



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Estomatología
Maestría en Ciencias Odontológicas

TESIS

“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE SUPERFICIE DE RESINAS DENTALES 3D ADICIONADA CON ÓXIDO DE GRAFENO”

L.O Eric Eduardo Bravo Trejo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Abraham Israel Muñoz Ruiz

CODIRECTORES

Dra. Norma Verónica Zavala Alonso

Dr. José Manuel Gutiérrez Hernández

ASESORES

Dra. Mariana Gutiérrez Sánchez

Dr. Jorge Arturo Garrocho Rangel

Dra. Diana María Escobar García



Evaluación de las propiedades mecánicas y de superficie de resinas dentales 3D modificadas con óxido de grafeno. © 2025 by Eric Eduardo Bravo Trejo. Se distribuye bajo Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Índice

AGRADECIMENTOS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
DEDICATORIAS	7
ABREVIATURAS	8
DEFINICIONES	9
INTRODUCCIÓN	10
ODONTOLOGIA DIGITAL	10
IMPRESIÓN 3D EN ODONTOLOGÍA	10
RESINAS 3D EN ODONTOLOGÍA	11
MODIFICACIÓN DE LAS RESINAS CON NANOMATERIALES	12
GRAFENO Y ÓXIDO DE GRAFENO	12
APLICACIONES DEL GO EN ÁREAS BIOLÓGICAS	14
APLICACIÓN DEL GO EN LA ODONTOLOGÍA	15
JUSTIFICACIÓN	17
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	17
HIPÓTESIS	17
HI NULA.....	17
HO ALTERNATIVA.....	17
OBJETIVOS	18
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
MATERIALES Y MÉTODOS	18
LUGAR DE REALIZACIÓN	18
TIPO DE ESTUDIO	18
MUESTREO	19
PRUEBAS FÍSICO MECÁNICAS	19
TAMAÑO DE LA MUESTRA	19
CRITERIOS DE SELECCIÓN	19
GRUPO A CONTROL (RESINA 3D) PROBETAS 25 MM X 2 MM X 2 MM, SIN ÓXIDO DE GRAFENO.	19
CRITERIOS DE INCLUSIÓN	19
PROBETAS 25 MM X 2 MM X 2 MM. - NO TENGAN GRAFENO. RECORTADAS Y PULIDAS. - NO PRESENTEN IMPERFECCIONES.	19
CRITERIOS DE NO INCLUSIÓN	19
CRITERIOS DE ELIMINACIÓN.....	19
GRUPO B EXPERIMENTAL (RESINA 3D CON 0.05% W/V OG) PROBETAS 25 MM X 2 MM X 2 MM SIN ÓXIDO DE GRAFENO.	20
CRITERIOS DE INCLUSIÓN	20
CRITERIOS DE NO INCLUSIÓN	20
CRITERIOS DE ELIMINACIÓN.....	20

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.....	20
INDEPENDIENTES.....	20
DEPENDIENTES	21
PLAN DE TRABAJO.....	21
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS SIN (OG)	21
DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS CON (OG)	24
PRUEBAS MECANICAS	27
PRUEBAS DE FLEXIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD	29
PRUEBAS DE DUREZA VICKERS	30
PRUEBAS DE ABSORCIÓN Y SOLUBILIDAD	31
CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	32
EL PROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS.....	32
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	33
RESULTADOS.....	35
EVALUACIÓN DE FLEXIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD	35
EVALUACIÓN DE DUREZA.....	37
EVALUACIÓN DE ABSORCIÓN Y SOLUBILIDAD	38
DISCUSIÓN	39
LIMITACIONES Y/O NUEVAS PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN.	41
CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS.....	43

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a Dios, por ser mi guía y fortaleza en todo momento. A Él encomiendo cada uno de mis pasos y decisiones, pues sin Su luz nada de lo que hoy soy habría sido posible. Durante este proceso, lleno de retos, cansancio y momentos de incertidumbre, siempre encontré en mi fe el impulso para continuar. Agradezco a Dios por darme salud, claridad y perseverancia para culminar este proyecto que representa no solo un logro académico, sino también personal. Cada día fue una enseñanza, y cada dificultad, una oportunidad para crecer y confiar más en Su voluntad.

A la Virgen María, madre amorosa y protectora, por cubrirme siempre con su manto y brindarme consuelo en los momentos difíciles. Gracias por interceder ante Dios por mí, por escuchar mis oraciones y darme serenidad cuando más la necesitaba. Su presencia espiritual ha sido un faro de esperanza, y su ejemplo de fe, humildad y fortaleza me ha inspirado a mantenerme firme ante los desafíos y a continuar con confianza y gratitud.

A mi amada madre Eugenia, quien ha sido y será siempre el pilar más fuerte de mi vida. Su amor incondicional, su paciencia y su entrega son un ejemplo que me acompaña cada día. Gracias, mamá, por tus palabras de aliento, por tus desvelos, por tu apoyo silencioso y constante. Gracias por enseñarme que no existen los imposibles cuando se trabaja con el corazón. Tu esfuerzo y sacrificio me inspiran a ser mejor persona y profesional. Esta tesis, más que un logro individual, es un reflejo de todo lo que me has enseñado con tu ejemplo: responsabilidad, empatía y dedicación. Sin ti, nada de esto tendría sentido.

A mi padre Eric, agradezco profundamente su esfuerzo y sacrificio a lo largo de toda mi vida. Gracias por tu trabajo incansable, por tu ejemplo de perseverancia y disciplina, y por enseñarme que el valor de las cosas está en el esfuerzo que ponemos para alcanzarlas. Tu fortaleza me ha enseñado a no rendirme, a luchar con determinación y a creer que los sueños se logran con constancia. Aunque a veces las palabras no sean suficientes para expresarlo, admiro profundamente todo lo que has hecho por mí. Cada logro en mi camino lleva impreso parte de tu dedicación y del amor que has mostrado a través de tus actos.

A mi hermano Emiliano, gracias por ser parte fundamental de mi vida. Verte crecer y aprender también me impulsa a seguir esforzándome, porque sé que el ejemplo que doy puede inspirarte del mismo modo en que tú me inspiras a mí.

Finalmente, quiero agradecer nuevamente a mi familia en su conjunto, porque en los momentos más difíciles encontré en ellos el apoyo, el amor y la comprensión necesarios para seguir adelante. Cada palabra de aliento, cada abrazo, cada gesto de paciencia ha sido una fuente invaluable de energía para llegar hasta aquí.

A todos ustedes, de corazón, gracias por caminar conmigo, por sostenerme cuando dudé, por creer en mí incluso cuando yo mismo no lo hacía. Esta tesis no solo lleva mi nombre, sino también el de cada uno de ustedes, porque en cada página está reflejado su amor, su esfuerzo y su fe en mí.

Dedicatorias

A Dios, a la Virgen y a la vida, por ser mi guía, mi refugio y mi mayor enseñanza. Gracias por darme la fortaleza, la fe y las oportunidades que me permitieron llegar hasta este momento.

A mi madre, Eugenia, por su amor infinito, por ser el pilar de mi vida y el ejemplo más grande de entrega, sacrificio y ternura.

A mi padre, Eric, por su esfuerzo constante, su apoyo incondicional y por enseñarme el valor del trabajo y la perseverancia.

A mi hija, Regina, mi razón y mi mayor inspiración. Todo lo que soy y lo que logro es por y para ti, con el deseo de dejarte un legado de amor y superación.

A todas las personas que alguna vez tuvieron un sueño, para que nunca dejen de creer. Con fe, esperanza y dedicación, los sueños se convierten en realidad.

Abreviaturas

ABREVIATURA	SIGNIFICADO
OG	Óxido de grafeno
ADA	Asociación Dental Americana
µm	Micrómetro
Kg	Kilogramo
Hi	Hipótesis alternativa
Ho	Hipótesis nula
UASLP	Universidad Autónoma de San Luis Potosí
MPa	Megapascales
HV	Dureza de Vickers
µL	Microlitro
ml	Mililitro
P	Valor de probabilidad
SD.	Desviación estándar
Min.	Mínimo
Max.	Máximo
PMMA-GO	Poli-metil metacrilato con óxido de grafeno
MEB	Microscopio Electrónico de Barrido
CAD-CAM	Computer-Aided Design, Computer-Aided Manufacturing
ISO	International Organization for Standardization
Ppm	Partes por millón
N	Newtons
nm	Nanómetro
V/V	Volumen-volumen

Definiciones

Grafeno: Es una sustancia compuesta por carbono puro, con átomos organizados en un patrón regular hexagonal, parecido al grafito.

Óxido de grafeno: es una forma oxidada del grafeno, un material compuesto por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en un patrón hexagonal, similar al grafito, pero con una estructura bidimensional.

Dureza Vickers: Es la oposición que ofrecen los materiales a alteraciones físicas como la penetración, la abrasión y el rayado

Modulo elasticidad: Se refiere a la propiedad física y mecánica de ciertos materiales que al sufrir deformaciones tienen la capacidad de ser reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan

Resistencia a la Flexión: Es la capacidad de un material de soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal. Es la dinámica de todo el material.

Introducción

Odontología digital

La odontología digital ha emergido como una disciplina clave en la odontología moderna, integrando tecnologías avanzadas para mejorar la precisión, eficiencia y experiencia del paciente. Esta transformación tecnológica abarca diversas áreas, desde el diagnóstico hasta la planificación y ejecución de tratamientos, permitiendo una atención más personalizada y efectiva.

