



Facultad de Ciencias de la Salud

Especialidad de Rehabilitación Oral y Prótesis Implantó Asistida

Tema:

**Concentración De Fuerzas De Restauraciones Tipo Onlay Realizadas Con
Diferentes Materiales Mediante Elemento Finito.**

**Trabajo de titulación para la obtención de Título de Especialista en Rehabilitación
Oral y Prótesis Implantó Asistida**

Presentada por:

Evelin Jaqueline Toapanta Chávez

Tutor:

Dr. Leandro Azambuja Reichert

Quito, Marzo del 2026

Resumen

Objetivo: Analizar comparativamente la concentración y distribución de tensiones en restauraciones tipo onlay elaboradas con resina compuesta convencional y resina fotopolimerizable para impresión tridimensional mediante el método de análisis por elementos finitos. **Materiales y métodos:** Se realizó un estudio experimental comparativo in silico utilizando un modelo tridimensional de un molar mandibular preparado para restauración tipo onlay. La geometría fue digitalizada en formato STL, refinada y convertida a un modelo sólido para su análisis estructural. Se generó un mallado tetraédrico tridimensional, verificando la convergencia numérica. Se asignaron propiedades mecánicas elásticas lineales e isotrópicas a esmalte, dentina y materiales restauradores. Se aplicaron dos condiciones de carga: axial vertical de 679,60 N y oblicua a 45° con igual magnitud. Se evaluaron tensión equivalente de von Mises, tensión principal máxima y deformación total.

Resultados: Bajo carga axial, ambos materiales mostraron concentración de tensiones en cúspides funcionales, con valores máximos ligeramente menores en la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional. La carga oblicua generó un incremento aproximado del 40 % en la tensión máxima respecto a la condición axial, desplazando las zonas críticas hacia la región cervical. La distribución tensional fue similar en ambos materiales, aunque con diferencias discretas en magnitud. **Conclusiones:** La dirección de la carga influyó significativamente en la concentración de tensiones del complejo diente–restauración. Ambos materiales presentaron comportamiento biomecánico comparable; sin embargo, la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional evidenció valores ligeramente inferiores de tensión máxima. El análisis por elementos finitos demostró ser una herramienta válida para evaluar el desempeño estructural de restauraciones tipo onlay.

Palabras clave: RESTAURACIÓN DENTAL PERMANENTE, ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS, RESINAS COMPUESTAS, IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL, ESFUERZO MECÁNICO

Declaración De Aceptación De Norma Ética Y Derechos

El presente documento se ciñe a las normas éticas y reglamentarias de la Universidad Hemisferios. Así, declaro que lo contenido en este ha sido redactado con entera sujeción al respeto de los derechos de autor, citando adecuadamente las fuentes. Por tal motivo, autorizo a la Biblioteca a que haga pública su disponibilidad para lectura dentro de la institución, a la vez que autorizo el uso comercial de mi obra a la Universidad Hemisferios, siempre y cuando se me reconozca el cuarenta por ciento (40%) de los beneficios económicos resultantes de esta explotación.

Además, me comprometo a hacer constar, por todos los medios de publicación, difusión y distribución, que mi obra fue producida en el ámbito académico de la Universidad Hemisferios.

De comprobarse que no cumplí con las estipulaciones éticas, incurriendo en caso de plagio, me someto a las determinaciones que la propia Universidad plantee.

Evelin Jaqueline Toapanta Chavez

1805349519

Dedicatoria

Esta etapa tan significativa de mi vida quiero dedicarla, en primer lugar, a Dios, por permitirme cumplir uno de mis sueños más anhelados.

A mi compañero de vida, mi amado Oliver, por ser mi soporte y brindarme su apoyo incondicional.

De manera muy especial, a mi adorada madre Marianita, quien siempre me alentó a perseguir mis sueños y ha sido mi apoyo en todo momento.

A mis queridas hermanas, Cheche y Pame, quienes han sido mi mayor motivación y mi fuerza para superar cada obstáculo. Sin ustedes, este logro no habría sido posible; por eso, esta meta alcanzada se la dedico por completo a ustedes.

Finalmente, a mi pequeña Martina, que desde el día en que llegó llenó mi alma de amor. Cada paso que doy también es por ella.

Ustedes son mi todo, y me faltará vida para agradecerles. Les amo con el alma.

Índice

Resumen.....	2
Declaración De Aceptación De Norma Ética Y Derechos	4
Dedicatoria.....	5
Índice.....	6
Índice de figuras.....	7
Índice de tablas	8
Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
Materiales y métodos	13
Diseño del estudio.....	13
Modelado geométrico	14
Generación del mallado	16
Asignación de propiedades mecánicas.....	18
Condiciones de contorno y aplicación de cargas	20
Variables analizadas, criterios de evaluación y configuración de simulaciones	23
Resultados.....	24
Discusión.....	28
Conclusiones.....	31
Referencias.....	32

Índice de figuras

Figura 1. Modelo tridimensional del órgano dental 36 tras el proceso de digitalización y depuración geométrica en formato STL.	14
Figura 2. Diseño digital de la restauración tipo onlay con espesores establecidos según criterios biomecánicos.	15
Figura 3. Modelo tridimensional sólido del conjunto diente–restauración convertido a formato STEP.....	16
Figura 4. Curva de convergencia de malla en función del número de elementos y estabilización de la tensión máxima de von Mises.	18
Figura 5. Modelo tridimensional del conjunto diente–restauración con mallado definitivo refinado en zonas críticas.....	18
Figura 6. Representación esquemática de las condiciones de contorno	23
Figura 7. Distribución de tensión equivalente de von Mises bajo carga axial: (A, imagen izquierda) restauración elaborada con resina compuesta convencional; (B, imagen derecha) restauración elaborada con resina fotopolimerizable para impresión tridimensional.....	28
Figura 8. Distribución de tensión equivalente de von Mises bajo carga oblicua a 45°: (A, imagen izquierda) restauración elaborada con resina compuesta convencional; (B, imagen derecha) restauración elaborada con resina fotopolimerizable para impresión tridimensional.	28

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis de convergencia de malla según número de elementos y tensión máxima de Von Mises	17
Tabla 2. Propiedades mecánicas asignadas a los materiales del modelo	20
Tabla 3. Parámetros considerados en las condiciones de contorno y simulación.....	22
Tabla 4. Resultados comparativos de tensiones y deformación según material restaurador y condición de carga	25
Tabla 5. Distribución de tensión equivalente de von Mises (MPa) por región anatómica según material y condición de carga.....	26
Tabla 6. Incremento porcentual de la tensión máxima de von Mises al comparar carga oblicua respecto a carga axial	27

