

GUÍA

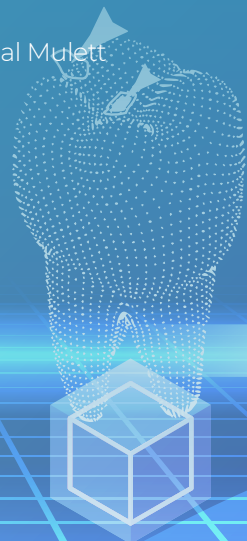
¿QUÉ ES EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS?

UNA APROXIMACIÓN PARA ODONTÓLOGOS

Valentina García Agudelo -
Juan Sebastián Zuluaga Morales - Juan Sebastián Aristizábal Mulett



EDITORIAL



GUÍA

¿QUÉ ES EL ANÁLISIS DE
ELEMENTOS
FINITOS?
UNA APROXIMACIÓN
PARA ODONTÓLOGOS

////////////////////

Valentina García Agudelo -
Juan Sebastián Zuluaga Morales - Juan Sebastián Aristizábal Mulett

SALUD



EDITORIAL

García Agudelo, Valentina

¿Qué es el Análisis de Elementos Finitos? Una aproximación para odontólogos / Valentina García Agudelo, Juan Sebastián Zuluaga Morales, Juan Sebastián Aristizábal Mulett ; editado por Laura V. Obando Alzate. - Manizales: UAM, 2025

52 páginas: ilustraciones a color, fotografías blanco y negro, gráficas (Colección: Docencia. Línea: Salud. Serie: Cartillas)

ISBN: 978-958-5558-60-1

1. Análisis por elementos finitos. 2. Odontología. 3. Biomecánica oral. 4. Implantología dental. 5. Ortodoncia. 6. Diseño asistido por computadora (CAD). 7. Restauración dental.

I. Zuluaga Morales, Juan Sebastián, autor. II. Aristizábal Mulett, Juan Sebastián, autor. III. Obando Alzate, Laura V., editora.

UAM 617. 60285 G165

Fuente: Biblioteca UAM

CO-MaBABC

Antigua Estación del Ferrocarril

Correo electrónico: editorial@autonoma.edu.co

Teléfono: +57 (6) 8727272 ext. 414

Manizales-Colombia

Miembro de la Asociación de Editoriales Universitarias de Colombia, ASEUC

Título: ¿Qué es el Análisis de Elementos Finitos? Una aproximación para odontólogos

Colección: Docencia

Línea: Salud

Serie: Cartillas

Autores: Valentina García Agudelo

Juan Sebastián Zuluaga Morales

Juan Sebastián Aristizábal Mulett

Correos electrónicos: valentina.garciaa@autonoma.edu.co

juans.zuluagam@autonoma.edu.co

juanesearisti@gmail.com

Manizales, diciembre de 2025

ISBN: 978-958-5558-60-1

Edición y coordinación editorial: Laura V. Obando Alzate

Corrección gramatical y de estilo: Diego Fernando Noreña Vélez

Diseño, Diagramación e ilustraciones: Sebastián López U.

Comité Editorial: Iván Escobar Escobar, Vicerrector Académico UAM. María del Carmen Vergara Quintero *PhD.*, Directora de Investigación, Innovación y Emprendimiento. Bellazmín Arenas Quintana *Mg.*, Coordinadora Unidad de Proyección Social. Luz Ángela Velasco Escobar *Mg.*, Coordinadora Unidad Enseñanza-Aprendizaje. Laura V. Obando Alzate, Editora y Coordinadora Editorial UAM. Brenda Yuliana Herrera Serna *PhD.*, representante Facultad de Salud. Juan David Correa Granada *PhD.*, representante Facultad de Ingenierías. Mónica Naranjo Ruiz *Mg.*, representante Facultad de Estudios Sociales y Empresariales. Angélica María Rodríguez Ortiz *Ph.D.*, Editora revista *Ánfora*. Luisa Fernanda Buitrago Ramírez *Mg.*, Directora revista *Araña que Teje*. Gloria Cecilia Córdoba Córdoba, Coordinadora Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J. Diana Marcela Sánchez Orozco, representante Vicerrectoría Administrativa y Financiera. Diego Fernando Noreña Vélez, Asistente Editorial UAM.

CONTENIDO

Glosario	7
Presentación	9
Unidad 1. Introducción al análisis de elementos finitos (AEF)	10
¿Qué es el AEF?	11
Historia del AEF	12
Unidad 2. Aplicaciones del AEF en odontología	16
AEF en implantología	17
AEF en procesos restaurativos	18
AEF y biomateriales	20
AEF y ligamento periodontal	21
AEF en traumatismos y fracturas	22
AEF en ortodoncia	23
AEF y endodoncia	24
Unidad 3. Metodología del AEF	25
Modelado CAD	26
Definición de las propiedades de los materiales	28
Combinación de análisis	30
Condiciones de contorno o contacto	30
Condiciones de carga o desplazamiento	31
Mallado	31

Simulación y resultados	34
Resultados	34
Unidad 4. Recursos para el modelado y simulación del AEF	36
Generación del CAD	37
Análisis del CAD (Análisis de elementos finitos)	39
Unidad 5. Ventajas, limitaciones y conclusiones del AEF	41
Ventajas	42
Limitaciones	43
Conclusiones	43
Referencias	44



LISTA DE FIGURAS



Figura 1. Principio de Dirichlet o también llamado principio del palomar	12
Figura 2. Richard Courant	13
Figura 3. Primer modelo dental de elementos finitos usado en odontología	15
Figura 4. Análisis de esfuerzos en 5 implantes de diferentes características	18
Figura 5. Desplazamiento que puede sufrir una restauración al someterse a una fuerza cuando hay cambio en la divergencia de las paredes de la preparación	19
Figura 6. A) Modelo 3D de molar inferior. B) Resultado de aplicar una fuerza sobre la corona mediante el elemento semiesférico	20
Figura 7. Modelo de elementos finitos de un incisivo central superior que incluye el ligamento periodontal	21
Figura 8. Concentración de esfuerzos de una fractura paranasal del borde orbitario inferior medial y fractura en el piso de la órbita	22
Figura 9. Deformación de placa termoformada con aditamentos biomecánicos complementarios por palatino	23
Figura 10. Distribución de esfuerzos en la superficie externa de limas de níquel-titanio durante la rotación simulada dentro de un conducto radicular A) ProFile, B) ProTaper y C) ProTaper Universal	24
Figura 11. Modelo 3D de una mandíbula totalmente edéntula con representación de hueso cortical y trabeculado	28
Figura 12. Comportamiento lineal y no lineal de un material	30
Figura 13. Nodos y elementos de una malla	32
Figura 14. Modelo 3D de molar inferior posterior al proceso de mallado	32
Figura 15. Modelo de AEF de un implante con zonas de mayor esfuerzo en rojo	35
Figura 16. Logo del software Solidworks	37
Figura 17. Logo del software AutoCAD	38
Figura 18. Logo del software Ansys	39
Figura 19. Logo del software COMSOL	40



Deformación: Cambio de forma de un cuerpo cuando se le aplica una fuerza (2).

Elasticidad: Comportamiento que presenta un material al recuperar su forma posterior a la aplicación de fuerzas sobre el mismo (2).

Esfuerzo: Fuerza por unidad de área que un punto de un cuerpo experimenta internamente al ser sometido a una carga externa (3).

Fatiga: Agrietamiento o rotura de un material producido por la repetición cíclica de cargas. Las cargas repetidas pueden formar y propagar microgrietas, a partir de un defecto estructural preexistente o de un concentrador de esfuerzos (3).

Fuerza: Todo agente capaz de modificar la cantidad de movimiento o la forma de un cuerpo (3).

Fuerza de tensión o tracción: Fuerzas iguales (magnitud) y opuestas que tienden a producir alargamiento de un cuerpo deformable (4).

Fuerza de compresión: Fuerzas de igual magnitud y dirección que actúan produciendo el acortamiento, aplastamiento o compresión de un cuerpo deformable (2).

Límite elástico: Esfuerzo máximo que se puede inducir en un punto de un cuerpo, sin producir deformación permanente. Se considera que el material conservará su forma al retirar las cargas, si el esfuerzo no excede el límite elástico (2).

Límite plástico: Máximo valor del esfuerzo que se puede aplicar a un cuerpo sin generar su ruptura. Sin embargo, genera una deformación permanente del mismo (2).

Tensión de Von Mises: En estados de esfuerzo muy complejos, se utiliza para determinar el grado de proximidad en el que se encuentra un material dúctil de

experimentar deformación permanente. Cuando la tensión de **Von Mises** se acerca al límite elástico, se considera que un material dúctil comenzará a experimentar deformación permanente (3).

Torsión: Estado de carga sobre un cuerpo que tiende a deformarlo rotándolo sobre su eje (4).