La incorporación de la impresión 3D ha revolucionado la creación de modelos dentales precisos, guías quirúrgicas y prótesis personalizadas, acelerando los procesos de fabricación y mejorando la comodidad y el ajuste de las restauraciones (1,2,3).

Aplicaciones Clínicas y Especialidades El flujo de trabajo digital ha demostrado ser eficaz en diversas especialidades odontológicas, incluyendo la prostodoncia, implantología, ortodoncia y cirugía oral. Herramientas como escáneres intraorales y faciales, sistemas CAD/CAM y tecnologías de impresión 3D han mejorado la precisión diagnóstica, la planificación de tratamientos y los resultados clínicos (3,4).

Impresión 3D en Odontología

La introducción de la impresión tridimensional (3D) ha revolucionado la odontología al introducir una metodología que permite la fabricación rápida, precisa y personalizada de estructuras dentales. Esta tecnología se basa en la fabricación aditiva, que crea objetos capa por capa a partir de modelos digitales obtenidos mediante escaneo intraoral o tomografía computarizada. La impresión 3D es especialmente valiosa en la producción de prótesis, guías quirúrgicas, modelos diagnósticos y aparatos ortodónticos, ofreciendo ventajas que transforman el flujo de trabajo clínico tradicional. (4)

Algunos de los usos de la impresión 3D en odontología son la diseño y elaboración de guías Quirúrgicas para Implantología, Facilitan la colocación precisa de implantes dentales, minimizando riesgos y mejorando los resultados postoperatorios (5).

Modelos Diagnósticos y Planificación: Procedimiento que permite la reproducción exacta de la anatomía bucal del paciente, lo que optimiza la planificación de tratamientos complejos (6). Prótesis y Restauraciones Personalizadas: La fabricación digital ofrece prótesis con ajuste milimétrico y alta calidad estética, con menor tiempo de producción comparado con métodos convencionales (6,7).

Algunas de las ventajas de esta técnica de generación aditiva son la alta precisión y reproducibilidad, lo cual permite replicar fielmente modelos digitales, reduciendo eliminando el factor de error humano. Rapidez y Eficiencia, Acorta significativamente los tiempos de producción, facilitando la atención. Personalización, Cada objeto es único y adaptado a la morfología específica del paciente, mejorando confort y funcionalidad. Reducción de Costos, Aunque la inversión inicial en equipos puede ser alta, a mediano plazo reduce costos de laboratorio y materiales. (8,9)

No obstante, como cualquier otra tecnología, la impresión 3D tiene algunas limitaciones, A pesar de sus múltiples beneficios, la impresión 3D presenta retos como la necesidad de materiales biocompatibles reconocidos con la ADA, mantenimiento de equipos, y capacitación, para el personal odontológico. (Rivera-Gonzaga et al., 2021).

Resinas 3D en odontología

Son materiales fundamentales en la odontología digital, debido a sus propiedades mecánicas, estéticas y biocompatibles que permiten fabricar aditamentos dentales precisos y funcionales. Estas resinas son fotopolímeros líquidos que, al ser colocados a una fuente de luz (usualmente luz ultravioleta o láser), se solidifican capa por capa para formar estructuras tridimensionales. En odontología, las resinas para impresión 3D (imagen 1) se clasifican según su uso clínico y características específicas Resinas para Modelos Diagnósticos: Son rígidas y precisas, usadas para crear modelos dentales, ideales para planificación y educación Resinas para restauraciones Temporales: son más flexibles y resistentes, adecuadas para fabricar coronas, puentes y prótesis temporales como PPR, que deben soportar cargas oclusales moderadas (12,13).



Imagen 1. Resina para impresión 3D

Resinas Biocompatibles para Restauraciones Definitivas: Son resinas certificadas para contacto prolongado con tejidos orales, empleadas en la impresión de alineadores, guías quirúrgicas y componentes protésicos (12,13)

Resinas para Ortodoncia: Utilizadas en la manufactura de alineadores sin color personalizados y otros aparatos ortodónticos de corrección, permiten alta precisión y comodidad para el paciente. Sin embargo, Las resinas para impresión 3D ofrecen, Alta Precisión y Detalle, ofrecen replicar características anatómicas complejas con alta precisión Agilidad en Producción, La impresión con resinas 3D disminuye considerablemente los tiempos en comparación con técnicas analógicas tradicionales. Diversidad de Propiedades Mecánicas y físicas, existiendo resinas rígidas, flexibles y resistentes al desgaste, mismas que se adaptan a múltiples usos clínicos. Biocompatibilidad, gran cantidad de resinas cuentan con certificaciones para uso en cavidad oral, asegurando seguridad para el paciente (13,14,15)

A pesar de estas características, La selección adecuada de la resina 3D es esencial, ya que algunas presentan fragilidad, cambios dimensionales o toxicidad potencial si no se utilizan correctamente. El post-procesamiento, como el curado y limpieza, es crucial para garantizar la estabilidad y biocompatibilidad de estas en el producto final (14)

Modificación de las resinas con nanomateriales

En los últimos años, el desarrollo y el uso de nuevas tecnologías en el área odontológica han llevado a un avance considerable en los materiales utilizados para restauraciones provisionales, definitivas y prótesis. La impresión 3D se ha establecido como una herramienta más dinámica y precisa para la fabricación de elementos dentales personalizados que mejoran sustancialmente la eficiencia clínica, la adaptabilidad anatómica y la reducción de costos. A pesar de los innumerables beneficios potenciales, las resinas 3D utilizadas en la impresión dental aun presentan limitaciones y retos en cuanto a sus propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y durabilidad a largo plazo en el medio oral.

Grafeno y óxido de grafeno

Con el fin de reducir estas limitaciones, se ha planteado la incorporación de nanomateriales y matrices poliméricas. Mismo que ha sido objeto de estudio en diversas áreas debido al gran impacto y novedosos resultados de la nanotecnología aplicada en áreas biomédicas. Un ejemplo es el estudio y las investigaciones de la mezcla de resinas dentales para impresión 3D con óxido de grafeno (GO, por sus siglas en inglés), un nanomaterial derivado del grafeno con propiedades únicas como alta resistencia mecánica, gran área superficial, biocompatibilidad y capacidad de interacción con matrices poliméricas. Se ha reportado que el agregar oxido de grafeno en materiales dentales ha presentado mejoras en propiedades

como la dureza, la resistencia a la tracción, lo cual lo posiciona como un aditivo ideal para el desarrollo de resinas dentales 3D avanzadas.

El grafeno es el componente básico de todos los materiales a base de carbono grafitico como el grafito. (imagen 2) El termino de grafeno fue sugerido en 1986 gracias a Boehm, quien le dio el nombre para poder describir la monocapa del grafito del carbón (13).

Con la introducción de nanotubos de grafeno en 1992, se incrementó la búsqueda científica de usos de estos nanomateriales. Hasta el 2004 gracias a André Geim y Konstantin Novoselov, empezó a recibir atención de estas nanopartículas ya que demostraron la existencia del grafeno aislado en una sola capa por exfoliación mecánica, donde redujeron el grosor del grafito. Gracias a esto, ganaron un premio Nobel de física en el 2010 (14,15). El grafeno se obtuvo a través de la exfoliación micromecánica del grafito, una estructura 2D de la familia de materiales del carbono.

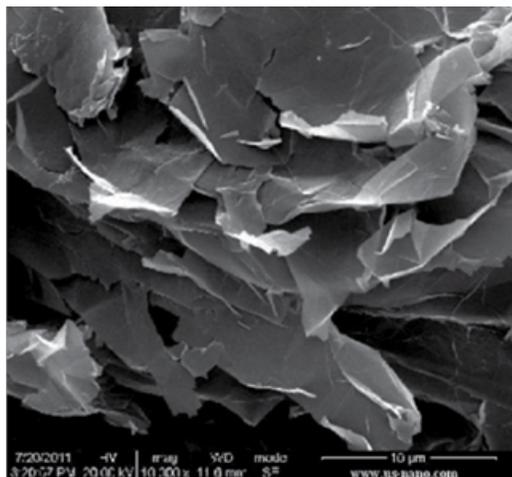


Imagen 2. Láminas de (OG) Oxido de grafeno. Vista microscópica

El grafeno se puede preparar mediante tres técnicas: por exfoliación química, exfoliación mecánica, exfoliación líquida o deposición química de vapor. El grafeno contiene varias capas de láminas lo cual hace que logre sus propiedades deseadas (18). Existe variedad de tipos de grafeno como el grafeno ultrafino, grafeno de pocas capas, óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido y nano láminas de grafeno (17). Hummers, Brodie y otros sintetizaron el óxido de grafeno, obteniéndolo con una reducción química entre 1948 y 1958. Este posee un tamaño pequeño con un área de superficie grande, es la forma oxidada del grafeno y al oxidarse se convierte en un material hidrofílico, lo que lo hace soluble en agua, esto ayuda a que tenga procesabilidad acuosa, el óxido de grafeno se produce por método Hummers, lo que es el proceso químico del grafito mediante oxidación con dispersión y exfoliación en el agua o disolventes orgánicos adecuados (19). La síntesis del óxido de grafeno es

por medio de fase de exfoliación líquida, la cual se utiliza cuando es una escala pequeña de síntesis de grafeno, esta comienza con la suspensión de grafito en un solvente orgánico para debilitar las fuerzas de Van Der Waals entre las capas del grafito, posterior pasa por un ultrasonido a cierto voltaje para ir despojando las láminas de grafeno (20)

El óxido de grafeno tiene grupos funcionales como grupos hidroxilo, carboxilo y epoxi, lo que permite que este pueda unirse a diferentes tipos de moléculas, como biomoléculas, haciéndolo un buen prospecto para bioaplicaciones como en biomateriales y no se considera una sustancia peligrosa (13). Se ha demostrado que es el material más delgado y ligero que se conoce, tiene una fuerza 100 veces mayor que el acero y es muy rígido. Absorbe solo el 2.3% de la luz haciendo que sea casi transparente, por esta razón no afecta el color de donde es añadido. Tiene una alta conductividad eléctrica como una buena conductividad térmica y química con muy buena estabilidad dimensional al igual de presentar alta flexibilidad (15). Sus propiedades eléctricas son gracias a su estructura hexagonal, esto hace que sea un semiconductor o superconducción dependiendo el apilamiento de sus capas (18,21). Ya que es una brecha de banda cero, tiene buenas propiedades ópticas, que hace que el grafeno absorba fotones de todas las frecuencias desde infrarrojo hasta ultravioleta, lo cual se puede aplicar con la conversión de luz a electricidad (21).