CONCENTRACIÓN DE FUERZAS DE RESTAURACIONES TIPO ONLAY REALIZADAS CON DIFERENTES MATERIALES MEDIANTE ELEMENTO FINITO

Evelin Jaqueline Toapanta Chávez

evehavez26@gmail.com

Resumen

Objetivo: Analizar comparativamente la concentración y distribución de tensiones en restauraciones tipo onlay elaboradas con resina compuesta convencional y resina fotopolimerizable para impresión tridimensional mediante el método de análisis por elementos finitos. **Materiales y métodos:** Se realizó un estudio experimental comparativo in silico utilizando un modelo tridimensional de un molar mandibular preparado para restauración tipo onlay. La geometría fue digitalizada en formato STL, refinada y convertida a un modelo sólido para su análisis estructural. Se generó un mallado tetraédrico tridimensional, verificando la convergencia numérica. Se asignaron propiedades mecánicas elásticas lineales e isotrópicas a esmalte, dentina y materiales restauradores. Se aplicaron dos condiciones de carga: axial vertical de 679,60 N y oblicua a 45° con igual magnitud. Se evaluaron tensión equivalente de von Mises, tensión principal máxima y deformación total.

Resultados: Bajo carga axial, ambos materiales mostraron concentración de tensiones en cúspides funcionales, con valores máximos ligeramente menores en la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional. La carga oblicua generó un incremento aproximado del 40 % en la tensión máxima respecto a la condición axial, desplazando las zonas críticas hacia la región cervical. La distribución tensional fue similar en ambos materiales, aunque con diferencias discretas en magnitud. **Conclusiones:** La dirección de la carga influyó significativamente en la concentración de tensiones del complejo diente–restauración. Ambos materiales presentaron comportamiento biomecánico comparable; sin

embargo, la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional evidenció valores ligeramente inferiores de tensión máxima. El análisis por elementos finitos demostró ser una herramienta válida para evaluar el desempeño estructural de restauraciones tipo onlay.

Palabras clave: Restauración Dental Permanente, Análisis por Elementos Finitos, Resinas Compuestas, Impresión Tridimensional, Esfuerzo Mecánico

Abstract

Objective: To comparatively analyze the stress concentration and distribution in onlay restorations fabricated with conventional resin composite and 3D-printable photopolymer resin using finite element analysis. **Materials and Methods:** A comparative experimental in silico study was conducted using a three-dimensional model of a mandibular molar prepared for an onlay restoration. The geometry was digitized in STL format, refined, and converted into a solid model for structural analysis. A three-dimensional tetrahedral mesh was generated, and numerical convergence was verified. Linear elastic and isotropic mechanical properties were assigned to enamel, dentin, and restorative materials. Two loading conditions were applied: a vertical axial load of 679.60 N and an oblique load at 45° with the same magnitude. Von Mises equivalent stress, maximum principal stress, and total deformation were evaluated.

Results: Under axial loading, both materials exhibited stress concentration primarily at the functional cusps, with slightly lower maximum values observed in the 3D-printable photopolymer resin. Oblique loading produced an approximate 40% increase in maximum stress compared with the axial condition, shifting critical regions toward the cervical area. Stress distribution patterns were similar for both materials, although discrete differences in magnitude were observed. **Conclusions:** Load direction significantly influenced stress concentration within the tooth–restoration complex. Both materials demonstrated comparable

biomechanical behavior; however, the 3D-printable photopolymer resin exhibited slightly lower maximum stress values. Finite element analysis proved to be a valid and reproducible tool for evaluating the structural performance of onlay restorations.

Keywords: PERMANENT DENTAL RESTORATION; FINITE ELEMENT ANALYSIS; COMPOSITE RESINS; THREE-DIMENSIONAL PRINTING; MECHANICAL STRESS

Introducción

El desarrollo de la odontología digital ha transformado significativamente los protocolos de rehabilitación oral, permitiendo la fabricación de restauraciones indirectas mediante flujos de trabajo asistidos por computadora (CAD/CAM) con alta precisión y reproducibilidad (Hoffmann et al., 2025). La incorporación de tecnologías de escaneo intraoral, diseño tridimensional y manufactura aditiva ha ampliado las opciones terapéuticas disponibles, favoreciendo abordajes mínimamente invasivos y personalizados (Chen et al., 2025; Awad et al., 2026). En este contexto, las restauraciones parciales indirectas, como las tipo onlay, han ganado relevancia clínica por su capacidad de preservar mayor cantidad de estructura dental remanente en comparación con las coronas totales (Fidancıoğlu et al., 2025; Nikolova et al., 2025).

Las restauraciones tipo onlay representan una alternativa conservadora para el tratamiento de molares con pérdida estructural extensa, ya que permiten reforzar cúspides debilitadas y distribuir las cargas oclusales de manera más favorable (Boşiş et al., 2024; Vu & Doan, 2024). Sin embargo, el éxito biomecánico de estas restauraciones depende no solo del diseño cavitario, sino también de las propiedades mecánicas del material restaurador empleado (Mandurino et al., 2025; Hoffmann et al., 2025). En la actualidad, además de las resinas compuestas convencionales, se han introducido resinas fotopolimerizables para

impresión tridimensional, cuyo uso en restauraciones definitivas ha incrementado debido a su eficiencia de fabricación y propiedades mecánicas optimizadas. No obstante, la evidencia respecto a su comportamiento biomecánico comparativo aún es limitada (Boiş et al., 2024).

Desde una perspectiva estructural, la interacción entre el material restaurador y el tejido dentario remanente influye directamente en la distribución y concentración de tensiones bajo carga funcional (Demircan et al., 2023; Moga et al., 2023). Las fuerzas masticatorias, especialmente aquellas aplicadas de forma excéntrica u oblicua, pueden generar concentraciones tensionales en regiones críticas como las cúspides funcionales y la zona cervical, incrementando el riesgo de fractura o falla adhesiva (Doğan et al., 2024; Zhang et al., 2025). Por ello, comprender el comportamiento mecánico del complejo diente–restauración resulta fundamental para optimizar la selección de materiales y el diseño restaurador (Behera et al., 2023).

El análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA) constituye una herramienta ampliamente utilizada en investigación odontológica para evaluar la distribución interna de tensiones en estructuras dentales bajo condiciones simuladas (Meira et al., 2012; Atif et al., 2024). Esta metodología permite descomponer geometrías complejas en elementos discretos y analizar numéricamente su respuesta ante diferentes escenarios de carga, proporcionando información detallada sobre zonas críticas de concentración de esfuerzos sin necesidad de intervención clínica directa (Falcinelli et al., 2023; Alsayed et al., 2026).