Flexión: Estado de carga sobre un cuerpo que tiende a flectarlo o arquearlo (como cuando se tensa un arco para lanzar una flecha). La flexión produce esfuerzos de compresión en la parte cóncava del elemento y de tensión en la convexa (3).

Concentración de esfuerzos: Son puntos de acumulación de esfuerzos en donde existen cambios de forma o discontinuidades de un cuerpo. Estas zonas pueden concentrar esfuerzos que lleven a la falla de las estructuras (5).

Estructura homogénea: Elementos con características comunes o iguales referidas a su clase o naturaleza. Perteneciente a un mismo género, poseedor de iguales características (6).

Estructura heterogénea: Elementos compuestos por partes de diferentes naturalezas (6).

PRESENTACIÓN

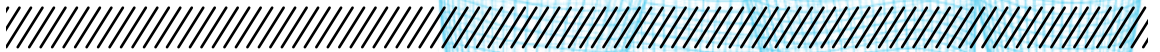
En el campo de la medicina, el método de elementos finitos (MEF) o análisis de elementos finitos (AEF) ha demostrado ser una herramienta de gran utilidad. Esto se debe a que posibilita la evaluación del comportamiento de diversas estructuras y tejidos del cuerpo humano, así como su interacción con el entorno cuando es sometido a determinados estímulos. El MEF/AEF se ha convertido en una valiosa alternativa en situaciones en las que el estudio *in vivo* no es viable, no sólo por la complejidad inherente de este tipo de investigaciones, sino por las implicaciones éticas que conllevan (1). Debido a la importancia que ha cobrado el AEF en la odontología, se ha desarrollado esta cartilla para que los odontólogos y la comunidad académica de esta área puedan conocer y comprender la metodología y utilidad de esta herramienta.

A través de esta cartilla se darán a conocer conceptos claves sobre el MEF para los profesionales de la odontología que se desempeñan, tanto en el ámbito clínico como en el ámbito académico. La comprensión de los conceptos del MEF permitirá a dichos profesionales tener las herramientas suficientes para considerarlo como un método de resolución de problemas de la biomecánica relacionada con la cavidad oral que no se pueden estudiar *in vivo*. Los resultados de estudios que empleen el MEF podrán ser un recurso para guiar la toma de decisiones clínicas basadas en la evidencia científica.



UNIDAD 1

INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE **ELEMENTOS** FINITOS (AEF)



¿Qué es el AEF?

El AEF es un método numérico que posibilita el estudio de esfuerzos y deformaciones mediante cálculos computacionales de estructuras con geometría, forma o anatomías complejas y propiedades mecánicas específicas; un análisis que no sería posible realizar bajo otras formas de estudio, como los fotoelásticos o análisis de galgas extensiométricas. En la literatura, este método matemático se puede encontrar bajo las siglas AEF (Análisis de Elementos Finitos) o MEF (Método de Elementos Finitos), siendo el primero ampliamente reconocido en entornos industriales y el segundo en el ámbito académico (7, 8).

El AEF propone subdividir el cuerpo que se va a analizar en pequeñas fracciones llamadas elementos, conectados entre sí mediante puntos, conocidos como nodos. A esta representación discretizada del cuerpo se le denomina *mall*a. Esta malla contiene o rodea un modelo computacional creado previamente, permitiendo definir cómo reaccionará el modelo ante ciertas condiciones de carga específicas (7).

Este método consta de seis pasos fundamentales, los cuales se explicarán ampliamente en capítulos posteriores (7, 9, 10):

1. Modelado CAD.
2. Definición de materiales.
3. Condiciones de contorno o contacto.
4. Condiciones de carga o desplazamiento.
5. Mallado.
6. Simulación y resultados.

Historia del AEF

El AEF tiene sus raíces en desarrollos matemáticos y teóricos que se remontan al siglo XIX con el uso inicial del principio de Dirichlet. Dicho principio se le atribuye al matemático alemán Johann Peter Gustav Lejeune Dirichlet, quien lo usó como fundamento para realizar demostraciones en algunas de sus investigaciones matemáticas (11). El principio de Dirichlet es aparentemente sencillo en su formulación, pero puede representar un desafío en su aplicación práctica. En esencia, plantea cómo encontrar una solución que cumpla con ciertas restricciones en una región del espacio (Figura 1). Este concepto fue fundamental en el desarrollo posterior del AEF, ya que proporcionó una base teórica sólida para abordar problemas de ingeniería y ciencia aplicada (9).

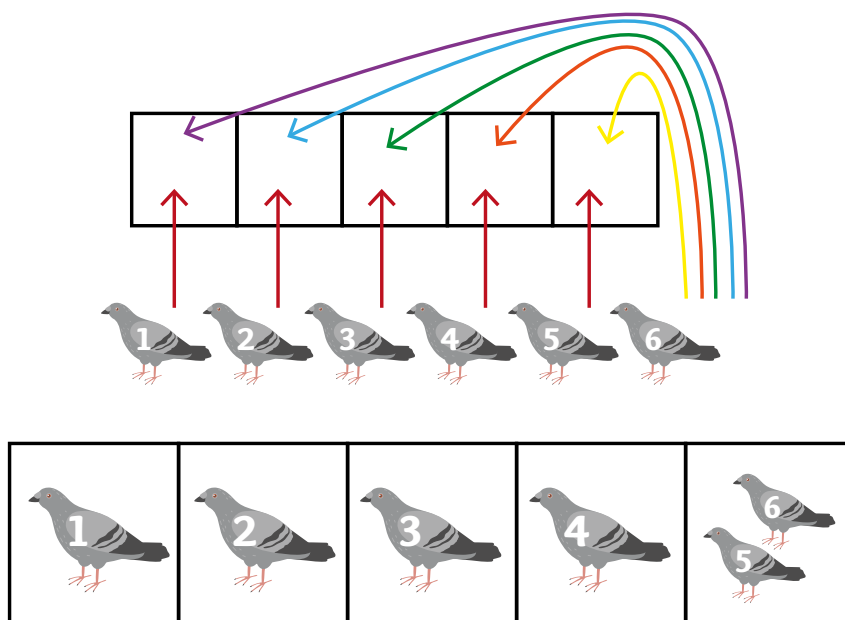


Figura 1. Principio de Dirichlet o también llamado principio del palomar¹.

Fuente: adaptación de Arjona A. (12).

¹ “Si distribuimos una serie de objetos en cajas y hay más objetos que cajas, entonces habrá una caja que contenga al menos dos objetos” (7).

El uso más antiguo relacionado con el AEF que se encuentra en la literatura se remonta al año 1922, cuando Richard Courant (Figura 2) estaba investigando una teoría matemática que empleara el principio de Dirichlet (13). Por su arduo trabajo para editar la serie de monografías sobre matemáticas, conocida como *The Yellow Book* y la preparación del primer volumen de *Methods of Mathematical Physics*, pudo obtener dinero del Consejo Internacional de Educación para construir un instituto matemático en Gottingen (13).



Figura 2. Richard Courant.

Fuente: De León M. (14).

Teniendo en cuenta que el uso más antiguo de los elementos finitos (1922) registrado en las obras de Richard Courant fue para explicar el planteamiento de Dirichlet, es posible concluir que el AEF surgió de un problema de matemáticas puras, más que de matemáticas aplicadas (11).

En el año 1924, Courant publicó el primer volumen del anteriormente nombrado *Methods of Mathematical Physics*. En esta obra aparece una descripción general de lo que era inicialmente la idea de los elementos finitos (15). Después, en 1943, el autor realizó una publicación importante sobre este método. Dicha publicación

es el primer ejemplo citado en la historia de los elementos finitos (16). Richard Courant había tenido en sus manos, sin darse cuenta, la base para la técnica de los elementos finitos (11).

En la década de los años 50, el MEF se desarrolló en la industria aeronáutica americana y europea como un recurso para enfrentar diversos problemas de aeroelasticidad (17). Ya para la década de los años 60, el método tuvo una transformación importante, pues pasó de ser un método de matemáticas puras, a ser un método de matemáticas aplicadas en diferentes campos (18). Posteriormente, el ingeniero civil estadounidense, Ray W. Clough, utilizó por primera vez el término “método de elementos finitos” para este planteamiento matemático (19).

Este método es cada vez más empleado entre ingenieros y analistas numéricos. Su uso se ha extendido más allá de problemas complejos de análisis estructural y de elasticidad en ingeniería civil y aeronáutica (20) gracias a su gran flexibilidad para modelar geometrías complejas y arrojar resultados inmediatos. Sus aplicaciones han llegado al campo de la odontología como una forma de superar las limitaciones de las pruebas de fotoelasticidad (7).