Aplicaciones del GO en áreas biológicas

El GO puede ser modificado químicamente para interactuar con sistemas biológicos sin generar ningún tipo de citotoxicidad, lo cual permite que pueda ser incorporado a materiales en las áreas médico-biológicas. La biocompatibilidad que presenta elimina la posibilidad de hacer reacciones adversas dentro de los tejidos vivos, esto hace que tenga éxito para técnicas de ingeniería de tejidos. También por sus propiedades de resistencia mecánica, rigidez, conductividad eléctrica, sus tipos de morfología bidimensionales y tridimensionales (22). Otra de sus propiedades es que tienen capacidad para fusionarse y combinarse con materiales y biomoléculas, ya que se puede dispersar en soluciones acuosas estables para poder unir estructuras que van desde microscópicas hasta una gran escala (23). Una de sus principales ventajas es el costo reducido que tiene y que con esto se puede hacer porciones altas de grafeno (24).

Hablando de la toxicidad, Al ser modificado superficialmente, su toxicidad se reduce y esto lo hace compatible con células eucariotas (22). Una de las desventajas es la toxicidad que causa por exposición respiratoria, ya que, al ingresar a los pulmones, se podría retener e inducir formación de granulomas y edema pulmonar. Al ser inhalado, las nanopartículas pueden destruir la estructura de la película de la superficie pulmonar, que es la primera línea de defensa del huésped.

Esto se puede llegar a depositarse en el fondo de los alveolos pulmonares o terminar en el líquido intersticial (25). Es utilizado para el diagnóstico de

enfermedades, terapia y localización de lesiones cancerígenas, bioimágenes, ingeniería tisular, biosensores y administración de fármacos, entre otros. En la actualidad, se sigue investigando otras aplicaciones como biomaterial. En los últimos años, se comenzó a utilizarse como material en odontología (31).

Aplicación del GO en la odontología

La aplicación de grafeno como material base para el área de odontología se ha estudiado con anterioridad en diferentes investigaciones, de igual manera su citotoxicidad. Se ha observado que los factores más comunes que lo afectan son las concentraciones utilizadas. Wang et al, en su estudio observaron que existe toxicidad de óxido de grafeno con las células de fibroblastos cuando se incrementa los 50µg/ml, ya que muestra disminución en la adhesión celular e induce apoptosis celular. En su investigación de evaluación de dos materiales dentales con grafeno para demostrar su biocompatibilidad, no encontraron reacciones citotóxicas o inflamatorias en boca (26).

El óxido de grafeno presenta una estructura 2D de base de carbón el cual mejora las propiedades biológicas, ya que permite la unión y proliferación de células madre sin presentar signos de citotoxicidad (26). Se ha demostrado que no existe signos de citotoxicidad al momento de utilizar el óxido de grafeno en células derivadas de ligamento periodontal y pulpa dental cuando se expone a 0.5 mg /ml de GO (27). También depende de su uso con efecto dosis- tamaño, se puede considerar concentraciones seguras cuando se maneja por debajo de 40mg/ml o no exceda el 1.5% p/v (28). Aunque este material es considerado como una sustancia no peligrosa para su manejo, se debe manipular respetando las normas de seguridad e higiene que están establecidas como el utilizar bata de laboratorio, guantes, mascarilla para polvos y lentes de protección. Al terminar de utilizar este material, los envases contaminados deben ser eliminados como desechos. Se debe evitar la dispersión del material a suelo, desagües y alcantarillas para evitar contaminación al medio ambiente (29). Desde el 2004 cuando Novoselov et al. Informaron que obtuvieron grafeno con capas de hasta 10 µm, lo comenzaron a utilizar como transistores de efecto de campo, también se ha utilizado como dispositivos de memoria, dispositivos fotovoltaicos como absorbedores de luz en celdas solares, al presentar excelente conductibilidad y disponibilidad para la funcionalización de la superficie, lo que son características electroquímicas, se ha utilizado como sensores electroquímicos para detectar glucosa, ácido ascórbico y dopamina. En la tecnología se usa para pantallas y en la construcción para pinturas impermeabilizante y reforzar materiales de concreto (30).

A través de investigaciones, mejorando las técnicas de porcentaje del grafeno, se ha encontrado la manera de utilizarlo en el área de odontología como en la

ingeniería tisular, en implantes dentales, membranas de colágeno, aplicación antibacteriana, detección de bacterias, regeneración pulpar y tisular (20,32). En la odontología restauradora, una de las maneras para que los materiales puedan aumentar su dureza ha sido gracias al grafeno, como en los materiales cerámicos para evitar las mini fracturas, ya que es muy común este tipo de fallas que hace que la restauración no sea tan longeva (17).

En los polímeros se ha demostrado una buena interacción con el grafeno, gracias a las fuerzas de Van der Waals por la estructura del grafeno. Este ejerce interacciones con el PMMA. Estas interacciones no covalentes ofrecen estabilidad, mejora las propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas (13). El grafeno se ha convertido en un material prometedor para investigaciones con células madre, este permite la adhesión de las células óseas haciendo que estas respondan al crecimiento y mejora la diferenciación osteogénica (20,24). Ha demostrado tener buena habilidad antimicrobiana gracias al daño físico que le produce a los microorganismos, cuando la acción de sus bordes afilados penetra y corta la membrana de las células, el cual produce un estrés oxidativo, haciendo un efecto dañino irreversible en las bacterias haciéndolo muy efectivo. Este mecanismo aún no está claro, pero se sigue investigando (13,33)

Justificación

Las resinas dentales 3D cuenta con buenas características biológicas la cual las hace biocompatibles. Al tener una buena respuesta con el que lo utiliza, logrando mantener un ambiente biológico favorable. La incorporación de aditivos a materiales poliméricos es utilizada para incrementar las propiedades mecánicas. De tal manera que la adición de OG podría incrementar el tiempo de vida del material de restauración siendo este las resinas dentales 3D Tomando en cuenta lo anterior, la siguiente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de OG en resinas dentales utilizadas en impresión 3D, centrándose en el análisis de sus propiedades mecánicas (como la dureza y la resistencia a la compresión), de superficie (morfología superficial), y de absorción. La caracterización de estas propiedades nos permitirá determinar el impacto de este nanomaterial (OG), en el desempeño clínico de las resinas 3D, aportando evidencia científica que corrobore su potencial uso clínico en odontología restauradora y su diversidad de áreas.

Lo que buscamos con este estudio es contribuir a la búsqueda de materiales dentales más resistentes, longevos y biocompatibles, de forma que fomentemos la integración de nuevas tecnologías, como la nanotecnología y la manufactura adictiva en el ámbito odontológico.

Pregunta de investigación

¿La incorporación del óxido de grafeno mejora las propiedades mecánicas de las resinas dentales 3D?

Hipótesis

Hi Nula. La incorporación de óxido de grafeno no mejoras las propiedades mecánicas y de superficie de las resinas dentales 3D.

Ho Alternativa. La incorporación de óxido de grafeno mejora las propiedades mecánicas y de superficie de las resinas dentales 3D.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar las propiedades físico-mecánicas de resinas dentales 3D reforzadas con óxido de grafeno.

Objetivos específicos

Evaluar la micro dureza de probetas de resinas dentales 3D aditivadas con óxido de grafeno mediante el ensayo de dureza Vickers.

Evaluar la fuerza flexural de probetas de resinas dentales 3D aditivadas con óxido de grafeno mediante ensayos mecánicos.

Evaluar las características morfológicas y de superficie de resinas dentales 3D con y sin óxido de grafeno mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés).

Evaluar los niveles de absorción de agua y solubilidad de las resinas con y sin GO.

Materiales y métodos

Lugar de Realización

- Laboratorio de Nanomateriales de la Maestría en Ciencias Odontológicas de la Facultad de Estomatología de la UASLP.
- Laboratorio de Ciencias Básicas de la Facultad de Estomatología de la UASLP.