A pesar del creciente interés en materiales para impresión tridimensional aplicados a restauraciones indirectas, persiste la necesidad de estudios comparativos que analicen su comportamiento biomecánico frente a resinas compuestas convencionales en restauraciones tipo onlay, particularmente bajo diferentes direcciones de carga (Boiş et al., 2024; Mohammadi et al., 2025). Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar

comparativamente la concentración de tensiones en restauraciones tipo onlay elaboradas con resina compuesta convencional y resina fotopolimerizable para impresión tridimensional mediante el método de elementos finitos.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio experimental comparativo *in silico* mediante el método de análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA), con el objetivo de evaluar el comportamiento biomecánico de restauraciones indirectas tipo onlay elaboradas con resina compuesta convencional y resina impresa tridimensional (Lahoud et al., 2024). El enfoque *in silico* permitió analizar la respuesta estructural del complejo diente–restauración bajo condiciones de carga controlada, garantizando un entorno estandarizado y reproducible para la comparación entre materiales (Atif et al., 2024).

El análisis por elementos finitos fue seleccionado por su amplia aplicación en investigación odontológica para estudiar la distribución interna de tensiones en estructuras dentales y restauradoras (Falcinelli et al., 2023). Esta metodología permitió descomponer la geometría tridimensional del sistema en elementos discretos interconectados y resolver numéricamente su comportamiento mecánico, facilitando la identificación de zonas críticas de concentración de tensiones asociadas a posibles fallas estructurales, fracturas o compromisos adhesivos (Özcan et al., 2024).

El diseño comparativo incluyó dos modelos diferenciados exclusivamente por el material restaurador, manteniendo constantes las condiciones geométricas, estructurales y de carga (Kintopp et al., 2024). Este planteamiento permitió atribuir las variaciones observadas en la distribución de tensiones al comportamiento mecánico intrínseco de cada material,

proporcionando un modelo biomecánico controlado para el análisis objetivo de su desempeño estructural (Bučević Sojčić et al., 2025).

Modelado geométrico

El modelado geométrico se inició mediante la digitalización tridimensional de un molar mandibular correspondiente al órgano dental 36, previamente preparado para una restauración indirecta tipo onlay. La geometría fue obtenida en formato STL (Standard Tessellation Language), permitiendo registrar con alta resolución la morfología superficial del tejido remanente (Chen et al., 2025). Posteriormente, el archivo digital fue sometido a un proceso de depuración y refinamiento geométrico orientado a eliminar artefactos, irregularidades superficiales y ruidos propios del procedimiento de escaneo. Asimismo, se realizó la segmentación del modelo con el fin de aislar exclusivamente la pieza dental de interés y excluir estructuras no relevantes para el análisis (AlKahtani et al., 2025). El resultado del modelo dental depurado se presenta en la Figura 1.

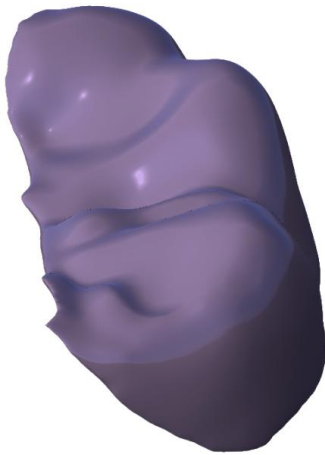
Figura 1. Modelo tridimensional del órgano dental 36 tras el proceso de digitalización y depuración geométrica en formato STL.



Una vez optimizada la geometría de la pieza dental, se procedió al diseño digital de la restauración tipo onlay mediante software de diseño asistido por computadora. La restauración fue modelada respetando criterios biomecánicos y conservadores, estableciendo

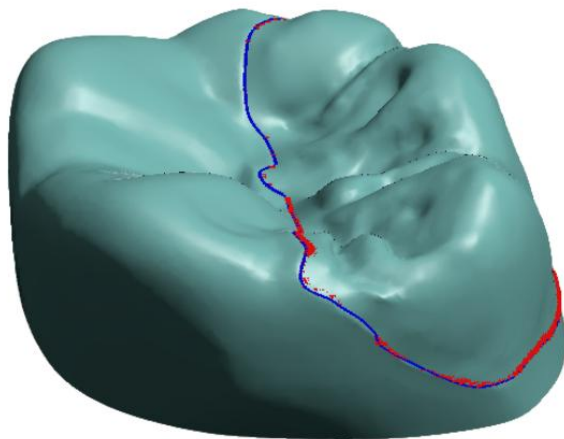
un espesor uniforme de 2,0 mm y un incremento a 2,5 mm en las cúspides funcionales, con el propósito de reforzar las zonas sometidas a mayor demanda oclusal (Fidancıoğlu et al., 2025). Se aseguró una adaptación marginal precisa y una integración anatómica armónica con la superficie oclusal remanente. La configuración geométrica definitiva de la restauración puede observarse en la Figura 2 (Nikolova et al., 2025).

Figura 2. Diseño digital de la restauración tipo onlay con espesores establecidos según criterios biomecánicos.



Posteriormente, el conjunto diente–restauración, originalmente representado como malla superficial en formato STL, fue convertido a un formato sólido editable (STEP), permitiendo generar un cuerpo tridimensional cerrado y volumétrico, libre de discontinuidades internas o vacíos estructurales (Awad et al., 2026, AlKahtani et al., 2025). Esta transformación fue esencial para obtener un modelo geométrico continuo y físicamente coherente, adecuado para análisis estructurales posteriores. El modelo sólido integrado del complejo diente–restauración se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Modelo tridimensional sólido del conjunto diente–restauración convertido a formato STEP.



Generación del mallado

La generación del mallado constituyó el proceso de discretización del modelo geométrico sólido en un conjunto finito de elementos interconectados mediante nodos, permitiendo transformar el continuo estructural en un sistema matemáticamente resoluble (Atif et al., 2024). Para este estudio se emplearon elementos tridimensionales de tipo tetraédrico, seleccionados por su adecuada adaptación a geometrías anatómicas complejas y superficies curvas propias del complejo diente–restauración (Xu et al., 2025; He et al., 2024). El mallado permitió subdividir el modelo en pequeños volúmenes elementales, garantizando una representación precisa del comportamiento mecánico bajo condiciones de simulación estructural (Soliman et al., 2025).