El MEF se utilizó por primera vez en odontología en el año 1973, en un estudio llamado *The stress analysis of human teeth* de Robert W. Thresher y Gary E. Saito, el cual tuvo como objetivo investigar la distribución de esfuerzos en un diente humano. La investigación consideró los diferentes módulos elásticos que se encuentran dentro del diente y, de ese modo, determinar cómo esta estructura soporta la carga y cómo se distribuyen los esfuerzos en el hueso circundante (21).

Esta pesquisa nace de la necesidad de considerar al diente como una estructura heterogénea, ya que anteriormente se habían realizado estudios de fotoelasticidad para analizar los esfuerzos sobre la estructura dental, pero estos consideraban al diente como una estructura homogénea. Teniendo en cuenta lo anterior, la investigación de Thresher y Saito se realizó en un modelo homogéneo y en un modelo heterogéneo, comparando la distribución de esfuerzos en el diente y tejido circundante de ambos casos (21).

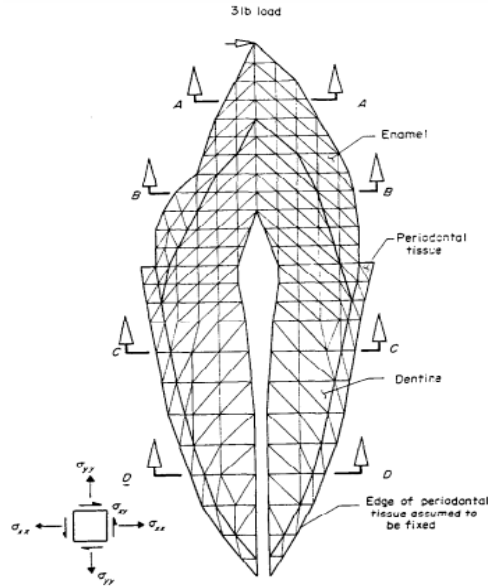


Fig. 1. A finite element tooth model.

Figura 3. Primer modelo dental de elementos finitos usado en odontología.

Fuente: Thresher y Saito (21).

Los estudios de AEF pueden ser realizados con modelos 2D o 3D, pudiéndose obtener resultados muy limitados con los modelos 2D. Los dientes tienen una geometría irregular y no simétrica, por lo que no deberían ser representados mediante modelos 2D como se realizó en el primer modelo de AEF usado en odontología en el año 1973 (Figura 3). Se prefieren, en consecuencia, modelos 3D para obtener un análisis más realista con la anatomía dental detallada (22).

Otro de los problemas asociados con los primeros modelos de elementos finitos, fue la dificultad de asignar propiedades mecánicas apropiadas a las diferentes partes que constituían el modelo, lo cual es fundamental para la validez de los AEF. En la actualidad, gracias a la gran cantidad de avances y recursos tecnológicos, estas limitaciones se han disminuido (7).

The background of the slide features a light blue wireframe illustration of two hands, one at the top and one at the bottom, gently cupping a heart shape in the center. The hands are composed of a grid of thin lines, giving them a digital or 3D model appearance.

UNIDAD 2

APLICACIONES **DEL AEF EN** ODONTOLOGÍA

A horizontal band of closely spaced, parallel diagonal lines in a dark grey or black color, spanning the width of the text area below the main title.

El AEF ha sido ampliamente usado como una herramienta de investigación para el estudio del comportamiento biomecánico de diversos materiales, tejidos, estructuras complejas y sistemas biológicos en diferentes ramas de la odontología. Este permite establecer la ubicación, magnitud y dirección de una fuerza aplicada en un modelo tridimensional de la estructura que se esté analizando (23).

AEF en implantología

En implantología, el AEF se ha usado para estudiar el comportamiento biomecánico de los implantes (Figura 4), el patrón de distribución de esfuerzos en varios de sus componentes, en la restauración protésica y en el hueso circundante. Diversos estudios han concluido que la distribución de los esfuerzos en el hueso periimplantario puede verse afectada por factores como: el número, la distribución, la angulación, el diámetro y la longitud de los implantes, así como por las propiedades mecánicas del mismo. También la calidad ósea, el estado del hueso periimplantario y la relación entre corona-implante, son otros factores a considerar (24, 25).

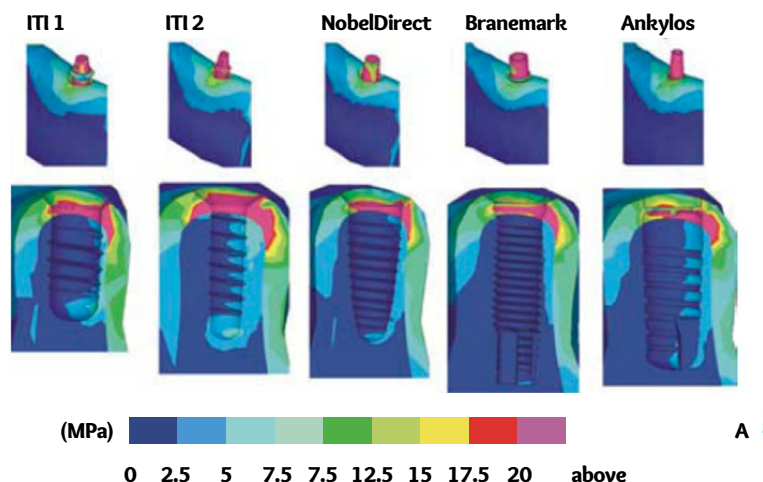


Figura 4. Análisis de esfuerzos en 5 implantes de diferentes características².

Fuente: Baggi et al. (25).

Con base en lo anterior, el AEF permite predecir el éxito a largo plazo de los implantes en diferentes condiciones clínicas y disminuir el riesgo de falla mecánica. Las investigaciones logran destacar y sugerir condiciones biomecánicas importantes a tener en cuenta, permitiendo mejorar los diseños y las técnicas quirúrgicas de colocación del implante (9).

AEF en procesos restaurativos

Estudios han evaluado cómo los diferentes parámetros de la preparación de dientes para corona completa (ángulos de convergencia y altura de la preparación) pueden influir en la distribución de tensiones de las coronas y en el efecto rotacional de las mismas (Figura 4) (26). Además, otras investigaciones también

² En la parte inferior de la figura se observa una escala de colores. Dicha escala varía según la intensidad de los esfuerzos que se hayan presentado en el modelo: el color azul representa las zonas en las que no se da ningún tipo de esfuerzo y los colores rojos a púrpura en los que se dan las mayores magnitudes de estos.

han evaluado el comportamiento biomecánico y la resistencia de coronas con paredes delgadas y las condiciones de contacto en la interfaz adhesiva entre el cemento y la estructura dental, en donde se ha evidenciado que, cuanto mayor es el módulo elástico de las coronas, menores son los esfuerzos equivalentes que se producen en el material de cementación. De igual manera, las coronas de paredes delgadas de zirconio o de aleaciones de oro perfectamente cementadas son resistentes al fracaso adhesivo, mientras que las coronas de resina compuesta son más propensas a presentar fallos en la cementación (27).

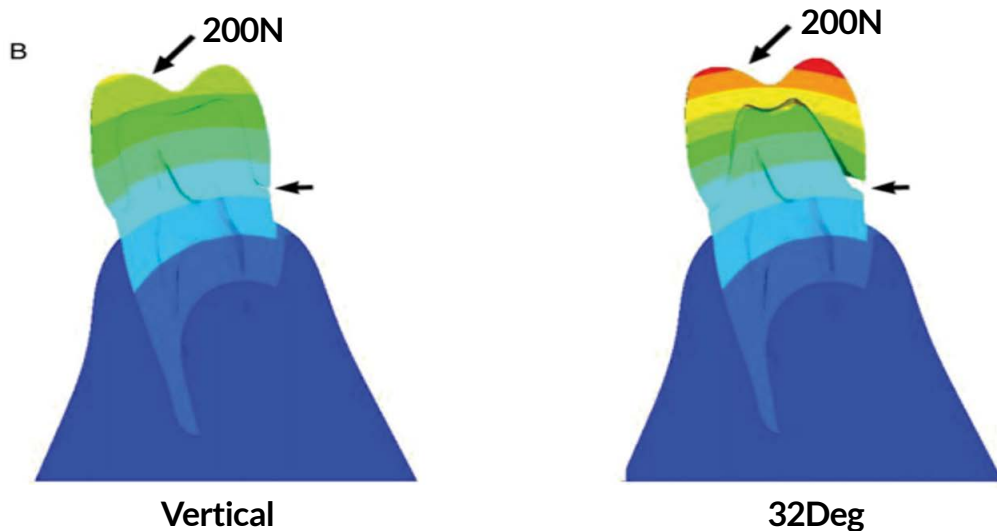


Figura 5. Desplazamiento que puede sufrir una restauración al someterse a una fuerza cuando hay cambio en la divergencia de las paredes de la preparación.

Fuente: Bowley et al. (26).