Tipo de estudio

Experimental *in vitro*

Muestreo

Pruebas Físico Mecánicas

Numero de grupos

- **Grupo A Control** (resina 3D)
- **Grupo B Experimental** (resina 3D con 0.05% w/v OG)

Tamaño de la muestra

n=10 probetas por grupo

CRITERIOS DE SELECCIÓN

Grupo A Control (resina 3D) Probetas 25 mm x 2 mm x 2 mm, sin óxido de grafeno.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Probetas 25 mm x 2 mm x 2 mm. - No tengan grafeno. Recortadas y pulidas. - No presenten imperfecciones.

CRITERIOS DE NO INCLUSIÓN

Presentar imperfecciones que no puedan recortarse o pulirse

CRITERIOS DE ELIMINACIÓN

No saber el porcentaje grafeno de la muestra. Probetas que se fracturen a la manipulación física del operario

Grupo B Experimental (resina 3D con 0.05% w/v OG) Probetas 25 mm x 2 mm x 2 mm sin óxido de grafeno.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Probetas 25 mm x 2 mm x 2 mm. Recortadas y pulidas. No presenten imperfecciones.

CRITERIOS DE NO INCLUSIÓN

Presentar imperfecciones que no puedan recortarse o pulirse. No tengan grafeno.

CRITERIOS DE ELIMINACIÓN

No saber el porcentaje grafeno de la muestra. Probetas que se fracturen a la manipulación física del operario

Descripción de variables

Independientes

Variable	Clasificación	Definición conceptual	Definición operacional	Escala
Concentración de óxido de grafeno	Cuantitativa	Concentración porcentual en volumen es la medida de concentración de dicha especie en una disolución con respecto a la cantidad de volumen total de la muestra en porcentaje.	Porcentaje en peso de OG en relación al volumen de la resina	% Peso [mg]

Dependientes

Variable	Clasificación	Definición conceptual	Definición operacional	Escala
Microdureza Vickers	Cuantitativo Continua de razón	La microdureza Vickers es una manera de cuantificar qué tan duro es un material mediante la resistencia de su superficie a ser penetrada por un diamante en forma de pirámide.	Evaluación mediante prueba Vickers en micro durómetro	Numerica y de razón [HV]
Resistencia flexural	Cuantitativo Continua de razón	Indica la capacidad de un material restaurador (como resinas dentales 3D) para resistir las fuerzas masticatorias sin fracturarse.	Evaluación mediante máquina universal	Numerica y de razón [MPa]
Absorción y solubilidad	Cuantitativo Continua de razón	<ul style="list-style-type: none"> Es la capacidad de un material de absorber moléculas de agua cuando está en contacto con un medio acuoso Es la capacidad de un material de liberar sustancias solubles al medio acuoso en el que está sumergido. 	Evaluación mediante pesaje posterior a inmersión en medios acuosos	Numerica y de razón (g)

Plan de trabajo

Diseño y Fabricación de muestras sin (OG)

Para la fabricación de las muestras, se utilizó el software de diseño digital Solid Works, (imagen 3) se realizaron dos diseños unos para barras impresas en resina 3D sin (OG), las cuales mediante la norma ISO 4049, con una medida de 2mm x 2mm x 25mm y cilindros con una medida de 9mm x 2mm. (imagen 4)

 **SOLIDWORKS**

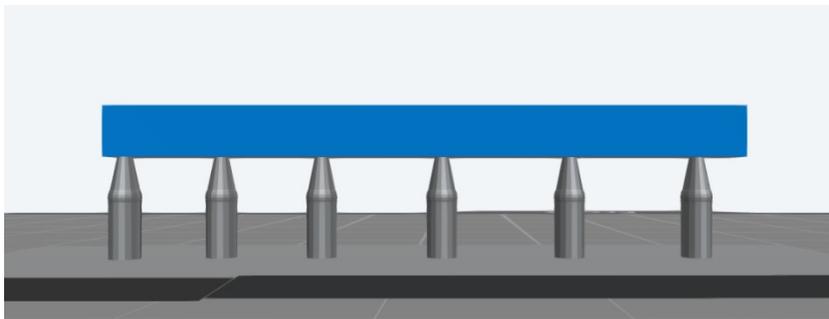


Imagen 3. Diseño digital para barras de resina impresa 2mm x 2mm x 25mm

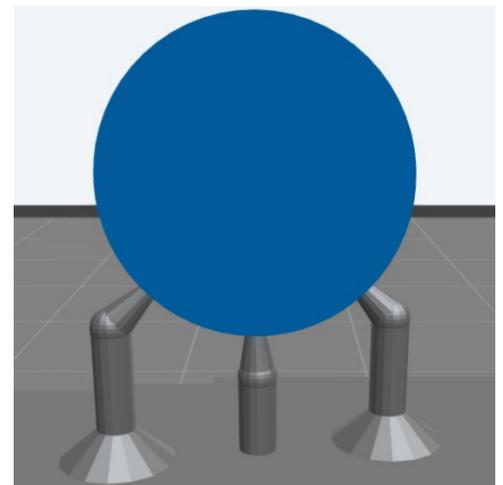


Imagen 4. Diseño digital para cilindros de resina impresa 9mmx2mm

Una vez teniendo el diseño de ambas formas, se procedió a transportarlo a sistema de laminado Chitubox para realizar su procesamiento de impresión, (imagen 5) se imprimieron 10 barras de resina con las medias antes mencionadas y 5 cilindros de igual manera con las medidas antes mencionadas.

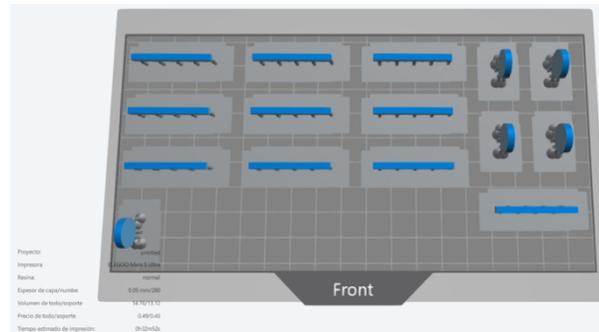


Imagen 5. Posicionamiento en el software de laminado (Chitubox), de las barras y cilindros. para su posterior impresión.

Posteriormente se realiza el proceso de impresión una vez ajustados los parámetros de impresión de nuestra resina para impresión dental 3D Jamg HE, se utiliza una impresora 3D de la marca Elegoo, modelo Mars ultra 5. (imagen 6)

Una vez que las formas están impresas pasan por un proceso de post procesado que consta de un lavado con alcohol isopropílico en un lapso de 5 min dentro de un washer de la misma marca que la impresora, posteriormente secado con aire a presión, para eliminar excedentes de resina y del mismo alcohol, dando lugar al último paso del proceso de post procesado, que es el curado de las formas en una caja de curado con luz UV, (imagen 7) según las indicaciones del fabricante las formas impresas deben ser expuestas al curado de la luz UV durante 1 ciclo de 15 min para lograr un foto curado uniforme, y adecuado.



Imagen 6. Impresora utilizada para en el estudio, Elegoo Mars 5 Ultra



Imagen 7. Cámara de curado y lavado, para proceso de post producción, marca Elegoo

Una vez terminado el proceso de post procesado obtenemos una impresión adecuada en cuanto a consistencia y forma lista para proceder con las pruebas mecánicas.



Imagen 8. Barra impresa en resina 3D con resina Jamg He, una vez realizado el post procesado

Diseño y Fabricación de muestras con (OG)

Para la fabricación de las muestras del grupo con (OG), fue necesario el uso de Oxido de grafeno (OG) en su presentación en polvo, en una concentración de 0.05% basados en estudios previos, siendo esta una concentración que no genera riesgo de citotoxicidad. Para esto fue necesario el pesaje del (OG) en polvo con el uso de una balanza analítica (imagen 9 y 10) debido al bajo volumen de este.

Una vez que se obtuvo el volumen necesario para las muestras se incorporó a la resina en cuatro jeringas con un volumen de 5ml cada una, cubriendo la superficie de estas con papel aluminio para así evitar el paso de la luz UV y así evitar el foto curado de la resina.



Imagen 9. Bascula analítica usada para pesar (OG)



Imagen 10. Proceso de pesaje de (OG)

Posterior a esto se procedió a incorporar el (OG) a la resina mediante sonicación en una tina de baño sónico, (imagen 11) en 4 diferentes tiempos de sonicación 1 hora, 2 horas, 3 horas y 4 horas. Con esto se buscó la mayor dispersión posible y así integrar el grafeno a la resina. Posteriormente al finalizado de los 4 tiempos (1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas), se observó que la muestra sonicada a 4 horas era la más indicada para realizar las pruebas debido a que esta fue la que presentó mayor integración y dispersión del (OG) en la resina 3D.



Imagen 11. Tina ultrasónica, utilizada para incorporar grafeno en resina



Imagen 12. Jeringas con resina 3D adicionada con OG, utilizada para dispersión en diferentes tiempos.