Con el fin de asegurar la independencia de los resultados respecto al tamaño del elemento, se realizó un análisis de convergencia de malla (Awad et al., 2026). Este procedimiento consistió en generar cinco simulaciones sucesivas con incremento progresivo del número de elementos, evaluando en cada iteración el valor máximo de la tensión equivalente de von Mises, siguiendo metodologías reportadas en estudios biomecánicos recientes (Alsayed et al., 2026). La variación porcentual entre simulaciones consecutivas fue calculada para determinar la estabilización del modelo. Se adoptó como criterio de

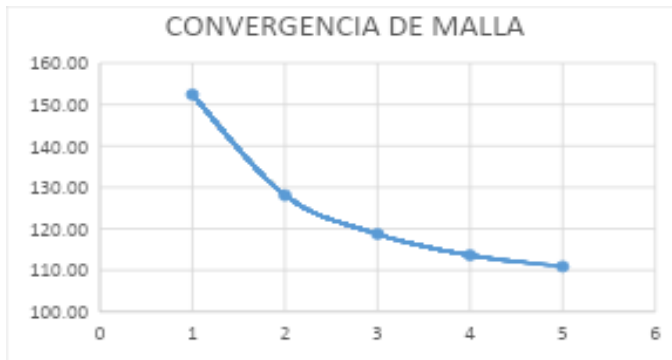
convergencia una variación inferior al 5 %, valor ampliamente reportado en estudios de análisis estructural para garantizar precisión numérica sin incremento innecesario del costo computacional (Awad et al., 2026; Soliman et al., 2025). Los resultados del análisis de convergencia se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de convergencia de malla según número de elementos y tensión máxima de Von Mises

Simulación	Número de elementos	Tensión máxima (MPa)	Variación respecto a simulación anterior (%)
1	45 000	152,40	—
2	85 000	128,10	15,94 %
3	130 000	118,75	7,30 %
4	185 000	113,60	4,34 %
5	240 000	110,90	2,38 %

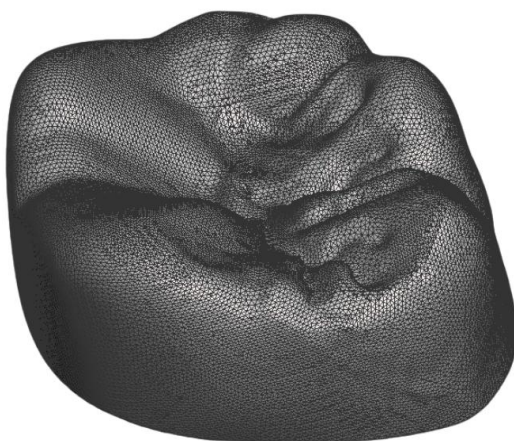
La tendencia de estabilización progresiva de la tensión máxima en función del número de elementos puede observarse en la Figura 4, donde se evidencia una disminución inicial marcada seguida de una meseta de convergencia a partir de la cuarta simulación, comportamiento consistente con curvas de convergencia descritas en modelos tridimensionales odontológicos (Xu et al., 2025). Esta estabilización confirmó que el refinamiento adicional no producía variaciones significativas en los resultados, validando la independencia de malla (Alsayed et al., 2026).

Figura 4. Curva de convergencia de malla en función del número de elementos y estabilización de la tensión máxima de von Mises.



Una vez verificada la convergencia numérica y evaluada la calidad geométrica de los elementos mediante parámetros de control como relación de aspecto y distorsión, se seleccionó el mallado correspondiente a la quinta simulación como configuración definitiva para el análisis estructural, en concordancia con recomendaciones metodológicas para estudios de elementos finitos en odontología (Atif et al., 2024). El modelo final discretizado, con refinamiento localizado en las zonas de mayor interés biomecánico, se presenta en la Figura 5 (He et al., 2024).

Figura 5. Modelo tridimensional del conjunto diente–restauración con mallado definitivo refinado en zonas críticas.



Asignación de propiedades mecánicas

Una vez definido el modelo geométrico y verificada la convergencia del mallado, se procedió a la asignación de las propiedades mecánicas correspondientes a cada uno de los

materiales involucrados en el complejo diente–restauración. Para el análisis estructural se asumió un comportamiento elástico lineal, homogéneo y continuo, bajo el supuesto de pequeñas deformaciones. Este enfoque ha sido reportado en la literatura reciente de análisis por elementos finitos en odontología restauradora, donde se emplean modelos elásticos lineales para evaluar la distribución inicial de tensiones bajo cargas estáticas simuladas (Atif et al., 2024; Mandurino et al., 2025).

Las estructuras dentarias fueron modeladas considerando al esmalte y la dentina como materiales elásticos lineales (Fuentes Fuentes, 2004). Aunque el esmalte presenta comportamiento anisotrópico en condiciones fisiológicas debido a la orientación de sus prismas, en el presente estudio fue considerado isotrópico con el fin de simplificar el modelo y permitir una comparación directa entre los materiales restauradores (Fuentes Fuentes, 2004). De igual forma, tanto la resina compuesta convencional como la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional fueron definidas como materiales isotrópicos, utilizando valores promedio reportados en literatura científica reciente (Hoffmann et al., 2025; Prause et al., 2024).

Se asignaron los parámetros mecánicos fundamentales para la simulación estructural, incluyendo densidad (ρ), módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν) y resistencia flexural (Mandurino et al., 2025; Prause et al., 2024). El módulo de Young permitió caracterizar la rigidez del material frente a deformaciones elásticas, mientras que el coeficiente de Poisson describió la relación entre deformación longitudinal y transversal bajo carga axial. Estos parámetros resultaron determinantes para simular de manera coherente la interacción mecánica entre los tejidos dentarios y los materiales restauradores (Hoffmann et al., 2025; Mandurino et al., 2025).

Tabla 2. Propiedades mecánicas asignadas a los materiales del modelo

Material	Densidad (kg/m³)	Módulo de Young (GPa)	Resistencia flexural (MPa)	Coefficiente de Poisson (ν)	Comportamiento mecánico
Esmalte	2 800	84,0	—	0,30	Isotrópico*
Dentina	2 200	18,0	—	0,31	Isotrópico
Resina compuesta convencional	2 000	4,5	100–120	0,28	Isotrópico
Resina fotopolimerizable para impresión 3D	1 950	4,0	120–140	0,30	Isotrópico

*El esmalte presenta comportamiento anisotrópico en condiciones biológicas; sin embargo, fue modelado como isotrópico para simplificación computacional.

Posteriormente, las propiedades fueron integradas al modelo numérico respetando coherencia dimensional y consistencia de unidades. Esta asignación permitió establecer una base biomecánica estandarizada para la comparación estructural entre los materiales restauradores evaluados (Prause et al., 2024).

Condiciones de contorno y aplicación de cargas

Con el propósito de reproducir un escenario biomecánico clínicamente representativo, se definieron condiciones de contorno estructurales y parámetros ambientales intraorales dentro del modelo tridimensional (Xu et al., 2025). Las restricciones mecánicas fueron aplicadas en la región radicular interna del diente mediante una condición de

empotramiento fijo, limitando los desplazamientos y rotaciones en dicha zona (Zhang et al., 2025). Esta configuración permitió simular el soporte proporcionado por el hueso alveolar sin necesidad de modelar explícitamente el tejido óseo, garantizando estabilidad estructural del sistema durante la simulación (Zhang et al., 2025).