Nota: mediante el AEF los desplazamientos de las estructuras se representan muy magnificados.

El AEF también ha sido usado para mejorar la estabilidad mecánica y el éxito a largo plazo de las restauraciones con postes y muñones. Investigaciones que han usado el AEF sugieren que en premolares con un remanente coronal limitado, es de vital importancia reducir las fuerzas en sentido oblicuo que se generan sobre los mismos. De esta forma, se previenen fallas mecánicas en el diente imposibles de reparar (28).

AEF y biomateriales

Investigaciones previas se han propuesto comparar la vida útil de materiales totalmente cerámicos como el zirconio y el disilicato de litio, usados para restaurar molares mediante coronas completas, sometiendo las restauraciones a diferentes condiciones de carga y variando el espesor de la restauración. Lo anterior apoya la idea de que, mediante el AEF, se pueden evaluar muchos aspectos de la resistencia de las cerámicas hasta su fallo, asignando diferentes características en su diseño (Figura 6) (29, 30). Este tipo de análisis brindan herramientas clínicas de peso para elegir un material según los resultados del estudio, para aplicarlos en los pacientes según sea el caso.

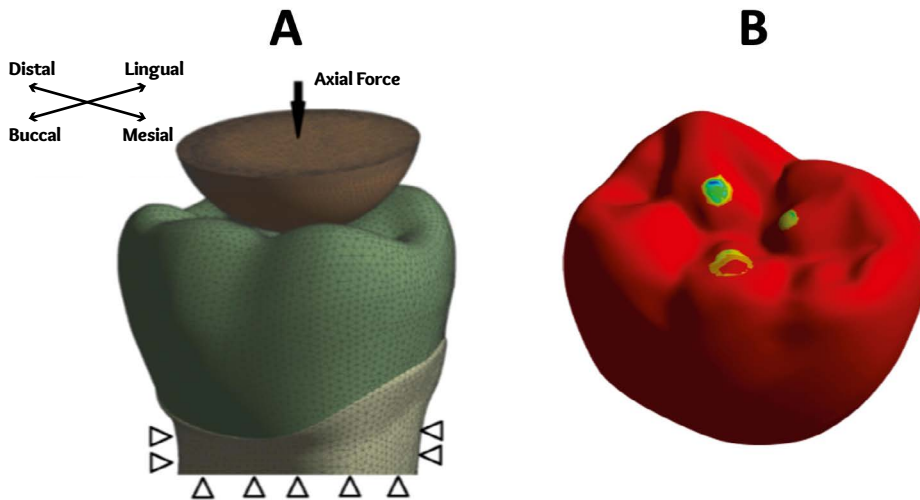


Figura 6. A) Modelo 3D de molar inferior³. B) Resultado de aplicar una fuerza sobre la corona mediante el elemento semiesférico⁴.

Fuente: Mortadi et al. (30).

³ En la parte superior se observa un elemento semiesférico que ejerce una fuerza sobre la corona del diente.

⁴ Esto generó tres puntos de contacto con diferentes intensidades.

AEF y ligamento periodontal

El ligamento periodontal (LP) es el componente más crucial del periodonto en términos de deformación, debido al efecto que este tiene sobre la movilidad del diente y la forma en la que se distribuyen los esfuerzos por este tejido (Figura 7). Esto ha hecho que algunas investigaciones estudien la biomecánica dental sometiendo el diente a fuerzas masticatorias y traumáticas, incluyendo el LP en los modelos de AEF (31, 32).

La inclusión del LP en el modelado 3D aumenta la complejidad y precisión de los estudios, ya que al no incluirlo, se simplifican los modelos, lo que puede dar como resultado distribuciones inexactas de los esfuerzos en el periodonto, además de movimientos dentales improbables (33, 34).

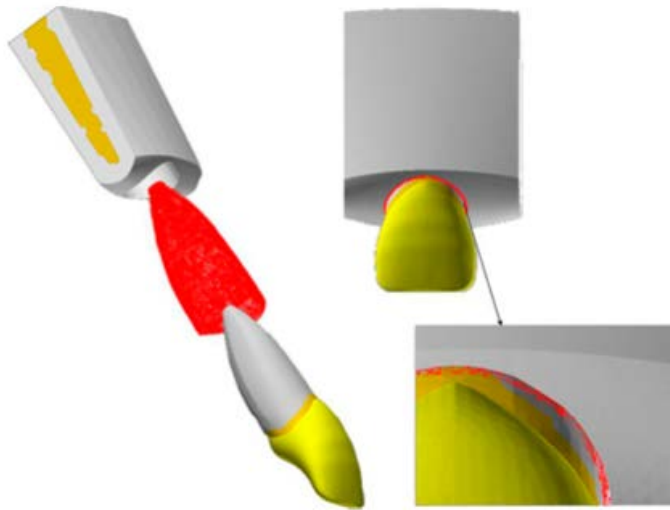


Figura 7. Modelo de elementos finitos de un incisivo central superior que incluye el ligamento periodontal⁵.

Fuente: Aversa, et al. (33).

⁵ Estructura roja.

AEF en traumatismos y fracturas

El AEF se puede utilizar para estimar las respuestas biomecánicas de regiones definidas de tejidos y órganos a condiciones específicas. El AEF tiene la capacidad de simular cargas traumáticas, lo que ayuda a comprender la biomecánica de una fractura (35).

Estudios muestran que los modelos de elementos finitos pueden ser útiles para simular lesiones en el cráneo humano y proporcionar información sobre diferentes tipos de fracturas (Figura 8), así como para mejorar las técnicas quirúrgicas en este tipo de condiciones clínicas (35).

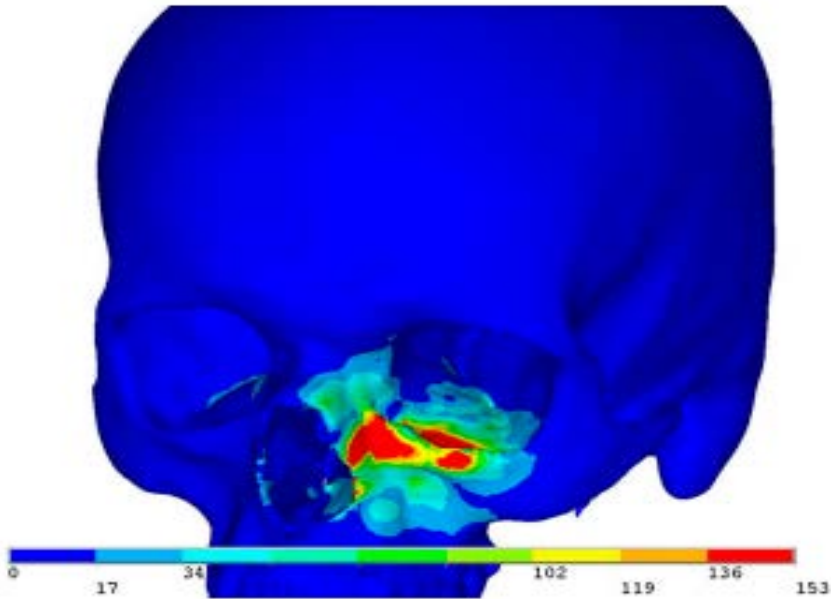


Figura 8. Concentración de esfuerzos de una fractura paranasal del borde orbitario inferior medial y fractura en el piso de la órbita.

Fuente: Huempfer-Hierl et al. (35).

AEF en ortodoncia

El AEF ha permitido realizar múltiples investigaciones en el área de la ortodoncia. Ejemplo de ello es una de las investigaciones realizadas por la Universidad Autónoma de Manizales en la que se analizó el efecto que tenía sobre el ligamento periodontal el uso de alineadores termoformados con y sin aditamentos biomecánicos complementarios (Figura 9) (36).

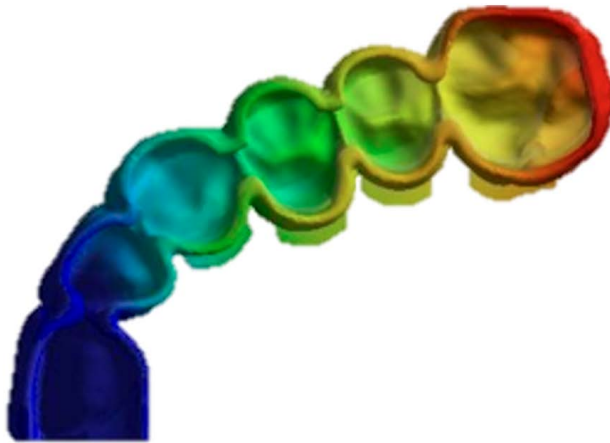


Figura 9. Deformación de placa termoformada con aditamentos biomecánicos complementarios por palatino.

Fuente: Guzmán Martínez LM (36).