Se procede a colocar la jeringa con el contenido de resina y (OG) en la cámara de curado UV, durante un tiempo de 15 minutos tal como indica el fabricante de la resina en sus instrucciones, posterior a esto se realizan cortes de cilindros de 5mm x 2mm, con un disco de diamante y el uso de un micromotor eléctrico. Para así poder liberar las muestras de la resina con (OG) y pasar al post procesado con alcohol isopropílico durante 5 minutos en 3 ciclos, continuos, según protocolos consultados en artículos previos. Como último paso, secar las muestras con aire a presión para eliminar restos de alcohol y resina. Todo lo anterior para los cilindros. En el caso de las barras de resina 3D con (OG) se utilizó la mezcla de resina y (OG) con un tiempo de sonicación de 4 horas, esta se inyectó en un molde elaborado bajo un diseño 3d previamente realizado en el software Solid Works e impreso en resina TPU, utilizando una impresora 3D de filamento, posteriormente a la inyección de la resina 3D mezclada en los moldes, se procedió al protocolo de curado en la caja de curado durante un ciclo de 15 min por cada una de sus caras siendo estos 4 ciclos, para así asegurarnos de un adecuado foto curado y solidificación de la resina 3D y el (OG), posteriormente se retiraron las barras ya foto curadas del molde impreso y se post procesaron en el washer de lavado, en 3 ciclos de 5 min cada uno, con alcohol isopropílico, por último se extrajeron las muestras y se secaron con aire a presión, hasta eliminar restos de resina y alcohol.

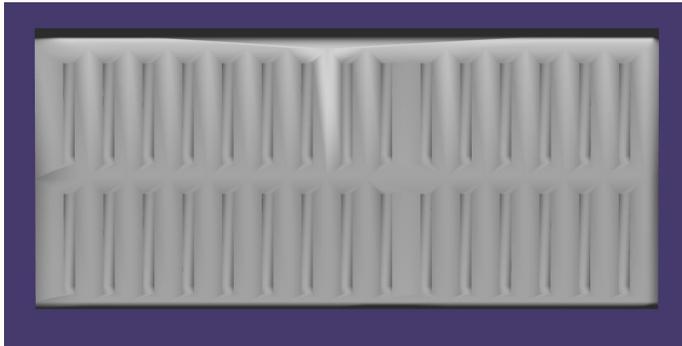


Imagen 13. Molde para inyección de la resina con (OG), elaborado mediante el programa Solid Work's

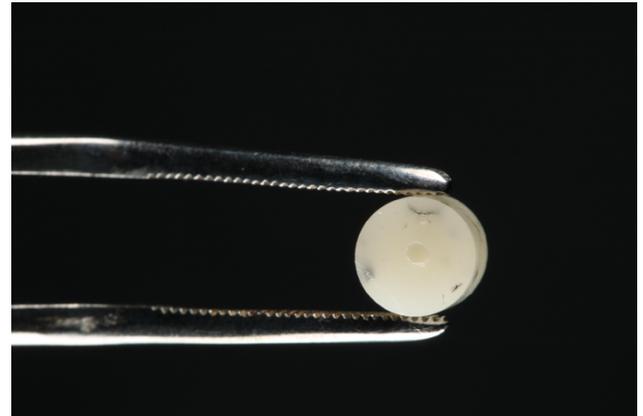


Imagen 14. Disco de resina y OG, a 4 horas de sonicación,

Pruebas mecánicas

Para la evaluación mecánica de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad y dureza de Vickers se utilizaron las instalaciones del laboratorio de nano materiales de la Maestría en Ciencias Odontológicas de la Facultad de Estomatología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en el caso de las pruebas de absorción y solubilidad se realizaron en el laboratorio de Ciencias Básicas, de la Facultad de Estomatología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Para las pruebas de resistencias a la flexión y módulo de elasticidad se utilizaron barras de resina impresa 3D de la marca JamgHE con dimensiones de 2mm x 2mm x 25mm. Y barras de resina 3D JamgHE, adicionada con (OG) con dimensiones de 2mm x 2mm x 25mm.

Para las pruebas de dureza de Vickers se utilizaron cilindros de resina impresa 3D mediante impresora 3D, con dimensiones 9mm x 2mm impresas en resina 3D de la marca JamgHE. Y cilindros de resina 3D de la marca JamgHE, adicionada con oxido de grafeno con dimensiones de 2mm x 5mm elaborados de manera manual.

Para las pruebas de absorción y solubilidad se utilizaron los 5 discos de resina 3D de la marca JamgHE, adicionada con oxido de grafeno, (imagen 8,14,15) con dimensiones de 2mm x 5mm y se segmentaron las barras impresas en resina 3D resina JamgHE de su medida original, 25mm x 2mm x 2mm a 12.5mm x 2mm x 2mm.



Imagen 15. Shimadzu HMV-G, utilizada para realizar prueba mecánica de Vickers



Imagen 16. Disco de resina 3d y OG, impresos, utilizados para las pruebas mecánicas

Pruebas de Flexión y módulo de elasticidad

Se utilizó la máquina de ensayos universales marca SHIMADZU AGS-X series, (imagen 16) la cual evaluó la resistencia a la fractura en 3 puntos, (imagen 7,18) a la cual se sometieron las tablas de 2mm x 2mm x 25mm de resina impresa 3D de la marca JamgHE aplicando fuerza en un punto medio ejerciendo presión que hizo que la tabla de resina impresa 3D con y sin (OG) se estire lentamente hasta llegar al punto de ruptura con una velocidad de 1mm/min.

Esta máquina arrojó los resultados de máxima fuerza, máxima tensión, máxima deformación y máximo desplazamiento mediante datos del Software para análisis de materiales TRAPEZIUM X.



Imagen 17. Máquina de ensayos universales Shimadzu



Imagen 18. Punzón realizado en la prueba de 3 puntos

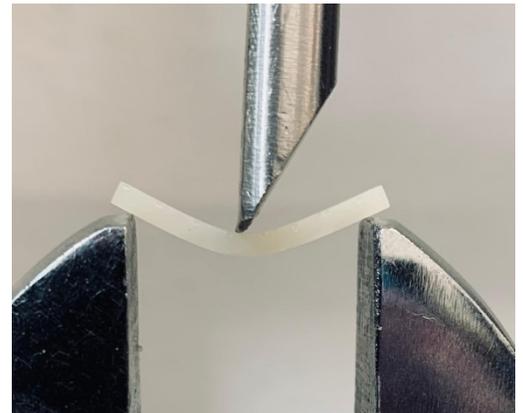


Imagen 19. Prueba de 3 puntos para evaluar flexión y módulo de elasticidad

Pruebas de Dureza Vickers

Para la prueba de dureza de Vickers se utilizó la máquina de medición de dureza de Vickers marca Sinowon TM modelo HV-1000Z, (imagen 19) con una carga de 0.249. N a un tiempo de 15 segundos. Se colocaron las muestras, los cilindros impresos de resina 3D de la marca JamgHE y cilindros de resina 3D de la marca JamgHE, adicionada con (OG) bajo el lente del microscopio de la maquina y se enfocó el área de trabajo, posteriormente, se realizó la indentación a través de una punta de diamante. Se realizaron diez indentaciones por cada muestra para obtener un promedio. (imagen 20)



Imagen 20. Prueba de dureza de Vickers sobre cilindros de resina

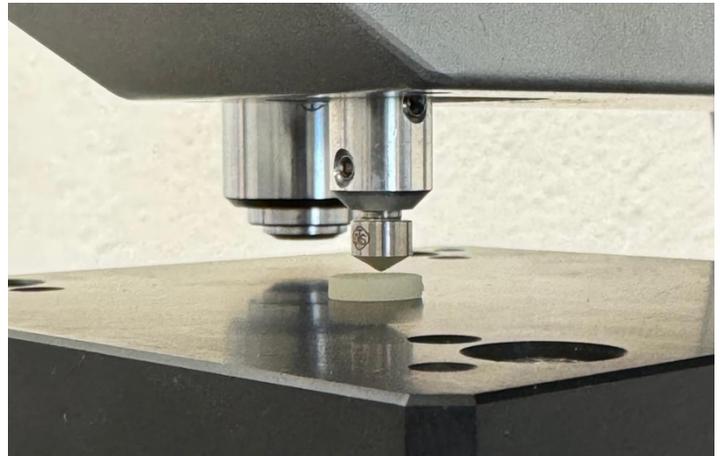


Imagen 21. Prueba de dureza de Vickers sobre cilindros de resina

Pruebas de Absorción y solubilidad

Para evaluar el índice de hinchamiento en agua de la resina dental 3D JamgHE modificada con óxido de grafeno y sin (OG), se utilizaron los 5 discos de resina 3D de la marca JamgHE, adicionada con(OG), con dimensiones de 2mm x 5mm y se segmentaron las barras impresas en resina 3D resina JamgHE de su medida original, 25mm x 2mm x 2mm a 12.5mm x 2mm x 2mm, obteniendo así 2 grupos con 5 muestras cada uno, un grupo control y un grupo con resina 3D adicionada con (OG), realizamos un protocolo de Secado de las muestras en horno a 40–50 °C durante 24 h para eliminar humedad superficial. Posteriormente se dejaron enfriar las muestras en un desecador por 1 h. Se pesaron las muestras secas en balanza analítica (precisión 0.1 mg), para así obtener su masa, una vez obtenida esta se procedió a colocar las muestras en Agua destilada o solución salina (NaCl 0.9 %), a temperatura controlada (37 ± 1 °C). Volumen: mínimo 10 mL por muestra, en tubos individuales. posterior a esto extrajimos las muestras a tiempos definidos: 1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h y 7 días Secamos la superficie suavemente con papel absorbente sin frotar. Pesamos inmediatamente. Y Regresamos la muestra al medio. Con cada uno de los tiempos logramos obtener la masa total de cada una de las muestras para as obtener un resultado.