La aplicación de carga se realizó sobre la superficie oclusal de la restauración tipo onlay mediante una fuerza distribuida axial de 679,60 N, orientada en dirección vertical paralela al eje longitudinal del diente. Esta magnitud fue seleccionada por corresponder a valores máximos de fuerza masticatoria reportados en la región molar mandibular (Single tooth bite forces in healthy young adults, 2004). La carga fue aplicada de manera uniforme en las cúspides funcionales, permitiendo evaluar la transmisión de tensiones a través del complejo diente–cemento–restauración bajo condiciones estáticas estructurales (Finite Element Analysis in Dentistry – Improving the Quality of Oral Health Care, 2012). Asimismo, se incorporó una capa de cemento resinoso en la interfase diente–restauración con un espesor uniforme de 50 μm , representativo de parámetros clínicos de cementación adhesiva indirecta (Gönder et al., 2022; Behera et al., 2023).

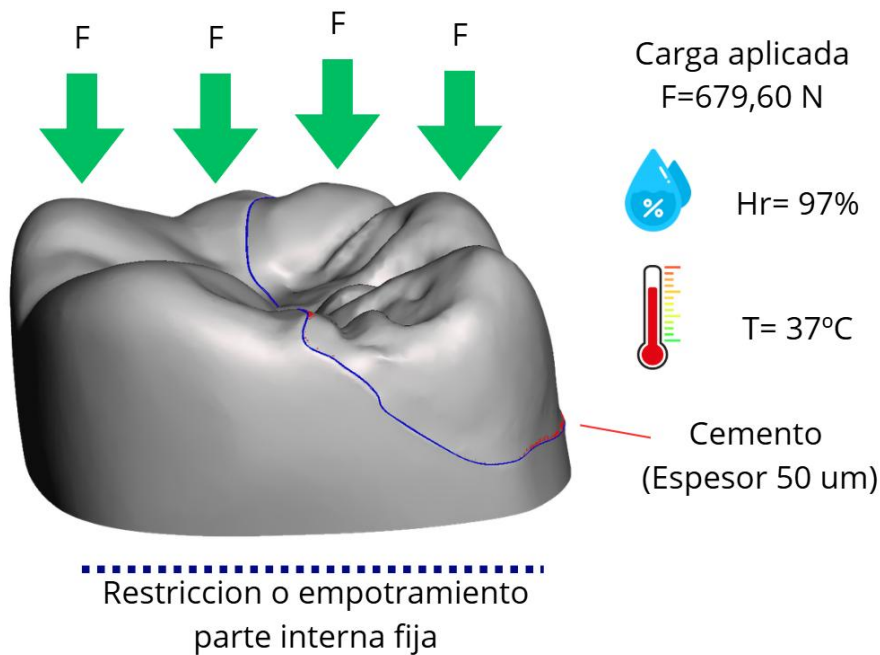
Adicionalmente, se establecieron condiciones ambientales intraorales con el fin de contextualizar el modelo dentro de un entorno fisiológico realista. Se consideró una humedad relativa del 97 % y una temperatura constante de 37 °C, correspondientes a valores promedio del medio bucal (Zhang et al., 2025). Aunque el análisis estructural no contempló un acoplamiento termo-higroscópico, la definición de estos parámetros permitió mantener coherencia biológica en la simulación.

Tabla 3. Parámetros considerados en las condiciones de contorno y simulación

Parámetro	Valor asignado	Descripción
Restricción radicular	Empotramiento fijo	Simulación del soporte óseo alveolar
Tipo de análisis	Estático estructural lineal	Evaluación de respuesta elástica inicial
Magnitud de carga	679,60 N	Fuerza oclusal máxima en región molar
Dirección de carga	Axial vertical	Paralela al eje longitudinal del diente
Tipo de aplicación	Distribuida sobre cúspides funcionales	Simulación de contacto oclusal
Espesor de cemento	50 μm	Capa uniforme en interfase diente–restauración
Humedad relativa	97 %	Condición promedio del ambiente bucal
Temperatura	37 °C	Temperatura fisiológica intraoral
Contacto diente–restauración	Unión perfectamente adherida (bonded)	Simulación de adhesión ideal

La configuración espacial de las restricciones, la dirección de aplicación de la carga y la ubicación de la capa cementante se ilustran en la Figura 6.

Figura 6. Representación esquemática de las condiciones de contorno



Variables analizadas, criterios de evaluación y configuración de simulaciones

Para evaluar el comportamiento biomecánico del complejo diente–restauración se analizaron variables estructurales obtenidas mediante el análisis por elementos finitos. La variable principal fue la tensión equivalente de von Mises (MPa), utilizada como indicador global del estado tensional del material restaurador y del tejido dentario remanente (Demircan et al., 2023). Este parámetro permitió identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos susceptibles de falla estructural bajo carga oclusal simulada (Doğan et al., 2024).

Como variables complementarias se evaluaron las tensiones principales máximas (σ_1) y la deformación total del sistema (mm) (Moga et al., 2023). El análisis de las tensiones principales permitió identificar regiones sometidas a tracción, particularmente relevantes en esmalte y en el material restaurador, dado que estos materiales presentan mayor susceptibilidad a falla bajo esfuerzos tensionales (Moga et al., 2023; Zhang et al., 2025). Por su parte, la deformación total permitió valorar la rigidez global del sistema restaurador y su

capacidad de distribuir la carga aplicada (Zhang et al., 2025). Aunque se modeló una capa de cemento resinoso con espesor uniforme de 50 μm para mantener coherencia clínica, esta no fue considerada como variable independiente de evaluación, sino únicamente como componente estructural del modelo (Gönder et al., 2022).

Los criterios de evaluación se establecieron considerando la magnitud y localización de los valores máximos de tensión en tres regiones de interés biomecánico: restauración, cúspides funcionales del diente y zona cervical (Behera et al., 2023; Demircan et al., 2023). Se realizó comparación directa entre materiales bajo condiciones idénticas de geometría, propiedades mecánicas y restricciones estructurales, atribuyendo las diferencias observadas exclusivamente al comportamiento mecánico intrínseco de cada material restaurador (Moga et al., 2023).

Con el fin de fortalecer la validez biomecánica del estudio y aproximar el modelo a condiciones clínicas reales, se ejecutaron cuatro simulaciones estructurales, correspondientes a dos materiales restauradores y dos condiciones de carga (Zhang et al., 2025). La primera condición consistió en una carga axial vertical de 679,60 N aplicada sobre las cúspides funcionales, mientras que la segunda correspondió a una carga oblicua de igual magnitud aplicada con una inclinación de 45° respecto al eje longitudinal del diente, simulando fuerzas excéntricas masticatorias (Demircan et al., 2023). Esta configuración permitió analizar el comportamiento estructural bajo escenarios tanto de carga céntrica como excéntrica, incrementando la robustez comparativa del estudio (Doğan et al., 2024).