Se ha usado también como herramienta de simulaciones en modelos 3D para optimizar la estabilidad del anclaje de los mini implantes y reducir posibles complicaciones para el paciente (37).

AEF y endodoncia

Estudios han hecho uso del AEF para analizar las tensiones de torsión y flexión en modelos simulados de instrumentos rotatorios de níquel-titanio, específicamente ProTaper (Dentsply/Maillefer, Ballaigues, Suiza) y ProFile (Tulsa, Oklahoma, Estados Unidos), analizando la diferencia en la distribución de esfuerzos y elasticidad de una marca a la otra (38). Además, mediante este método, se ha analizado la distribución de esfuerzos durante la conformación simulada del conducto radicular y se ha logrado estimar el esfuerzo residual en algunos instrumentos rotatorios de níquel-titanio (Figura 10) (39).

Otras investigaciones de AEF han analizado las variaciones de esfuerzos que se pueden presentar en la pared del conducto radicular resultante de la condensación vertical y lateral (40).

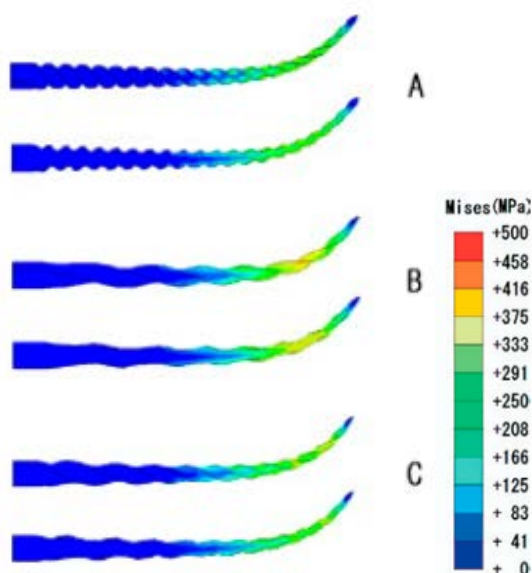


Figura 10. Distribución de esfuerzos en la superficie externa de limas de níquel-titanio durante la rotación simulada dentro de un conducto radicular A) ProFile, B) ProTaper y C) ProTaper Universal.

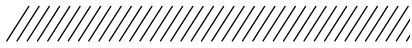
Fuente: Kim et al. (39).

A wireframe illustration of a human hand and teeth. The hand is positioned at the top, with fingers slightly curled. Below it, a set of upper teeth is visible. The entire illustration is rendered in a light blue wireframe style against a solid blue background.

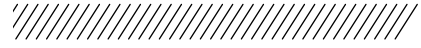
UNIDAD 3

METODOLOGÍA DEL AEF





UNIDAD 3



Durante el desarrollo de esta unidad se encontrarán tres códigos QR que dirigen a videos explicativos, en los que se podrán observar de manera dinámica los pasos más relevantes de la metodología del AEF.

El AEF es una herramienta muy efectiva para modelar estructuras complejas y poder analizar con precisión sus propiedades mecánicas y comportamiento biomecánico, de una manera no invasiva (9).

El AEF tiene una serie de procedimientos fundamentales para su ejecución (7, 9, 10):

1. Modelado CAD.
2. Definición de las propiedades de los materiales.
3. Condiciones de contorno o contacto.
4. Condiciones de carga o desplazamiento.
5. Mallado.
6. Simulación y resultados.

Modelado CAD

Para llevar a cabo el AEF, es necesario crear un modelo computacional del objeto que se desea estudiar (dientes, hueso u otras estructuras humanas) que puede construirse a partir de imágenes o recursos preexistentes. En términos generales, se pueden encontrar 2 tipos de modelado (7):

Modelado 2D: Este método implica representar el objeto en dos dimensiones, como un plano o una superficie. Es más simple y puede ejecutarse en computadoras estándar, pero suele tener limitaciones en la precisión y en sus resultados, ya que no tiene en cuenta la tercera dimensión (7).



Ver video

Modelado 3D: Por su parte, el modelado 3D representa el objeto tridimensionalmente (Figura 11), lo que permite un modelado más preciso de la geometría y las estructuras, que se traduce en resultados confiables y certeros. Sin embargo, requiere de recursos tecnológicos avanzados y puede ser más complejo (7).

Algunas consideraciones para el modelado son:

Complejidad de los huesos y dientes: Debido a la estructura compleja de los dientes y el hueso, estos no pueden ser representados con una geometría simplificada, pues presentan formas anatómicas específicas y, en muchas ocasiones, estructuras en capas. Esto hace que el modelado sea desafiante, ya que si se simplifican demasiado los modelos, se verían comprometidos los resultados del análisis (41).

Tiempo y posible propensión a errores: El proceso de modelado puede ser el paso más laborioso y que requiere más tiempo, ya que busca capturar y reproducir en los modelos el máximo detalle anatómico posible. Puede ser un momento propenso a errores y simplificaciones que podrían afectar la precisión de los resultados (41).

Técnica avanzada de adquisición de datos: En la actualidad se cuenta con técnicas muy sofisticadas para refinar la adquisición de la geometría de los modelos y su posterior digitalización. El máximo detalle anatómico del diente y de otras estructuras puede ser obtenido mediante la técnica de adquisición de datos de tomografías computarizadas y de otras tecnologías de imágenes digitales como

las resonancias magnéticas (42). Con los avances de los sistemas de imágenes digitales es posible extrapolar datos específicos de la geometría y las propiedades óseas, a un modelo de elementos finitos con un alto nivel de detalle que proporciona resultados fiables (9, 43).



Figura 11. Modelo 3D de una mandíbula totalmente edéntula con representación de hueso cortical y trabeculado.

Definición de las propiedades de los materiales

Propiedades mecánicas

Para llevar a cabo un análisis efectivo es importante establecer las propiedades mecánicas de todas las estructuras y componentes del modelo previamente realizado. Estas propiedades pueden incluir el módulo elástico, límite elástico, relación de *Poisson*, deformación plástica y elástica, y cualquier otra propiedad relevante para definir el comportamiento del material bajo carga (7).

Variabilidad de propiedades

En el caso del análisis biomecánico de un diente, resulta crucial reconocer que está formado por tejidos como el esmalte y la dentina; y que está rodeado, además, por otras estructuras como el hueso trabeculado, el hueso cortical y el ligamento periodontal. Cada uno de estos componentes tiene propiedades mecánicas totalmente diferentes, por lo que es indispensable asignar valores precisos a cada uno para obtener resultados confiables (9).

Tipos de análisis

El AEF se puede llevar a cabo bajo dos enfoques principales: análisis estático lineal o análisis no lineal (Figura 12), dependiendo de la asignación de las características físicas apropiadas para cada una de las partes:

Análisis estático lineal: Es adecuado para la evaluación de sistemas en que las tensiones y deformaciones varían de manera proporcional a las cargas aplicadas y son independientes del tiempo. Este enfoque es útil para evaluar la deformación elástica y predecir la respuesta del modelo a diferentes cargas y condiciones (7, 44).

Análisis estático no lineal: Este tipo de análisis tiene en cuenta comportamientos más complejos, como la deformación plástica y la capacidad del material para resistir cargas hasta su fractura. Las tensiones y deformaciones no son proporcionales a las cargas aplicadas y pueden variar con el tiempo, lo que dificulta predecir un comportamiento con diferentes variables (7, 44).

Combinación de análisis

En algunos casos, es necesario realizar análisis tanto lineales como no lineales en el mismo modelo, para comprender su comportamiento bajo diferentes circunstancias o para simular cargas extremas que puedan provocar deformaciones plásticas o fracturas (44).

En resumen, la elección entre análisis lineales y no lineales dependerá de los objetivos del estudio y de la naturaleza del material y las cargas involucradas.

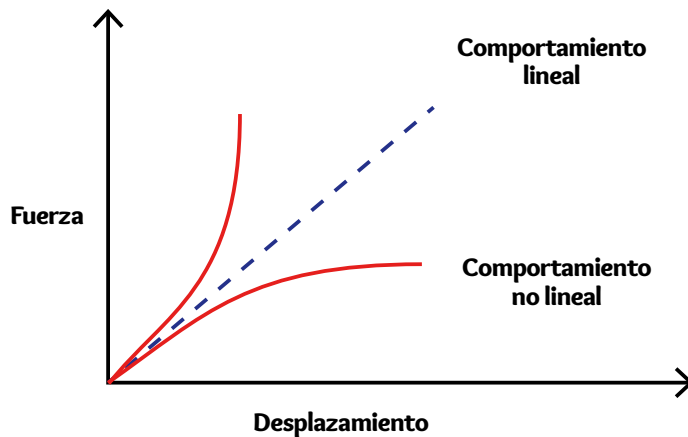


Figura 12. Comportamiento lineal y no lineal de un material.