Imagen 22. Horno utilizado para desecado de muestras.



Imagen 23. muestras utilizadas en prueba de absorción y solubilidad.

Consideraciones Éticas

Se llevaron a cabo los procedimientos pertinentes según la NORMA Oficial Mexicana NOM-087-ECOL-SSA-2002, Protección ambiental – Salud ambiental – Residuos peligrosos biológico – infecciosos – Clasificación y especificaciones de manejo.

El presente proyecto de investigación conto con financiamiento y no existen conflictos de intereses con las marcas o casas comerciales de los materiales que se utilizaran en el estudio.

La difusión de los resultados será por medio de este trabajo de Tesis y se presenta en congresos internacionales.

El procesamiento de los residuos

El procesamiento de los residuos de la resina 3d serán procesados bajo un protocolo de desinfección con etanol al 99% y el resultante se depositará en la basura de uso común debido a que no representan riesgo biológico.

Financiamiento

El alumno fue apoyado con una beca de posgrado otorgada por SECIHTI con el numero 1280885



San Luis Potosí, S.L.P. 08 DE MAYO DE 2025

Eric Eduardo Bravo Trejo
Maestría en Ciencias Odontológicas en el área de Odontología
Integral Avanzada, Facultad de Estomatología, UASLP
P R E S E N T E

Por este conducto me dirijo a Usted en referencia a su trabajo de investigación *titulado* “Evaluación de las propiedades mecánicas y de superficie de resinas dentales 3D modificadas con óxido de grafeno” asignado con la clave: **CEI-FE-020-025**.

Dicho trabajo fue evaluado en los *aspectos del marco ético-legal y bioseguridad* por los miembros del H. Comité de Ética en Investigación: Dra. Claudia Edith Dávila Pérez, Dra. Marlen Guadalupe Vitales Noyola, Dra. Norma Verónica Zavala Alonso, Dra. Adriana Torre Delgadillo, CMF Víctor Mario Fierro Serna, EP Lia Eunice Martínez Martínez, Dr Marco Felipe Salas Orozco, y Arq. Claudia Ramos Alvarado. De dicha evaluación y de forma colegiada, el Comité ha dictaminado que su protocolo de investigación ha sido **APROBADO POR UNANIMIDAD** pudiendo llevarlo a cabo en los tiempos que Usted ha considerado necesarios para su ejecución.

El Comité de Ética en Investigación de la Facultad de Estomatología se rige con la clave **CONBIOÉTICA-24-CEI-001-20190213** de acuerdo con las directrices nacionales para la integración y funcionamiento de los Comités de Ética e Investigación emitidas por la Comisión Nacional de Bioética (CONBIOÉTICA).

Le solicitamos nos haga llegar los informes correspondientes del **AVANCE** de su proyecto de investigación, así como un **INFORME FINAL** para nuestro archivo, recordándole además que este proyecto podrá ser monitoreado en cualquier momento por este Comité.

ATENTAMENTE,

DRA. CLAUDIA EDITH DÁVILA PÉREZ
PRESIDENTE DEL H. COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE ESTOMATOLOGÍA, UASLP



COMITÉ DE ÉTICA EN INVESTIGACIÓN
Facultad de Estomatología, UASLP

www.uaslp.mx

Av. Dr. Manuel Nava 2
Zona Universitaria - CP 78200
San Luis Potosí, S.L.P., México
tel. +52 (444) 826 2300
ext. 5116 a 5120
(444) 813 9743, 854 2522, 23 y 25
www.estomatologia.uaslp.mx
estomatologia@uaslp

Análisis estadístico

Se utilizó el software Minitab 18 para el análisis estadístico.

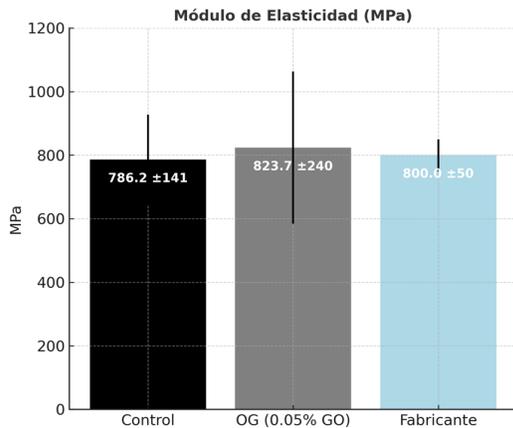
Se realizó la prueba de Shapiro Wilk (ensayos de flexión) y Kolmogorov Smirnov (para ensayos de dureza) para determinar la normalidad de los datos y acorde a los resultados se realizará una prueba de T student o U Mann Whitney

Resultados

Evaluación de Flexión y módulo de elasticidad

Para obtener los resultados de la variable de Flexión y módulo de elasticidad, se tomaron en cuenta los datos arrojados por el Software para análisis de materiales TRAPEZIUM X, de la maquina universal de ensayos, los cuales fueron máxima tensión y elasticidad.

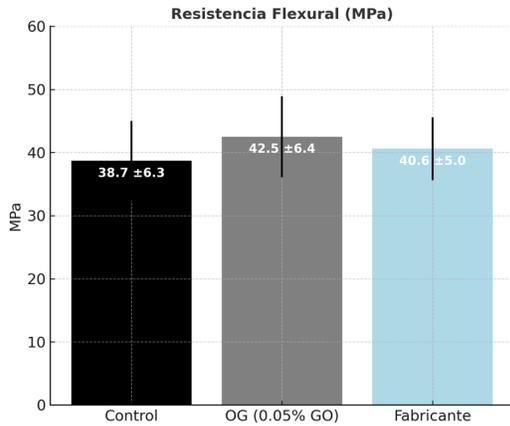
En la evaluación de las tablas de 2mm x 2mm x 25mm de resina impresa 3D de la marca JamgHE con los datos de máxima tensión, donde se midió el esfuerzo que requiere el material para llegar a su punto de fractura. En el caso a la Resistencia de flexión, la evaluación estadística mostró que la resina 3D adicionada con (OG) muestra una mayor resistencia promedio comparada con la resina del grupo control; para el caso de la prueba de Módulo de elasticidad (Ef): La Resina adicionada con (OG) también presenta mayor rigidez (Ef) promedio. Nuevamente, solo se tiene desviación estándar para la Resina Ctrl.



Grafica 1. Módulo de elasticidad

Grupo	Módulo de Elasticidad (MPa)	Desviación Estándar (SD)	Observación
Control	786.2	±141	Valor base de la resina sin aditivos.
GO (0.05%)	823.7	±240	Incremento leve del módulo asociado al GO.
Fabricante	800	±50	Valor de referencia del material Jamg HE C&B.

Tabla 1. Módulo de elasticidad



Grafica 2. Resistencia flexural

Grupo	Resistencia Flexural (MPa)	Desviación Estándar (SD)	Observación
Control	38.7	±6.3	Valor representativo de la resina sin aditivos.
GO (0.05%)	42.5	±6.4	Incremento en la resistencia flexural atribuida al GO.
Fabricante	40.6	±5	Valor intermedio estimado de la ficha técnica.

Tabla. Resistencia flexural

Parámetros analizados: Resistencia de flexión (f) en Pascales (Pa) Módulo de elasticidad (Ef) en Megapascales (MPa), La Resina GO muestra mayores valores promedio tanto en resistencia de flexión como en módulo de elasticidad, lo cual sugiere un mejor desempeño mecánico.

Los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia flexural muestran un comportamiento similar entre los tres grupos evaluados (Control, OG 0.05% y Fabricante). En ambos casos, el material con óxido de grafeno (OG) presentó valores ligeramente superiores respecto al control, lo que sugiere una leve mejora en la rigidez y la resistencia del material. El módulo de elasticidad aumentó de 786.2 MPa en el control a 823.7 MPa con OG, mientras que la resistencia flexural pasó de 38.7 MPa a 42.5 MPa. Estas diferencias, aunque pequeñas, indican que la adición de OG puede contribuir al refuerzo de la matriz, probablemente al limitar la movilidad del polímero. Sin embargo, la alta dispersión observada en los resultados del grupo OG sugiere una distribución no uniforme del aditivo, lo que reduce la consistencia del efecto de refuerzo. En conjunto, los resultados apuntan a una mejora moderada pero no significativa en las propiedades mecánicas con la incorporación del 0.05% de OG, en concordancia con lo reportado por otros estudios donde concentraciones bajas de este aditivo generan incrementos leves en la rigidez y resistencia del material.

Evaluación de dureza.

Para esta evaluación estadística se tomaron en cuenta los datos obtenidos por las longitudes de la indentación de las muestras, donde se obtuvo la dureza de Vickers (HV).

Se evaluó la dureza Vickers de dos tipos de resina fotopolimerizable impresas en 3D: una resina pura y una modificada con grafeno. Las mediciones fueron tomadas utilizando el método de indentación Vickers sobre tres muestras de cada grupo, con cinco repeticiones por muestra.