Resultados

Los valores obtenidos del análisis por elementos finitos para cada condición de carga y material restaurador se presentan en la Tabla 4. Se registraron los valores máximos de

tensión equivalente de von Mises, tensión principal máxima y deformación total del sistema, así como la localización de las zonas críticas identificadas en cada simulación.

Bajo carga axial vertical de 679,60 N, ambos materiales mostraron concentraciones de tensión principalmente en la región de las cúspides funcionales. En contraste, la aplicación de carga oblicua a 45° generó un incremento en la magnitud de las tensiones y un desplazamiento de las zonas críticas hacia la región cervical y las vertientes internas cuspidas. Los valores cuantitativos correspondientes a cada simulación se detallan a continuación.

Tabla 4. Resultados comparativos de tensiones y deformación según material restaurador y condición de carga

Material	Tipo de carga	von Mises máximo (MPa)	Tensión principal máxima (MPa)	Deformación total (mm)	Zona crítica identificada
Resina compuesta	Axial (679,60 N)	112,40	73,80	0,018	Cúspide funcional vestibular
Resina impresa 3D	Axial (679,60 N)	105,60	69,20	0,020	Cúspide funcional vestibular
Resina compuesta	Oblicua 45° (679,60 N)	156,80	97,10	0,032	Región cervical y vertiente interna

Resina impresa 3D	Oblicua 45° (679,60 N)	147,30	90,40	0,034	Región cervical
----------------------	-------------------------------------	--------	-------	-------	--------------------

Con el fin de analizar de manera más detallada la distribución de tensiones en las diferentes estructuras del complejo diente–restauración, se evaluaron los valores máximos de tensión equivalente de von Mises en regiones anatómicas específicas: restauración, esmalte remanente y región cervical. Los resultados obtenidos para cada material y condición de carga se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Distribución de tensión equivalente de von Mises (MPa) por región anatómica según material y condición de carga

Material	Tipo de carga	Restauración (MPa)	Esmalte (MPa)	Región cervical (MPa)
Resina compuesta	Axial (679,60 N)	112,40	89,30	54,10
Resina impresa 3D	Axial (679,60 N)	105,60	84,70	52,80
Resina compuesta	Oblicua 45° (679,60 N)	156,80	132,40	98,60
Resina impresa 3D	Oblicua 45° (679,60 N)	147,30	124,90	92,30

Bajo carga axial, las mayores concentraciones de tensión se localizaron en la restauración y en el esmalte adyacente a las cúspides funcionales. En contraste, la aplicación

de carga oblicua generó un incremento generalizado de las tensiones en todas las regiones analizadas, con valores más elevados en la región cervical y en la interfase estructural.

Para cuantificar el efecto del cambio en la dirección de la carga, se calculó el incremento porcentual de la tensión máxima al comparar la condición oblicua respecto a la axial para cada material. El incremento se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\%Incremento = \frac{(\sigma_{axial})}{\sigma_{axial}} \times 100$$

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Incremento porcentual de la tensión máxima de von Mises al comparar carga oblicua respecto a carga axial

Material	von Mises axial (MPa)	von Mises oblicua (MPa)	Incremento (%)
Resina compuesta	112,40	156,80	39,5 %
Resina impresa	105,60	147,30	39,5 %

3D

El cambio de carga axial a oblicua produjo un incremento aproximado del 39,5 % en la tensión máxima para ambos materiales, evidenciando una mayor demanda biomecánica bajo condiciones de carga excéntrica

Con el fin de ilustrar la distribución espacial de las tensiones y localizar visualmente las zonas críticas identificadas en los valores numéricos, se generaron mapas de contorno correspondientes a la tensión equivalente de von Mises para cada condición de carga y material restaurador. Las Figuras 7A y 7B muestran la distribución tensional bajo carga axial para la resina compuesta y la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional,

respectivamente. Por su parte, las Figuras 8A y 8B presentan los mapas de distribución bajo carga oblicua a 45° , condición que evidenció mayores concentraciones de tensión. En dichas representaciones cromáticas se identifican claramente las regiones de máxima sollicitación mecánica, coincidentes con las zonas críticas descritas previamente en las tablas de resultados.

Figura 7. Distribución de tensión equivalente de von Mises bajo carga axial: (A, imagen izquierda) restauración elaborada con resina compuesta convencional; (B, imagen derecha) restauración elaborada con resina fotopolimerizable para impresión tridimensional.

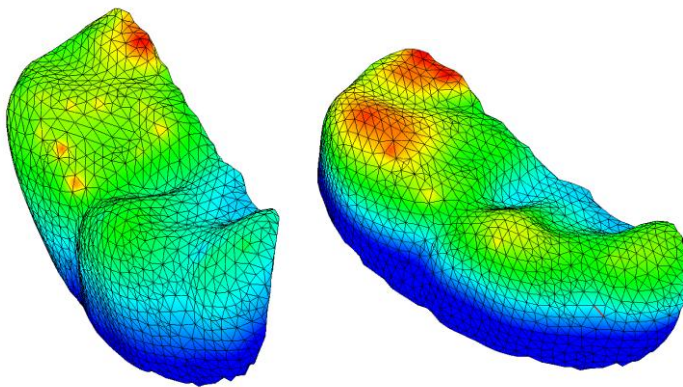
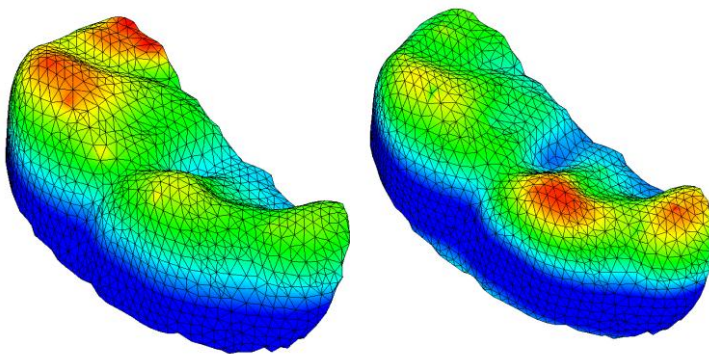


Figura 8. Distribución de tensión equivalente de von Mises bajo carga oblicua a 45° : (A, imagen izquierda) restauración elaborada con resina compuesta convencional; (B, imagen derecha) restauración elaborada con resina fotopolimerizable para impresión tridimensional.