Fuente: adaptación de Dassault Systèmes (56).

Condiciones de contorno o contacto

Las condiciones de contorno definen la interacción desde un principio entre los límites de los componentes que se encuentran en contacto o que lo generan cuando se aplica una fuerza al modelo (45). En este paso, se asignan características que describirán el comportamiento o relación del modelo con su entorno. Por ejemplo, si se está analizando el patrón de distribución de esfuerzos de un implante dental

al hueso, se debe establecer cómo se relaciona el implante con el hueso cortical y trabeculado, cómo se relaciona el implante con su elemento protésico, además de todas las condiciones de relación que sean necesarias establecer (42).

Condiciones de carga o desplazamiento

Las condiciones de carga involucran la aplicación de fuerzas, momentos, presiones, temperaturas u otras influencias externas sobre el cuerpo o la estructura. Estas cargas pueden representar las condiciones del entorno en el que opera la estructura o simular situaciones específicas, como cargas estáticas o dinámicas (46).

Condiciones de desplazamiento

En ocasiones, en lugar de aplicar cargas externas se definen condiciones de desplazamiento, donde se especifica cómo se deben mover o restringir ciertas partes del modelo (46).

Mallado

Nodos y elementos

El AEF representa o describe los modelos mediante el uso de un sistema complejo de nodos (puntos) y elementos (líneas, triángulos, cuadriláteros, etc.) (Figura 13). Los nodos conectan a los elementos. Su conjunto y unión forma una “red” denominada *mall*a, la cual divide el modelo en partes pequeñas y permite pasar de un problema muy complejo a subdividirlo en problemas más simples (Figura 14) (7, 9).

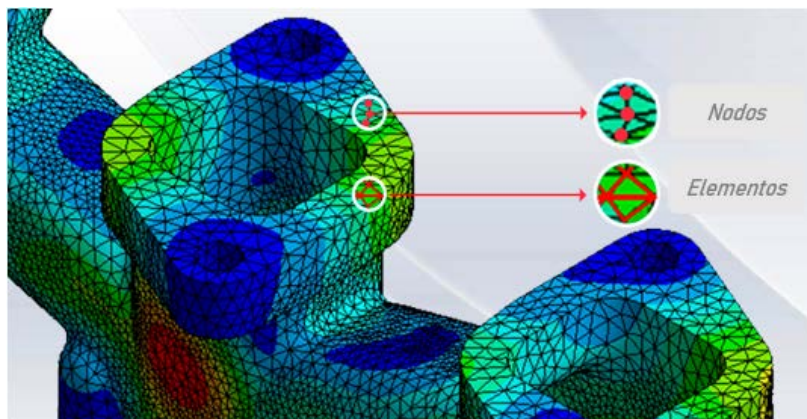


Figura 13. Nodos y elementos de una malla.

Fuente: adaptación de Mirlisenna (57).

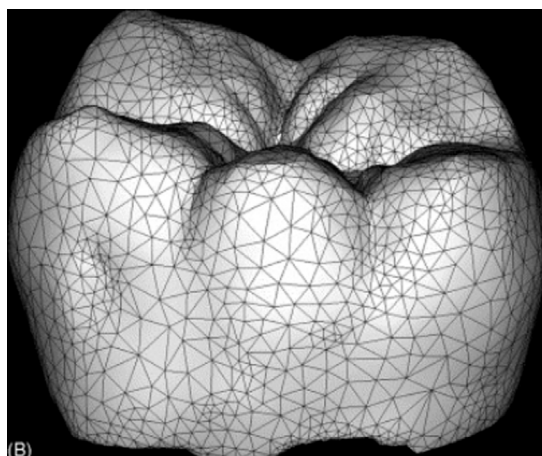


Figura 14. Modelo 3D de molar inferior posterior al proceso de mallado.

Fuente: Magne (42).

División en problemas simples

El MEF permite dividir un problema complejo en subproblemas más simples y manejables. Cada elemento es tratado como un problema individual con sus propias ecuaciones y condiciones de carga que luego se ensamblan para obtener una solución global (9).

Mallado y precisión

La precisión del MEF depende, en gran medida, de la cantidad de nodos y elementos que se usen en la malla. Cuanto mayor sea el número de nodos y elementos, mayor será la precisión y el resultado del análisis. Sin embargo, esto puede incrementar la complejidad computacional que se traduce en un tiempo más prolongado para obtener la solución del problema (7, 9).



Ver video

Gracias a el proceso de mallado se logran determinar las relaciones matemáticas entre las fuerzas externas que actúan sobre los elementos y los desplazamientos que se producen en los nodos (7).

Simulación y resultados

Simulación

En esta etapa, el *software* especializado en AEF lleva a cabo una serie de cálculos y simulaciones numéricas para evaluar el comportamiento del modelo bajo las condiciones de carga especificadas (7).

Resolución numérica

Durante la etapa de simulación, el *software* realiza cálculos numéricos para resolver las ecuaciones de equilibrio y determinar cómo se deformará la estructura en respuesta a las fuerzas aplicadas. Esto implica calcular los desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en cada elemento de la malla (42).

Resultados

Análisis de esfuerzos y deformación

El resultado final del AEF son los valores de esfuerzo y deformación en la estructura en el momento en que se aplica la carga. Estos valores se calculan para cada elemento de la malla y se utilizan para evaluar el comportamiento global de la estructura. Esto es importante para determinar áreas críticas que puedan estar sujetas a fallos o deformaciones excesivas (7).

Visualización de resultados

La visualización de los resultados es una parte importante de esta etapa. Los resultados suelen presentarse en forma de gráficos, mapas de colores u otras representaciones visuales que facilitan la interpretación de los datos (Figura 15) (46).

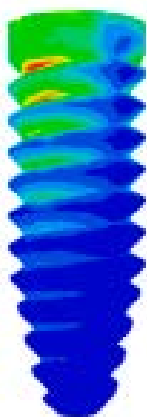


Figura 15. Modelo de AEF de un implante con zonas de mayor esfuerzo en rojo.

Fuente: Ouldyyerou (59).

En resumen, la etapa de resultados en el AEF es crucial para evaluar el comportamiento de una estructura bajo condiciones de carga específicas. Proporciona información crítica sobre las tensiones, deformaciones y desplazamientos, lo que ayuda a tomar decisiones informadas en el diseño y la ingeniería, así como identificar áreas de preocupación o mejora en la estructura (7, 46).



Ver video

UNIDAD 4

RECURSOS

PARA EL MODELADO
Y SIMULACIÓN
DEL AEF



Se puede encontrar una gran diversidad de programas que permiten realizar estudios con AEF. Existen dos tipos grandes de programas: i) aquellos que permiten la generación del modelo (CAD, en inglés *Computer Aided Design*), y ii) los que realizan la simulación o análisis del CAD. Para esta unidad, se abarcarán cuatro de los programas más comúnmente utilizados.

Generación del CAD

SolidWorks



Figura 16. Logo del software Solidworks.

Fuente: SolidWorks LATAM y España (58).

- Tipo de *software*: CAD (Diseño Asistido por Computadora) (47).
- Función principal: Modelado 3D y creación de dibujos detallados (47).
- Plataforma: Exclusivamente para Windows (47).
- Utilidad: Ampliamente utilizado en ingeniería para diseñar objetos sólidos tridimensionales. Permite crear modelos a partir de croquis y agregar detalles progresivamente.
- Aplicaciones: Diseño mecánico, ingeniería, diseño de productos.

Este *software* de automatización de diseño mecánico hace posible que los diseñadores grafiquen con rapidez sus ideas, con el fin de producir modelos y dibujos detallados. Los modelos de SolidWorks se componen de geometría sólida 3D. Generalmente, se comienza con un croquis y paulatinamente se van agregando más detalles al modelo, el cual se puede refinar agregando, editando y reorganizando las partes (Figura 16) (48, 49).

AutoCAD



Figura 17. Logo del *software* AutoCAD.

Tomado de AutoCAD (60).

- Tipo de *software*: CAD (Diseño Asistido por Computadora).
- Función principal: Dibujo y diseño en 2D y 3D.
- Plataforma: Disponible en dispositivos de escritorio, web y móviles.
- Utilidad: Ofrece automatización de tareas, colaboración y aprendizaje automático. Es versátil y se utiliza en una variedad de campos, desde diseño eléctrico hasta cartografía 3D.
- Aplicaciones: Ingeniería, arquitectura, diseño industrial, cartografía, entre otros.

AutoCAD automatiza tareas como la comparación de dibujos, el recuento y adición de objetos, la creación de planificaciones y mucho más. Cuenta con una tecnología que permite garantizar la fidelidad y compatibilidad de los archivos. Incluye herramientas específicas para el diseño eléctrico, de plantas, diseño arquitectónico, diseño mecánico, cartografía 3D y adición de imágenes

escaneadas. Permite al usuario trabajar desde dispositivos de escritorio, web y móviles (Figura 17) (50).