Resultados

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

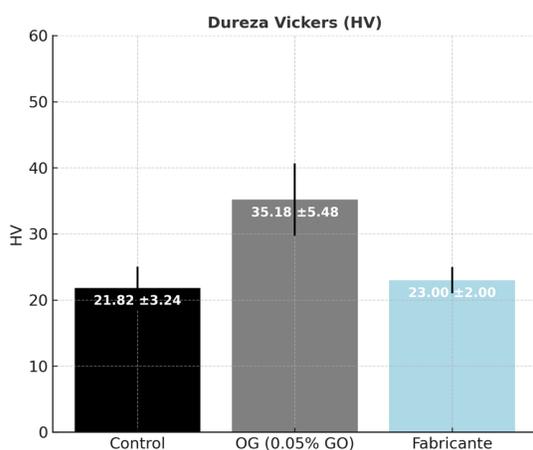


Tabla 3. Dureza de Vickers

Grupo	Dureza Vickers (HV)	Desviación Estándar (SD)	Observación
Control	21.82	±3.24	Valor base de la resina sin aditivos.
GO (0.05%)	35.18	±5.48	Incremento notable de la dureza debido al óxido de grafeno.
Fabricante	23.00	±2.00	Valor de referencia del material según la ficha técnica.

Tabla 3. Dureza de Vickers

Se realizó una prueba t de Student para muestras independientes con el objetivo de determinar si la diferencia en dureza Vickers entre ambos grupos es estadísticamente significativa. Estadístico t = -7.71, valor p = 0.0000. Dado que el valor p es menor a 0.05, se concluye que la diferencia entre las medias es estadísticamente significativa.

Los resultados obtenidos mostraron que la resina con grafeno presentó un valor promedio de dureza significativamente mayor (35.13 ± 4.50) en comparación con la resina pura (23.48 ± 3.74). La diferencia fue confirmada mediante una prueba estadística t de Student para muestras independientes, obteniéndose un valor p < 0.05, lo que indica que la mejora observada es estadísticamente significativa. Estos hallazgos sugieren que la incorporación de grafeno en la matriz de resina mejora notablemente sus propiedades mecánicas, específicamente su resistencia a la indentación. Por lo tanto, la resina con grafeno representa una alternativa prometedora para aplicaciones que requieran materiales con mayor dureza.

Evaluación de Absorción y solubilidad

Para las pruebas de hinchamiento de las muestras de resina JamgHE, con y sin adición de óxido de grafeno (GO al 0.05 % p/p), fueron confeccionadas en forma de cilindros de 6 mm de diámetro y 2 mm de altura, completamente foto polimerizadas y con superficie libre de defectos. Cada grupo se conformó con cinco especímenes. Las probetas se secaban en horno a 40–50 °C durante 24 h para eliminar humedad superficial, se enfriaban en desecador por 1 h y se registraba su masa seca inicial en una balanza analítica. Posteriormente, se sumergían individualmente en 10 mL de agua destilada (o solución salina al 0.9 %) y se incubaban a 37 ± 1 °C.

Las muestras se extraían a distintos intervalos de tiempo (1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h y 7 días), se secaban suavemente con papel absorbente y se pesaban nuevamente para obtener la masa húmeda (Wh). Con estos datos se calculó el índice de hinchamiento y solubilidad.

El fabricante no reporta valores, lo cual justifica la necesidad de nuestro análisis experimental.

Propiedad	Control ($\mu\text{g}/\text{mm}^3$)	OG ($\mu\text{g}/\text{mm}^3$)	ISO 4049 ($\mu\text{g}/\text{mm}^3$)
Abs. Agua	32.45714286	34.05714286	≤ 40
Solubilidad	5.6	2.171428571	≤ 7.5

tabla 4. Absorción y solubilidad

Los resultados de las pruebas de absorción y solubilidad se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ISO 4049, lo que indica un comportamiento adecuado en términos de estabilidad frente al agua. El grupo Control presentó una absorción de $32.46 \mu\text{g}/\text{mm}^3$, mientras que el grupo con óxido de grafeno (OG 0.05%) mostró un valor ligeramente mayor ($34.06 \mu\text{g}/\text{mm}^3$). Aunque se observa un pequeño incremento, ambos resultados se mantienen por debajo del límite máximo de $40 \mu\text{g}/\text{mm}^3$, por lo que no representan una diferencia significativa ni un efecto negativo en la capacidad del material para resistir la penetración de humedad. Este ligero aumento podría deberse a la presencia de grupos funcionales oxigenados en el GO, que pueden favorecer una mayor interacción con el agua. En cuanto a la solubilidad, el comportamiento fue inverso: el grupo con GO presentó un valor considerablemente menor ($2.17 \mu\text{g}/\text{mm}^3$) en comparación con el control ($5.6 \mu\text{g}/\text{mm}^3$). Esto sugiere que la incorporación del GO contribuye a una mayor estabilidad química del material, reduciendo la lixiviación de componentes solubles. Ambos valores se encuentran muy por debajo del límite establecido por la norma ($\leq 7.5 \mu\text{g}/\text{mm}^3$), confirmando la adecuada resistencia a la disolución.

En conjunto, los resultados indican que la adición del 0.05% de GO no altera negativamente la absorción y, al contrario, mejora la resistencia a la solubilidad, lo que podría atribuirse a una mejor cohesión interna del material y a la posible formación de enlaces entre la matriz y las láminas de grafeno. Esto refuerza la idea de que el GO puede actuar como un refuerzo funcional, contribuyendo a la estabilidad y durabilidad del compuesto frente al medio acuoso.

Discusión

Los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas y físicas permiten analizar de manera integral el efecto de la incorporación de óxido de grafeno (OG) en el comportamiento del material evaluado. En general, la adición del 0.05% de OG no generó diferencias estadísticamente significativas respecto al grupo control, pero sí mostró tendencias positivas en varias propiedades relevantes para el desempeño clínico, lo que sugiere una interacción favorable entre el nano material y el polímero. En primer lugar, los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia flexural evidenciaron un ligero incremento en el grupo con OG en comparación con el control. Este comportamiento indica que la presencia del (OG) podría estar actuando como un refuerzo estructural. Esta tendencia coincide con lo reportado en la literatura, donde la incorporación de nanopartículas de grafeno o de sus derivados ha mostrado mejoras moderadas en la resistencia a la flexión y en la rigidez de resinas compuestas, especialmente cuando se utilizan en bajas concentraciones. Dicho incremento, aunque leve, puede resultar clínicamente benéfico, ya que una mayor rigidez contribuye a la distribución más uniforme de los esfuerzos oclusales, reduciendo el riesgo de deformaciones o fracturas en restauraciones sometidas a cargas repetitivas.

En cuanto a la dureza Vickers, los valores observados también reflejaron una tendencia al aumento en las muestras modificadas con OG. Este comportamiento puede explicarse por la interacción física y química entre el OG y la resina, que produce una estructura más densa y resistente al rayado o a la indentación. Estudios previos han señalado que el óxido de grafeno puede mejorar la dureza superficial de los compuestos resinosos debido a su alta rigidez y a su capacidad de distribuir los esfuerzos aplicados sobre una superficie mayor. Desde el punto de vista clínico, una mayor dureza superficial se asocia con una mejor resistencia al desgaste, lo que favorece la longevidad de las restauraciones en el ambiente bucal. Por otro lado, las propiedades fisicoquímicas de absorción y solubilidad también mostraron resultados favorables. Ambos grupos, control y OG, cumplieron con los límites establecidos por la norma ISO 4049, lo que confirma la adecuada estabilidad del material frente al medio acuoso. Sin embargo, se observó que la solubilidad disminuyó notablemente con la incorporación de OG. Esta reducción sugiere que la presencia del óxido de grafeno favorece la integridad química del material. Diversos estudios han reportado resultados similares, atribuyendo este

comportamiento a la estructura laminar del OG, que dificulta la penetración del agua y reduce la liberación de componentes de la resina.

En el caso de la absorción de agua, los valores se mantuvieron similares entre ambos grupos (32.46 $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ para el control y 34.06 $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ para OG), lo cual indica que la adición del OG no compromete la estabilidad dimensional del material. Esto resulta relevante, ya que una absorción excesiva puede provocar hinchamiento, alteración de las propiedades mecánicas y deterioro de la adhesión al sustrato dental. En conjunto, los resultados sugieren que la incorporación del 0.05% de óxido de grafeno genera mejoras leves en la rigidez, la dureza y la estabilidad química, sin afectar negativamente la absorción de agua ni la integridad estructural. Si bien las diferencias no son marcadas, la tendencia observada concuerda con lo descrito en diversos trabajos que destacan el potencial del OG como refuerzo funcional en materiales odontológicos, debido a su elevada resistencia mecánica, su biocompatibilidad y su capacidad para reforzar matrices poliméricas.

Estos hallazgos respaldan la idea de que el OG, incluso en bajas concentraciones, puede contribuir al desarrollo de materiales restauradores más estables y duraderos, siempre que se logre una dispersión homogénea dentro del polímero. Futuras investigaciones podrían explorar concentraciones ligeramente superiores o estrategias de funcionalización del OG que mejoren su compatibilidad con el sistema resinoso, optimizando así su efecto reforzante sin comprometer otras propiedades clínicas esenciales.

Limitaciones y/o nuevas perspectivas de investigación.

