amelocementaria. La resina compuesta de bajo módulo elástico mostró tensiones por tracción reducidas en su superficie, pero un aumento de la tracción en la interface entre dentina y adhesivo en comparación con la porcelana. Todos los tipos de incrustaciones extracoronarias mostraron un predominio de tensiones por compresión en la interface, mientras que las intracoronarias presentaron un predominio de tensiones por tracción. La tensión en la interface del material restaurador con la dentina se debe a la flexibilidad del material. Únicamente la incrustación extracoronaria grande de porcelana mostró una compresión casi pura en la interface. Los dientes restaurados con resina compuesta mostraron una flexión coronaria aumentada, mientras que los restaurados con porcelana presentaron una mayor rigidez coronaria. Las incrustaciones intra y extracoronarias de porcelana se caracterizaron por mayores tensiones nocivas en la superficie oclusal, pero una mejor protección potencial frente a la descementación en la interface dentina-restauración en comparación con las incrustaciones intra y extracoronarias de resina compuesta. Las incrustaciones de porcelana parecen ser la mejor opción para la restauración de dientes posteriores dañados de forma severa¹⁴.

El presente estudio coincide con el de Magne, puesto que los materiales y preparaciones dentales mostraron patrones similares de distribución de tensiones, con una zona definida en las crestas marginales y en las puntas de cúspides (cara oclusal) y en la unión amelocementaria.

Butzke y col. (2007) evaluaron la respuesta de dientes premolares superiores sanos y preparados a través del análisis fotoelástico. Con esta finalidad se crearon modelos fotoelásticos con diferentes configuraciones de preparación cavitaria, y esos cuerpos se sometieron a carga oclusal en máquina de ensayo universal asociado al polariscopio circular para el análisis de una distribución de las tensiones. En el modelo fotoelástico del diente sano (grupo I), se tuvo

concentración de tensiones en el esmalte en la cúspide palatina, disminuyendo de intensidad en la región cervical envolviendo áreas correspondientes al esmalte y a la dentina. En el modelo del grupo II, presentó tensión en toda la región correspondiente a la cúspide palatina y al piso de la cavidad. En el modelo fotoelástico representativo del grupo III, se tuvo tensión a lo largo de la cavidad D-O con áreas de mayor intensidad en el piso de la misma, próximo al cono pulpar. En la región cervical, con mayor intensidad en la porción palatina, y franjas difusas en la porción vestibular. En el modelo del grupo IV, presento franjas fotoelásticas con coloración en la cavidad MOD, porción interna de las cúspides y piso de la cavidad; y en la porción cervical por vestibular. Los autores concluyen que la configuración de la preparación cavitaria es factor importantísimo en la distribución de las tensiones. Cuanto mayor la remoción de la estructura dentaria, peor será el comportamiento mecánico del remanente¹⁷.

Los resultados coinciden con el presente estudio, debido a que el grupo IV (cavidad MOD), presenta franjas con coloración en la porción interna de las cúspides, en el piso de la cavidad, y en la porción cervical del diente; al igual que el grupo 2 y 3 presenta zonas con otro tipo de color en la cara oclusal como son la cresta triangular palatina del premolar con tratamiento de endodoncia restaurado con técnica indirecta (incrustación Inlay - ADORO); y la unión amelocementaria en el caso del premolar con tratamiento de endodoncia restaurado con técnica indirecta y directa.