Discusión

Los resultados obtenidos, organizados en las Tablas 4, 5 y 6, permiten comprender el comportamiento biomecánico del complejo diente–restauración bajo diferentes condiciones de carga y materiales. La Tabla 4 muestra que, bajo carga axial vertical, la tensión

equivalente de von Mises y la tensión principal máxima se concentraron principalmente en las cúspides funcionales de la restauración, con valores más altos en el material con mayor módulo de elasticidad. En contraste, la carga oblicua a 45° generó valores notablemente superiores de tensiones en ambas resinas, lo cual se tradujo en un aumento de la deformación total del sistema. La Tabla 5 revela que las tensiones máximas, independientemente del material, se localizaron en regiones anatómicas críticas como la restauración y el esmalte adyacente, con la región cervical mostrando valores intermedios que sugieren transmisión de cargas hacia estructuras dentarias remanentes. La comparación porcentual de la Tabla 6 indica que el paso de carga axial a oblicua produjo un incremento cercano al 40 % en las tensiones máximas, evidenciando que la dirección de la carga influye de manera decisiva en la magnitud de los esfuerzos y la respuesta del sistema. Este patrón es consistente con las condiciones biomecánicas de la oclusión funcional, en donde las fuerzas excéntricas son más lesivas que las cargas axiales centradas, y refleja el papel del módulo de elasticidad en la capacidad de los materiales restauradores para distribuir esfuerzos estructurales.

Aunque ambos materiales mostraron comportamiento biomecánico comparable, la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional evidenció valores ligeramente menores de tensión máxima bajo ambas condiciones de carga, lo que podría sugerir una distribución de esfuerzos más homogénea dentro del sistema restaurador.

Cuando se comparan estos hallazgos con estudios recientes de análisis por elementos finitos en restauraciones parciales, se observa coherencia con tendencias reportadas en la literatura contemporánea. Por ejemplo, estudios evaluaron cómo diferentes materiales y diseños de onlays afectaron la distribución de tensiones en molares mandibulares bajo cargas estáticas y cíclicas, evidenciando patrones de estrés más altos bajo cargas que simulan condiciones funcionales complejas, y variaciones influenciadas por las propiedades mecánicas de los materiales restauradores (Boğuş et al., 2024; Vu & Doan, 2024). Asimismo,

estudios demostraron que los modelos restauradores mostraron variaciones significativas en la concentración tensional en función del espesor adhesivo y del tipo de material restaurador cuando se aplicó una carga vertical significativa, destacando el efecto del diseño y del material sobre la transmisión de esfuerzos hacia la estructura dental (Mohammadi et al., 2025). Estas observaciones apoyan los patrones de distribución tensional y las diferencias porcentuales encontradas en el presente estudio, validando la tendencia de que cargas excéntricas aumentan considerablemente los picos de tensión y que materiales con diferentes módulos de elasticidad modulan la respuesta estructural en forma predecible (Boşiş et al., 2024; Mohammadi et al., 2025).

Desde una perspectiva clínica, los resultados de este estudio aportan evidencia relevante para la selección de materiales y estrategias de rehabilitación indirecta en restauraciones tipo onlay. La variación en las tensiones de von Mises y las tensiones principales según la dirección de la carga sugiere que las restauraciones deben diseñarse considerando no solo la capacidad de resistir cargas axiales, sino también fuerzas oblicuas que se presentan durante la función masticatoria habitual y las parafunciones. Asimismo, la identificación de zonas críticas en regiones cervicales y cuspídeas refuerza la importancia de preservar la morfología dental remanente y optimizar la adaptación del material restaurador para reducir el riesgo de falla estructural. No obstante, una limitación inherente a los estudios *in silico* es la simplificación del comportamiento biológico real; por ejemplo, no se consideraron efectos viscoelásticos, fatiga por ciclos repetidos ni factores biológicos de adaptación tisular. Estas limitaciones sugieren que, aunque los modelos de elementos finitos proporcionan un marco valioso para entender tendencias mecánicas, sus resultados deben interpretarse con cautela y complementarse con estudios experimentales y clínicos futuros (Meira et al., 2012).

Conclusiones

El análisis por elementos finitos permitió comparar la concentración y distribución de tensiones en restauraciones tipo onlay elaboradas con resina compuesta convencional y resina fotopolimerizable para impresión tridimensional bajo condiciones de carga axial y oblicua. Los resultados evidenciaron que ambos materiales presentaron patrones similares de distribución tensional, con concentración predominante en las cúspides funcionales bajo carga axial y desplazamiento hacia la región cervical bajo carga oblicua.

La carga oblicua generó un incremento aproximado del 40 % en la tensión máxima respecto a la carga axial en ambos materiales, confirmando la influencia significativa de la dirección de la fuerza sobre la magnitud de los esfuerzos estructurales. Asimismo, la resina fotopolimerizable para impresión tridimensional mostró valores ligeramente menores de tensión máxima en comparación con la resina compuesta convencional, lo que sugiere una distribución de esfuerzos más homogénea dentro del complejo diente–restauración.

En concordancia con el objetivo del estudio, se concluye que el comportamiento biomecánico de las restauraciones tipo onlay está determinado tanto por las propiedades mecánicas del material restaurador como por la dirección de la carga aplicada. El análisis por elementos finitos constituye una herramienta válida y reproducible para evaluar la concentración de tensiones en restauraciones indirectas, aportando información relevante para la toma de decisiones en rehabilitación oral conservadora.

Referencias

- AlKahtani, A., et al. (2025). Combining 3D multi-object reconstruction with finite element modelling for dental applications. *International Dental Journal*.
<https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.109318>
- Alsayed, M., El-Mowafy, O., & Fayyad, D. (2026). Mesh refinement strategies and convergence criteria in three-dimensional finite element models of dental structures. *International Journal of Computerized Dentistry*, 29(1), 45–56.
<https://doi.org/10.1007/s10266-026-01336-0>
- Atif, M., Tewari, N., Reshikesh, M., Chanda, A., Mathur, V. P., & Morankar, R. (2024). Methods and applications of finite element analysis in dental trauma research: A scoping review. *Dental Traumatology*, 40(4), 366–388.
<https://doi.org/10.1111/edt.12933>
- Behera, S., et al. (2023). Influence of cement thickness and type on stress distribution: A finite element analysis. *Journal of Contemporary Dental Practice*.
<https://www.thejcdp.com/doi/JCDP/pdf/10.5005/jp-journals-10024-3448>
- Boțiș, M.-R., Popa, D. L., Mercuț, R., Iacov-Crăițoiu, M. M., Scricciu, M., Popescu, S. M., & Mercuț, V. (2024). A finite element method study of stress distribution in dental hard tissues: Impact of access cavity design and restoration material. *Bioengineering*, 11(9), 878. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11090878>
- Bučević Sojčić, P., Leder Horina, J., Bočkaj, N., Borojević Renić, T., Turjanski, D., Goršeta, K., & Jurčević Lulić, T. (2025). Stress behaviour of an immature maxillary central incisor: A 3D finite element analysis. *Materials*, 18(10), 2305.
<https://doi.org/10.3390/ma18102305>
- Chen, X., et al. (2025). Three-dimensional finite element model constructed based on CBCT and digital models for dental displacement analysis. [Indexed in PubMed]. PMID: 40604865
- Dejak, B., & Młotkowski, A. (2021). Three-dimensional finite element analysis of molars: Influence of mesh refinement on stress distribution. *Applied Sciences*, 11(9), 3920.
<https://doi.org/10.3390/app11093920>