Análisis del CAD (Análisis de elementos finitos)

Ansys



Figura 18. Logo del software Ansys.

Fuente: Ansys Learning (61).

- Tipo de *software*: Análisis y simulación de elementos finitos (51).
- Función principal: Realiza análisis y simulaciones de modelos sometidos a estímulos físicos individuales o simultáneos (51).
- Utilidad: Líder en análisis y simulación de elementos finitos; evita la necesidad de prototipos físicos, permitiendo evaluar y perfeccionar diseños de manera eficiente (51).
- Aplicaciones: Ampliamente utilizado en ingeniería para análisis estructural, térmico, de fluidos, electromagnético, entre otros.

Este es un gran recurso para gestionar el riesgo y entender las implicaciones en los diseños realizados. La información obtenida mediante el análisis con el *software* permite la optimización y mejora de diseños, así como identificación y eliminación de posibles fallos (Figura 18) (51).



Figura 19. Logo del *software* COMSOL.

Fuente: COMSOL (62).

- Tipo de *software*: Simulación de diseños y procesos.
- Función principal: Permite la simulación de diseños, dispositivos y procesos en una variedad de campos de la ingeniería y la investigación científica.
- Utilidad: Proporciona una comprensión profunda de procesos y diseños mediante la integración de múltiples fenómenos físicos en la simulación.
- Aplicaciones: Investigación científica, optimización de procesos, diseño de dispositivos en diversos campos de la ingeniería.

Incluye, además, todos los pasos del AEF, desde definir las geometrías y propiedades de los materiales hasta realizar los cálculos y la obtención de resultados. Es una herramienta útil para optimizar procesos y dispositivos de manera eficiente y precisa, situación que no se lograría mediante métodos experimentales y pruebas de prototipos que no son repetibles (Figura 19) (52).

A large, stylized wireframe graphic of a human brain, rendered in a light blue color, serves as the background for the entire slide. The brain is shown from a top-down perspective, with its characteristic folds and grooves represented by a grid of lines.

UNIDAD 5

VENTAJAS

LIMITACIONES Y

CONCLUSIONES

DEL AEF



Ventajas

- El AEF tiene la capacidad de proporcionar información meticulosa y cuantificable de cualquier parte dentro del modelo matemático realizado.
- Una de sus ventajas más destacadas reside en la capacidad para representar el comportamiento de una estructura real, mediante un modelo de elementos finitos.
- El AEF se puede aplicar a diversos problemas físicos y su poder reside en la versatilidad del método.
- Permite la visualización de estructuras superpuestas, así como la evaluación de especificaciones y propiedades de estructuras muy complejas como la anatomía craneofacial.
- Se puede localizar la magnitud y dirección de una fuerza aplicada, además de visualizar puntos de esfuerzo que se pueden estimar teóricamente.
- Permite asignar propiedades físicas a los materiales estudiados, a partir de datos de su comportamiento obtenidos mediante ensayos mecánicos.
- Es un proceso fácilmente repetible, además de ser una técnica no invasiva.
- Es un proceso que permite la ejecución de análisis estáticos y dinámicos.
- El método se puede llevar a cabo en una cantidad reducida de tiempo.

No presenta implicaciones éticas importantes, ya que no requiere ensayos clínicos y demás pruebas en seres vivos (9, 53, 54).

Limitaciones

- La simplificación de la geometría del modelo conducirá inevitablemente a resultados inconsistentes.
- La incorrecta interpretación de la información y estadística que se obtiene mediante el AEF puede producir resultados totalmente equivocados.
- Es necesario tener conocimientos informáticos para la ejecución del análisis.
- Se debe disponer de información precisa y correcta sobre el comportamiento mecánico de la estructura o material que se esté evaluando (54, 55).

Conclusiones

- El AEF posibilita el estudio de esfuerzos y deformaciones de estructuras con geometrías altamente complejas. En el ámbito de la medicina, se ha convertido en una alternativa de estudio para situaciones en las que estructuras del cuerpo humano no pueden ser evaluadas *in vivo*.
- El AEF ha sido ampliamente usado como una herramienta de investigación en diversas ramas de la odontología, como la periodoncia, la rehabilitación oral, en el análisis de traumatismos y fracturas, endodoncia y ortodoncia.
- El AEF es una herramienta invaluable para comprender el comportamiento de estructuras y materiales complejos en un sinnúmero de áreas aplicables, incluyendo la biomecánica.
- La optimización de diseños, la reducción de costos y el ahorro de tiempo mediante los *software* son fundamentales, al permitir que ingenieros y diseñadores realicen análisis detallados y simulaciones, antes de la fabricación física de prototipos.

REFERENCIAS

1. Chang Y, Tambe AA, Maeda Y, Wada M, Gonda T. Finite element analysis of dental implants with validation: to what extent can we expect the model to predict biological phenomena? A literature review and proposal for classification of a validation process. *Int J Implant Dent*. 2018;4(1):7.
2. Macchi RL. Materiales dentales. 4a edición. Panamericana, editor. 2004.
3. Federación de enseñanza de CCOO de Andalucía. Tipos de esfuerzos físicos. *Temas para la Educ*. 2011;15(1):1–18.
4. Erazo Montengro ME. Resistencia al desprendimiento de brackets mediante fuerzas de cizallamiento, en el esmalte dental previamente desproteinizado. Estudio in vitro en la Facultad de Odontología de la Universidad Central del Ecuador. 2017.
5. Acosta Landin R, Ramirez Villarreal D, Garza Espinosa B. Cálculo del factor de concentración de esfuerzos utilizando SolidWorks. *Proy Inst y Vincul*. 2014;03:29–38.
6. Equipo de enciclopedia significados. Homogéneo. 2024.
7. Sreirekha A, Bashetty K. Infinite to finite: An overview of finite element analysis. *Indian J Dent Res*. 2010;21(3):425–32.
8. Maminkas J, Puisys A, Kuoppala R, Raustia A, Juodzbalsys G. The prosthetic influence and biomechanics on peri-implant strain: a systematic literature review of finite element studies. *J Oral Maxillofac Res*. 2016;7(3):e4.

9. Trivedi S. Finite element analysis: A boon to dentistry. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2014;4(3):200–3.
10. Gigante M. Finite Element Analysis: What Is It and How Does It Work? [Internet]. G2- Business Software Reviews. 2022. Available from: <https://www.g2.com/articles/finite-element-analysis%0A>
11. Williamson F. Richard Courant and the finite element method: A further look. *Hist Math.* 1980;7(4):369–78.
12. Arjona A. Principio del palomar [Internet]. *Matemáticas recreativas y educativas.* 2014. Available from: <https://matematicasrecreativas y educativas.blogspot.com/2014/08/principio-del-palomar.html>
13. Reid C. Richard Courant: Courant in Göttingen and New York. In: *The Story of an Improbable Mathematician.* New York: Verlag; 1976. p. 314.
14. De León M. El Instituto Courant cumple 75 años [Internet]. 2011. Available from: <https://www.madrimasd.org/blogs/matematicas/2011/08/24/133098>
15. Courant R, Hilbert D. *Methoden Der Mathematischen.* Volumen 1. Berlin: Verlag von Julius Springer; 1924. 158–159 p.
16. Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bull Am Math Soc.* 1943;49(1):1–23.
17. Turner MJ, Clough RW, Martin HC, J. TL. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J Aeronaut Sci.* 1956;23(9):805–23.
18. Fraeijns de Veubeke B. Displacement and equilibrium models in the finite element method. In: Zienkiewicz OC, Holister GS, editors. *Stress analysis.* Wiley. New York; 1965. p. 145–97.
19. Clough RW. The finite element in plane stress analysis. In: *Proceedings of the Second American Society of Civil Engineers Conference on Electronic Computation.* Pittsburgh; 1960.

20. Strang G. Piecewise polynomials and the finite element method. *Am Math Soc.* 1973;79(6):1128–37.
21. Thresher RW, Saito GE. The stress analysis of human teeth. *J Biomech.* 1973;6(5):443–9.
22. Rees JS. The role of cuspal flexure in the development of abfraction lesions, a finite element study. *Eur J Oral Sci.* 1998;106(6):1028–32.
23. Gao J, Xu W, Ding Z. 3D finite element mesh generation of complicated tooth model based on CT slices. *Comput Methods Programs Biomed.* 2006;82(2):97–105.
24. Baggi L, Di Girolamo M, Vairo G, Sannino G. Comparative evaluation of osseointegrated dental implants based on platform-switching concept: influence of diameter, length, thread shape, and in-bone positioning depth on stress-based performance. *Comput Math Methods Med.* 2013;2013:250929.
25. Baggi L, Cappelloni I, Di Girolamo M, Maceri F, Vairo G. The influence of implant diameter and length on stress distribution of osseointegrated implants related to crestal bone geometry: a three-dimensional finite element analysis. *J Prosthet Dent.* 2008;100(6):422–31.
26. Bowley JF, Ichim IP, Kieser JA, Swain M V. FEA evaluation of the resistance form of a premolar crown. *J Prosthodont.* 2013;22(4):304–12.
27. Dejak B, Młotkowski A, Langot C. Three-dimensional finite element analysis of molars with thin-walled prosthetic crowns made of various materials. *Dent Mater.* 2012;28(4):433–41.
28. Liu S, Liu Y, Xu J, Rong Q, Pan S. Influence of occlusal contact and cusp inclination on the biomechanical character of a maxillary premolar: a finite element analysis. *J Prosthet Dent.* 2014;112(5):1238–45.