Magne (2006) propone una nueva geometría de adquisición para facilitar la fabricación de modelos de elementos finitos. Se obtuvieron las imágenes de una molar mandibular por medio de un escaneado con Skyscan 1072 de alta resolución micro-CT escáner. Se simuló diferentes cavidades (MO/MOD y el acceso endodóntico) y restauraciones (porcelana feldespática e incrustaciones de resina compuesta). La deformación de cúspide se midió con diferentes restauraciones y correlacionados con los datos experimentales para la validación de modelos y optimización, presentándose cinco modelos diferentes. La aplicación de fuerza entre las cúspides fue de 100 N; la carga varió de 0,4 μm para de diente totalmente sano, 9-12 μm para las piezas con cavidad MO y MOD, a 12-21 μm para las piezas con cavidad MO y MOD con acceso de endodoncia. Las piezas que recibieron una restauración de porcelana MOD presentaron 100% de rigidez de cúspide (0,4 μm con ampliación en cúspide de 100 N), mientras que la

resina compuesta permitió una recuperación parcial de la cúspide estabilización (1,3 μm con ampliación en cúspide de 100 N). También se presentó distribución de tensiones similares entre el diente natural y el diente con restauración MOD de cerámica, mientras que el diente con cavidad MOD con tratamiento de endodoncia presentó aumento de tensiones en la porción interna de las cúspides y piso de la cavidad; el diente con cavidad MOD presentó mayor tensión en la porción interna de las cúspides y piso de la cavidad sobre casi toda la superficie. El autor concluye que el método descrito puede generar modelos precisos de dientes molares y restauraciones con distintos materiales y modelos cavitarios, además de ser un método rápido y aplicable a distintas situaciones¹⁰.

Estos hallazgos presentan relación con el presente estudio, debido a que el molar mandibular con cavidad MOD y tratamiento de endodoncia presentó aumento de tensiones en la porción interna de las cúspides y piso de la cavidad, lo cual se observa con cambios de coloración en dichas zonas.

Soares (2008) analizó la influencia del diseño de la cavidad y el material restaurador sobre la distribución del estrés y la tensión en premolares maxilares bajo condiciones de carga oclusal. Para medir la tensión de prueba, se prepararon 21 especímenes como se describe en el presente estudio (n = 3). Dos extensímetros estaban fijos en la cúspide bucal (B) y palatina (P) de cada espécimen adherido con cianoacrilato. Las muestras fueron sometidas a cargas axiales de compresión a una velocidad de 0,5 mm / min, utilizando una esfera de 6 mm, a un límite máximo de 150 N en una máquina universal de ensayos. Los valores obtenidos fueron sometidos a ANDEVA de 2 vías y la prueba Dunnet (alfa = .05). Para el análisis de elementos finitos, se generó un modelado bidimensional de los siguientes modelos: MODd (preparación MOD directa), MODi, (preparación MOD indirecta); AM, MODd (restaurado con amalgama de plata); CR, MODd (restauradas con resina compuesta), LPR, MODi (restaurado con resina compuesta de laboratorio), y LGC, MODi (restaurado con leucita reforzado con vidrio de cerámica). Cada uno correspondiente a uno de los grupos experimentales de este estudio. Los modelos se analizaron con el software de elementos finitos, utilizando los criterios de Von Mises para el análisis de distribución del estrés. Se obtuvo los siguientes resultados: los grupos MODd, MODi, y AM mostraron valores significativamente más altos que los grupos CR, LPR, y LGC. El análisis de

elementos finitos reveló que los grupos sin restauraciones presentan un patrón alterado de la distribución de tensiones. El MODd, MODi, AM, LPR son los grupos con mayor concentración de estrés dentro de la estructura del diente. Los autores concluyen que las muestras con restauraciones adhesivas presentan un comportamiento similar al del diente sano, a diferencia de los restaurados con amalgama cuyo comportamiento fue similar al de un diente no restaurado¹⁶. Se encontró similitud con el presente estudio, ya que los grupos con restauraciones adhesivas presentaron un comportamiento similar en la distribución de tensiones entre sí; también se presentó un patrón similar de distribución de tensiones en el primer premolar superior.