En este estudio, una de las principales limitaciones fue la cantidad de grafeno disponible para el mismo, para evaluar las propiedades físicas y de superficie de la resina 3D adicionada con (OG). En el caso de que hubiésemos contado con el material necesario podríamos haber realizado más pruebas en cuanto a tiempos y concentración y unificación del (OG) en la resina 3D, y así tener un análisis más amplio. Se recomienda seguir con la línea de investigación de la incorporación de (OG) a las resinas dentales 3D con los porcentajes de óxido de grafeno trabajados en este proyecto (0.05%), para su evaluación antifúngica, antimicrobiana, la adhesión de biofilm, evaluación de citotoxicidad, pruebas de envejecimiento in vitro e in vivo y poner en práctica clínica.

Se recomienda estudiar de igual manera estos porcentajes de óxido de grafeno añadidos a la resina dental 3D y buscar su incorporación mediante dispersión coloidal para así saber si existen modificaciones estructurales y de superficie de las resinas dentales 3D y una vez logrado esto amplía las pruebas en sus diferentes variantes para corroborar la mejora o no de la resina dental 3D

Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que la incorporación de óxido de grafeno en resinas dentales 3D genera un efecto positivo en sus propiedades mecánicas. En particular, se observó un incremento en la resistencia a la fractura y en la dureza superficial, lo que respalda el potencial de este nanomaterial como refuerzo en matrices poliméricas utilizadas en odontología digital. La resina dental modificada con un 0.05% de óxido de grafeno mostró un desempeño superior frente al grupo control, evidenciando que incluso bajas concentraciones de este aditivo pueden producir mejoras significativas sin alterar los protocolos de impresión o postprocesamiento. Esto abre la posibilidad de implementar el material en la práctica clínica sin requerir cambios sustanciales en los procesos ya establecidos. Desde un punto de vista clínico, estos resultados sugieren que el uso de resinas reforzadas con óxido de grafeno podría contribuir a la elaboración de restauraciones y prótesis más duraderas, disminuyendo la

frecuencia de reemplazos y, por ende, mejorando la calidad de vida del paciente. Asimismo, el aumento en la dureza superficial observado representa una ventaja en aplicaciones donde los materiales están sometidos a cargas oclusales elevadas. A nivel académico y científico, el trabajo aporta evidencia que respalda la incorporación de nanomateriales en odontología, destacando al óxido de grafeno como un aditivo prometedor en el desarrollo de nuevos biomateriales. Estos hallazgos no solo enriquecen el conocimiento existente, sino que también marcan un punto de partida para investigaciones posteriores orientadas a evaluar otras propiedades, como el comportamiento biológico, la adhesión bacteriana, el envejecimiento acelerado o la respuesta celular.

Finalmente, se recomienda dar continuidad a esta línea de investigación mediante estudios *in vitro* con diferentes concentraciones y métodos de dispersión, así como ensayos *in vivo* que permitan validar la biocompatibilidad y seguridad del material en escenarios clínicos reales. Del mismo modo, se plantea explorar la aplicación del óxido de grafeno en otros materiales odontológicos, como cementos, composites o recubrimientos para implantes, ampliando así las posibilidades de innovación en la odontología restauradora y preventiva.

Referencias

1. Tahriri M, Del Monico M, Moghanian A, Tavakkoli Yarak M, Torres R, Yadegari A, et al. Graphene and its derivatives: Opportunities and challenges in dentistry. Vol. 102, *Materials Science and Engineering C*. Elsevier Ltd; 2019. p. 171–85.
2. Ge Z, Yang L, Xiao F, Wu Y, Yu T, Chen J, et al. Graphene Family Nanomaterials: Properties and Potential Applications in Dentistry. *Int J Biomater*. 2018;2018.
3. Li J, Zeng H, Zeng Z, Zeng Y, Xie T. Promising Graphene-Based Nanomaterials and Their Biomedical Applications and Potential Risks: A Comprehensive Review. Vol. 7, *ACS Biomaterials Science and Engineering*. American Chemical Society; 2021. p. 5363–96.
4. Lee JH, Jo JK, Kim DA, Patel KD, Kim HW, Lee HH. Nano-graphene oxide incorporated into PMMA resin to prevent microbial adhesion. *Dental Materials*. 2018;34(4): e63–72.
5. Ge Z, Yang L, Xiao F, Wu Y, Yu T, Chen J, et al. Graphene Family Nanomaterials: Properties and Potential Applications in Dentistry. *Int J Biomater*. 2018;2018.
6. Tahriri M, del Monico M, Moghanian A, Tavakkoli Yarak M, Torres R, Yadegari A, et al. Graphene and its derivatives: Opportunities and challenges in dentistry. Vol. 102, *Materials Science and Engineering C*. Elsevier Ltd; 2019. p. 171–85.

7. Banerjee AN. Graphene and its derivatives as biomedical materials: Future prospects and challenges. Vol. 8, Interface Focus. Royal Society Publishing; 2018.
8. Li X, Liang X, Wang Y, Wang D, Teng M, Xu H, et al. Graphene-Based Nanomaterials for Dental Applications: Principles, Current Advances, and Future Outlook. Vol. 10, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology.
9. Urcuyo Solórzano R, Cordero Solano KV, González Flores DA. Perspectivas y aplicaciones reales del grafeno después de 16 años de su descubrimiento. *Revista Colombiana de Química*. 2021 Mar 25;50(1):51– 85.
10. Qu Y, He F, Yu C, Liang X, Liang D, Ma L, et al. Advances on graphene-based nanomaterials for biomedical applications. Vol. 90, *Materials Science and Engineering C*. Elsevier Ltd; 2018. p. 764–80.
11. Xie H, Cao T, Rodríguez-Lozano FJ, Luong-Van EK, Rosa V. Graphene for the development of the next-generation of biocomposites for dental and medical applications. Vol. 33, *Dental Materials*. Elsevier Inc.; 2017. p. 765–74.
12. Amudha Lakshmi K, Salooqa Kasim MM, Trofessor A. The revolutionary era of Graphene in Dentistry-a review. Vol. 6. 2016.
13. Rhazouani A, Gamrani H, El Achaby M, Aziz K, Gebrati L, Uddin MS, et al. Synthesis and Toxicity of Graphene Oxide Nanoparticles: A Literature Review of in Vitro and in Vivo Studies. Vol. 2021, *BioMed Research International*. Hindawi Limited; 2021.
14. Dreanca A, Sarosi C, Parvu AE, Blidaru M, Enacrachi G, Purdoiu R, et al. Systemic and local biocompatibility assessment of graphene composite dental materials in experimental mandibular bone defect. *Materials*. 2020 13(11).
15. García-Contreras. R, Guzmán-Juárez. H, López-Ramos. D, Alvarez-Gayosso. C. Biological and physico-mechanical properties of poly (Methyl methacrylate) enriched with graphene oxide as a potential biomaterial. *Journal of Oral Research*. 2021;10(2):1–9.
16. Olteanu D, Filip A, Socaci C, Biris AR, Filip X, Coros M, et al. Cytotoxicity assessment of graphene-based nanomaterials on human dental follicle stem cells. *Colloids Surf B Biointerfaces*. 2015; 136:791–8.
17. Graphenemex, Energeia Fusion S.A. de C.V. Ficha técnica óxido de grafeno, Graphenemex.
18. Saeed F, Muhammad N, Khan AS, Sharif F, Rahim A, Ahmad P, et al. Prosthodontics dental materials: From conventional to unconventional. Vol. 106, *Materials Science and Engineering C*. Elsevier Ltd; 2020.
19. Friel T, Waia S. Removable Partial Dentures for Older Adults. *Prim Dent J*. 2020 Sep 1;9(3):34–9.
20. Atala J, Ocampo M, Ibañez CA, Cabral R, Lagnarini L. Comparison between the strength of existing acrylic resins for full dentures processed during short and conventional periods of time. *Rev Fac Odont UNC*. 2018;27(2).
21. Zafar MS. Prosthodontic applications of polymethyl methacrylate (PMMA): An update. Vol. 12, *Polymers*. MDPI AG; 2020. p. 1–35.

22. Bacali C, Badea M, Moldovan M, Sarosi C, Nastase V, Baldea I, et al. The influence of graphene in improvement of physico-mechanical properties in PMMA denture base resins. *Materials*. 2019 Jul 1;12(14).
23. Punset M, Brizuela A, Pérez-Pevida E, Herrero-Climent M, Manero JM, Gil J. Mechanical Characterization of Dental Prostheses Manufactured with PMMA–Graphene Composites. *Materials*. 2022 Aug 1;15(15).
24. Matsuo H, Suenaga H, Takahashi M, Suzuki O, Sasaki K, Takahashi N. Deterioration of polymethyl methacrylate dentures in the oral cavity. *Dent Mater J*. 2015 Jan 19;34(2):234–9.
25. Matsuo H, Suenaga H, Takahashi M, Suzuki O, Sasaki K, Takahashi N. Deterioration of polymethyl methacrylate dentures in the oral cavity. *Dent Mater J*. 2015 Jan 19;34(2):234–9.
26. Zafar MS. Prosthodontic applications of polymethyl methacrylate (PMMA): An update. Vol. 12, *Polymers*. MDPI AG; 2020. p. 1–35.
27. Kostić M, Igić M, Gligorijević N, Nikolić V, Stošić N, Nikolić L. The Use of Acrylate Polymers in Dentistry. Vol. 14, *Polymers*. MDPI; 2022.
28. Patil SR, Maragathavalli G, Ramesh DNSV, Naidu GS, Alam MK, Alzoubi IA. The Reliability of a New Device for Measuring the Maximum Bite Force.