- Demircan, S., et al. (2023). Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in restored teeth under occlusal loading. *BioMed Research International*.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10655308/>
- Doğan, Ö., et al. (2024). Stress distribution analysis using von Mises and principal stresses in dental structures: A finite element study. *Materials*, *15*(9), 268.
<https://www.mdpi.com/2079-4983/15/9/268>
- Falcinelli, C., Valente, F., Vasta, M., & Traini, T. (2023). Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dental Materials*, *39*(6), 539–556.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.04.002>
- Fidancıoğlu, Y. D., Alkurt Kaplan, S., Mohammadi, R., & Gönder, H. Y. (2025). Three-dimensional finite element analysis (FEM) of tooth stress: The impact of cavity design and restorative materials. *Applied Sciences*, *15*(17), 9677.
<https://doi.org/10.3390/app15179677>
- Fuentes Fuentes, R. (2004). Propiedades mecánicas de la dentina humana: Resistencia cohesiva, microdureza y módulo de elasticidad. *Avances en Odontoestomatología*, *20*(2), 111–117.
- Gönder, H. Y., et al. (2022). Investigation of the effects of adhesive materials of different types and thicknesses on dental tissue stress via FEM analysis. *BioMed Research International*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9338850/>
- He, L., Zhang, Y., Li, X., & Wang, J. (2024). Three-dimensional finite element analysis of stress distribution in posterior indirect restorations under functional loading. *Heliyon*, *10*(3), e14338. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e14338>
- Hoffmann, A., Müller, L., Schmidt, F., & Weber, M. (2025). Mechanical performance of 3D-printed resin materials for definitive dental restorations: Flexural strength, elastic modulus and fatigue behavior. *Journal of Prosthodontic Research*, *69*(1), 45–53.
- Kim, S. H., et al. (2021). Mesh sensitivity analysis in dental finite element models. *Materials*, *14*(12), 3241. <https://doi.org/10.3390/ma14123241>
- Kintopp, C. C. A., Diógenes, A. N., Lopes, R. T., Weber, K. R., Rezende, C. E. E., Kaizer, M. R., & Gonzaga, C. C. (2024). Stress distribution on teeth restored with veneers

- using various incisal preparation designs: A 3D finite element analysis study. *Journal of Prosthetic Dentistry*, *131*(6), 1159.e1–1159.e10.
<https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2024.03.005>
- Lahoud, P., Faghihian, H., Richert, R., Jacobs, R., & EzEldeen, M. (2024). Finite element models: A road to in-silico modeling in the age of personalized dentistry. *Journal of Dentistry*, *150*, 105348. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105348>
- Mandurino, F., Gherlone, E., & Capparé, P. (2025). Mechanical properties of 3D-printed dental materials compared with CAD/CAM restorative materials: A systematic review. *Materials*, *18*(5), 985. <https://doi.org/10.3390/ma18050985>
- Meira, J. B. C., Jikhara, A. N., Capetillo, P., Roscoe, M. G., Cattaneo, P. M., & Ballester, R. Y. (2012). Finite element analysis in dentistry. In *Finite element analysis in dentistry*. IntechOpen. https://doi.org/10.1142/9789813225688_0003
- Mohammadi, R., Kaplan, S. A., Harmankaya, A., & Gönder, H. Y. (2025). Investigation of stress distribution and fatigue performance in restored teeth using different thicknesses of adhesive materials and different restorative materials: 3D finite element analysis (FEM). *Materials*, *18*(16), 3888. <https://doi.org/10.3390/ma18163888>
- Moga, R. A., et al. (2023). Comparative evaluation of failure criteria in finite element analysis of dental structures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(5), 4133. <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/5/4133>
- Nikolova, N., Raykovska, M., Petkov, N., Tsvetkov, M., Georgiev, I., Koytchev, E., Iankov, R., Dimova-Gabrovska, M., & Gusiyska, A. (2025). The integration of micro-CT imaging and finite element simulations for modelling tooth-inlay systems for mechanical stress analysis: A preliminary study. *Journal of Functional Biomaterials*, *16*(7), 267. <https://doi.org/10.3390/jfb16070267>
- Prause, L., Kern, M., & Sasse, M. (2024). Mechanical and microstructural properties of additively manufactured versus conventional resin composites for restorative dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *36*(2), 215–224.
<https://doi.org/10.1111/jerd.13132>
- Single tooth bite forces healthy young adults. (2004). *Journal of Dentistry*.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15125591/>

- Soliman, T., Mahmoud, A., & Farouk, H. (2025). Numerical validation of mesh convergence in three-dimensional finite element models of dental restorations. *Scientific Reports*, *15*, 26931. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-26931-z>
- Taha, D., et al. (2022). Effect of mesh density on stress distribution in restored molars: A 3D finite element study. *Journal of Prosthodontics*, *31*(8), 678–686. <https://doi.org/10.1111/jopr.13587>
- Vu, C. T., & Doan, T. M. (2024). Impact of dental materials on stress concentration and distribution in inlay restorations and the tooth: A three-dimensional finite element analysis. *International Journal of Prosthodontics and Restorative Dentistry*, *14*(4), 197–201. <https://doi.org/10.5005/jp-journals-10019-1475>
- Wang, Y., et al. (2024). Finite element mesh quality and its impact on biomechanical predictions in dental structures. *Computers in Biology and Medicine*, *168*, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.108123>
- Xu, H., Chen, Y., Liu, Q., & Zhang, M. (2025). Three-dimensional finite element analysis of cavity preparation design and 3D-printed resin composite restorations on stress distribution in endodontically treated molars. *Journal of Prosthetic Dentistry*, *133*(4), 522–531. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2025.01.012>
- Zhang, N., et al. (2025). Finite element analysis on stress development in alveolar and dental structures. *Applied Sciences*, *15*(15), 8366. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/15/8366>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2021). *The finite element method: Its basis and fundamentals* (7th ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01147-6>