Los resultados de los ensayos, entre las dos técnicas restauradoras (directa e indirecta), demuestran que la técnica directa (resina compuesta - OPALLIS) genera una mejor distribución de tensiones a lo largo de todo el diente, en la resina compuesta y en la interface diente-resina compuesta. Se concluye que el diente restaurado con la técnica directa después de un tratamiento endodóntico presenta una adecuada distribución de las tensiones, y que por el contrario el diente restaurado con la técnica indirecta después de un tratamiento endodóntico presenta una deficiente distribución de las tensiones. Esto puede atribuirse a que la distribución de la tensión ejercida en la interface del diente con el material restaurador depende del módulo de elasticidad de este material. Además, el alto módulo de elasticidad de la resina compuesta generó un patrón homogéneo en la distribución de tensiones, pero a la vez un aumento de la tensión en la interfaz dentina-resina compuesta; y el bajo módulo de elasticidad de SR ADORO, generó un patrón homogéneo en la distribución de tensiones, pero a la vez un mayor aumento de la tensión en la interfaz dentina-restauración, aun mayor que la resina compuesta.

Se recomienda emplear materiales restauradores que reproduzcan las propiedades mecánicas del diente, con la finalidad de generar una mejor distribución de tensiones. Se debe tener en cuenta las características de los materiales restauradores, como son su biocompatibilidad, el tipo de partículas, las propiedades mecánicas, estéticas, entre otras; ya que cada una de ellas genera particularidades que en conjunto caracterizan un tipo de material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chandrupatla T. Introducción al Estudio del Elemento Finito en Ingeniería. 2a ed. Prentice may, 1999.
2. Pérez R. Elementos finitos. Universidad de Ingeniería del Perú. 2008:3-20.
3. Plotino G, Buono L, Grande N, Lamorgese V, Somma F. Fracture resistance of endodontically treated molars restored with extensive composite resin restorations. *J Prosthet Dent* 2008;99(3):225-32.
4. Canalda C, Brau E (1999): Endodoncia: técnicas clínicas y bases científicas. Barcelona. Ed Masson. 1999:331-3.
5. Bertoldi Hepburn. Nuevos enfoques en la reconstrucción coronaria del diente endodónticamente tratado. *Rev. Asoc. Odont. Argentina*, 2002;90(4):266-274.
6. Grossman, L. Práctica endodóntica. Ed Mundi. Buenos Aires. 1979:310-1.
7. Farah J, Craig R, Sikarskie D. Photoelastic and finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Biomech* 1973;6:11-20.
8. Naghi Namakforoosh, Mohammad. Metodología de la Investigación. 2a ed. Ed Limusa. México. 2005:73-100.
9. Método de los elementos finitos (2008): Wikipedia; La enciclopedia libre. Disponible en: www.es.wikipedia.org
10. Magne P. Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. *Dental materials* 2006;23:539-548.
11. Mejía F. Estudio de una patología dental por medio de elementos finitos. *Revista ingeniería e investigación* 2005;25(01):15-21.
12. Perfil Técnico de la Resina Opallis (2008): FGM. Disponible en: <http://www.fgm.ind.br>
13. Documentación Científica de SR Adoro (2003): Ivoclar Vivadent. Disponible en: www.ivoclarvivadent.com
14. Magne P. Incrustaciones intra y extracoronarias de porcelana frente a las de resina compuesta: efectos de las cargas mecánicas sobre la distribución de tensiones, adhesión y flexibilidad de la corona. *Revista Internacional de Odontología Restauradora & Periodoncia* 2003;7(6): 583-596.
15. Soares P, Santos-Filho P, Martins L, Soares C. Influence of restorative technique on the biomechanical behavior of endodontically treated maxillary premolars. Part I: fracture resistance and fracture mode. *J Prosthet Dent* 2008;99(1):30-7.
16. Soares P, Santos-Filho P, Queiroz E, Araújo T, Campos R, Araújo C y col. Fracture resistance and stress distribution in endodontically treated maxillary premolars restored with composite resin. *J Prosthodont*. 2008;17(2):114-9.
17. Butzke Coelho y col. Configuración cavitaria: Análisis fotoelástico de la concentración y distribución de tensiones. *Acta Odontol. Venez* 2007;45(4):1

Presentado:

10-06-09

Aceptado para su publicación:

20-08-09