29. De Kok P, Kleverlaan CJ, De Jager N, Kuijs R, Feilzer AJ. Mechanical performance of implant-supported posterior crowns. *J Prosthet Dent*. 2015;114(1):59–66.
30. Al Mortadi N, Bataineh K, Al Janaideh M. Fatigue failure load of molars with thin-walled prosthetic crowns made of Various materials: a 3D-FEA theoretical study. *Clin Cosmet Investig Dent*. 2020;12:581–93.
31. Da Silva BR, Moreira Neto JJS, da Silva JI, de Aguiar ASW. Three-dimensional finite element analysis of the maxillary central incisor in two different situations of traumatic impact. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*. 2013;16(2):158–64.
32. Qian L, Todo M, Morita Y, Matsushita Y, Koyano K. Deformation analysis of the periodontium considering the viscoelasticity of the periodontal ligament. *Dent Mater*. 2009;25(10):1285–92.
33. Aversa R, Apicella D, Perillo L, Sorrentino R, Zarone F, Ferrari M, et al. Non-linear elastic three-dimensional finite element analysis on the effect of endocrown material rigidity on alveolar bone remodeling process. *Dent Mater*. 2009;25(5):678–90.
34. Su MZ, Chang HH, Chiang YC, Cheng JH, Fuh LJ, Wang CY, et al. Modeling viscoelastic behavior of periodontal ligament with nonlinear finite element analysis. *J Dent Sci*. 2013;8(2):121–8.
35. Huempfner-Hierl H, Schaller A, Hemprich A, Hierl T. Biomechanical investigation of naso-orbitoethmoid trauma by finite element analysis. *Br J Oral Maxillofac Surg*. 2014;52(9):850–3.
36. Guzmán Martínez LM, Aristizabal Mulett MC. Efectos sobre el ligamento periodontal durante la expansión maxilar, mediante el uso de alineadores termoformados con y sin la utilización de aditamentos en resina evaluado en un modelo de elementos finitos. Universidad Autónoma de Manizales; 2020.

37. Ammar HH, Ngan P, Crout RJ, Mucino VH, Mukdadi OM. Three-dimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011;139(1):59–71.
38. Subramaniam V, Indira R, Srinivasan M. Stress distribution in rotary nickel titanium instruments: A finite element analysis. *J Conserv Dent.* 2007;10(4):112-8.
39. Kim HC, Cheung GSP, Lee CJ, Kim BM, Park JK, Kang S II. Comparison of forces generated during root canal shaping and residual stresses of three nickel-titanium rotary files by using a three-dimensional finite-element analysis. *J Endod.* 2008;34(6):743–7.
40. Hong J, Xia WW, Xiong HG. Analysis of the effect on the stress of root canal wall by vertical and lateral condensation procedures. *Shanghai J Stomatol.* 2003;12(5):359–61.
41. Chun Li L, Chih Han C, Cha Hsiang W, Ching Chang K, Huey Er L. Numerical investigation of the factors affecting interfacial stresses in an MOD restored tooth by auto-meshed finite element method. *J Oral Rehabil.* 2001;28(6):517–25.
42. Magne P. Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. *Dent Mater.* 2007;23(5):539–48.
43. Pessoa RS, Muraru L, Júnior EM, Vaz LG, Vander J, Duyck J, et al. Influence of implant connection type on the biomechanical environment of immediately placed implants – CT-based nonlinear, three-dimensional finite element analysis. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2010;12(3):219–34.
44. Trujillo YR. Elementos finitos, análisis lineal y no lineal [Internet]. Esingeniería. 2020. Available from: <https://esingenieria.pro/elementos-finitos-2-analisis-no-lineal/%0A>
45. Dassault Systèmes. Ayuda de SOLIDWORKS: Análisis de contacto [Internet]. 2011. Available from: https://help.solidworks.com/2011/spanish/solidworks/cworks/legacyhelp/simulation/meshing_topics/id_contact_gaps_options.html%0A

46. Pérez Flores GE. Modelado y análisis vibracional y de desplazamiento de la maquina de fallos. Universidad Carlos III de Madrid; 2009.
47. Arizona State University. SolidWorks Certification and Software at ASU Fulton Schools of Engineering [Internet]. Engineering Technical Services (ETS). 2023. Available from: <https://ets.engineering.asu.edu/solidworks-certification-and-software-at-asu-fulton-schools-of-engineering/>
48. Dassault Systèmes. Funcionalidades básicas de SolidWorks [Internet]. ¿Qué es SolidWorks? 2011. Available from: https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/sldworks/LegacyHelp/Sldworks/Fundamentals/SW_Fundamentals.htm?id=db60be4b3c514fd89d9b7db0fb0334d3#Pg0
49. Dassault Systèmes. Conceptos básicos [Internet]. 2011. Available from: https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/sldworks/LegacyHelp/Sldworks/Fundamentals/Basic_Concepts.htm
50. Autodesk. Autodesk AutoCAD: con la confianza de millones de personas y diseñado para agilizar tu creatividad [Internet]. 2023. Available from: <https://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
51. Navarro y Soler CAD-PLM software. Ansys [Internet]. 2023. Available from: <https://www.nysplm.com/ansys/#:~:text=Ansys es el Software líder,una única plataforma de trabajo.>
52. COMSOL. Software de simulación COMSOL Multiphysics [Internet]. 2023. Available from: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
53. DeTolla D, Andreana S, Patra A, Buhite R, Comella B. Role of the finite element model in dental implants. J Oral Implantol. 2000;26(2):77–81.
54. Reddy MS, Sundram R, Eid Abdemagyd HA. Application of Finite Element Model in Implant Dentistry: A Systematic Review. J Pharm BioaAllied Sci. 2019;11(2):85–91.

55. Van Staden R, Guan H, Loo Y. Application of the finite element method in dental implant research. *Comput Methods Biomech Biomed Eng.* 2006;9(4):257–70.
56. Dassault Systèmes. Ayuda de SOLIDWORKS: Análisis estático lineal [Internet]. 2011. Available from: https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/StaticAnalysis/IDH_Analysis_Background_Linear_Static_Analysis.html?format=P&value=%0A
57. Mirlisenna G. Método de los elementos finitos: ¿qué es? [Internet]. ESSS. 2016. Available from: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
58. SolidWorks LATAM y España. Las novedades de SOLIDWORKS 2023 [Internet]. 2022. Available from: <https://youtu.be/V8fglH1Vqts?si=7KxYiGVmKGMIGzO6>
59. Ouldierou A, Merdji A, Aminallah L, Mehboob H, Mehboob A, Roy S, et al. Functionally graded ceramics (FGC) dental abutment with implant-supported cantilever crown: Finite element analysis. *Compos Commun.* 2023;38:101514.
60. AutoCAD. Introducing the My Insights feature | AutoCAD 2023 [Internet]. 2022. Available from: <https://youtu.be/hJyaMSHdRU4?si=OBgjHgQeQjiAsGSZ>
61. Ansys Learning. Ball Impact on a Plate Using Ansys LS-Dyna - Part-1 [Internet]. 2021. Available from: <https://youtu.be/IIlsZpdfFDM?si=m2nfgRNmd2Mv7MgG>
62. COMSOL. Set Up the Model Environment in COMSOL Multiphysics (1/8) [Internet]. 2015. Available from: <https://youtu.be/82L4eBYYGkU?si=n-cSwXcQXgoz2Ftj>

Esta guía se publicó en
diciembre de 2025.

Manizales, Caldas.

A través de esta cartilla se darán a conocer conceptos claves sobre el Método de Elementos Finitos o Análisis de Elementos Finitos para los profesionales de la odontología que se desempeñan, tanto en el ámbito clínico como en el ámbito académico. La comprensión de los conceptos del MEF permitirá a dichos profesionales tener las herramientas suficientes para considerarlo como un método de resolución de problemas de la biomecánica relacionada con la cavidad oral que no se pueden estudiar in vivo. Los resultados de estudios que empleen el MEF podrán ser un recurso para guiar la toma de decisiones clínicas basadas en la evidencia científica.

