



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

DOCTORADO INSTITUCIONAL EN INGENIERÍA Y  
CIENCIA DE MATERIALES

**TESIS**

*Evaluación de la deformación y las propiedades antibacterianas  
de alginatos dentales mezclados con nanopartículas de plata.*

**PRESENTA:**

M. EN C. MARIO AZAREEL RIVERA CORTÉS.

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE MATERIALES

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. JUNIO 2025.



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

DOCTORADO INSTITUCIONAL EN INGENIERÍA Y  
CIENCIA DE MATERIALES

*Evaluación de la deformación y las propiedades antibacterianas  
de alginatos dentales mezclados con nanopartículas de plata.*

**PRESENTA:**

M. EN C. MARIO AZAREEL RIVERA CORTÉS.

**DIRECTORES DE TESIS:**

DR. GABRIEL ALEJANDRO MARTÍNEZ CASTAÑÓN.

DRA. NEREYDA NIÑO MARTÍNEZ.

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. JUNIO 2025.



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

DOCTORADO INSTITUCIONAL EN INGENIERÍA Y  
CIENCIA DE MATERIALES

*Evaluación de la deformación y las propiedades antibacterianas  
de alginatos dentales mezclados con nanopartículas de plata.*

**PRESENTA:**

M. EN C. MARIO AZAREEL RIVERA CORTÉS.

**DIRECTORES DE TESIS:**

DR. GABRIEL ALEJANDRO MARTÍNEZ CASTAÑÓN.

DRA. NEREYDA NIÑO MARTÍNEZ.

**ASESORES:**

DR. ELEAZAR SAMUEL KOLOSOVAS MACHUCA.

DR. FACUNDO RUIZ.

DRA. BRENDA ERENDIDA CASTILLO SILVA.

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. JUNIO 2025.



---

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

DOCTORADO INSTITUCIONAL EN INGENIERÍA Y  
CIENCIA DE MATERIALES

*Evaluación de la deformación y las propiedades antibacterianas  
de alginatos dentales mezclados con nanopartículas de plata.*

**PRESENTA:**

M. EN C. MARIO AZAREEL RIVERA CORTÉS.

**DIRECTORES DE TESIS:**

Dr. Gabriel Alejandro Martínez Castañón \_\_\_\_\_

Dra. Nereyda Niño Martínez. \_\_\_\_\_

**ASESORES:**

Dr. Eleazar Samuel Kolosovas Machuca. \_\_\_\_\_

Dr. Facundo Ruiz. \_\_\_\_\_

Dra. Brenda Erendida Castillo Silva. \_\_\_\_\_

Dra. Martha Eugenia Compean Jasso. \_\_\_\_\_

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. JUNIO 2025.



Evaluación de la deformación y las propiedades antibacterianas de alginatos dentales mezclados con nanopartículas de plata © 2025 por Mario Azareel Rivera Cortes se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>11</b>
<b>1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4 HIPÓTESIS NULA .....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>8</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
2.1 MATERIALES .....	14
2.2 NANOPARTÍCULAS DE PLATA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	14
2.3 MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN.....	15
2.4 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL.....	18
2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO. ....	18
2.6 MEDICIÓN DEL EFECTO ANTIBACTERIANO. ....	18
2.7 DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ....	19
<b>3. CAPITULO 3. ....</b>	<b>21</b>
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
3.1.2 MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN.....	21
3.1.3 RUGOSIDAD SUPERFICIAL. ....	22
3.1.4 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO. ....	23
3.1.6 DIFRACCIÓN DE RAYOS X. ....	27
3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	29
<b>4. CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 DISCUSIÓN. ....</b>	<b>30</b>
<b>5. CAPITULO 5 .....</b>	<b>33</b>
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>33</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	33
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>34</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>38</b>
ANEXO 1. ARTÍCULO.....	38

## RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la incorporación de nanopartículas de plata (AgNPs) de 5,57 nm en alginatos dentales sobre su deformación y propiedades antimicrobianas. Se prepararon seis grupos experimentales: dos alginatos diferentes con 0,25 % de AgNPs, dos alginatos diferentes con 0,5 % de AgNPs (5,57 nm) y dos grupos de alginatos control sin modificar. La presencia de AgNPs se confirmó mediante análisis de difracción de rayos X con un difractómetro Bruker D8 Advance. La actividad antimicrobiana se evaluó mediante el método de difusión por medio de contacto directo contra cultivos de *E. coli* y *S. aureus* incubados en agar Mueller-Hinton (M-H) a 37 °C durante 24 horas. Los resultados demostraron que la adición de 0,25 % y 0,5 % de nanopartículas de plata (AgNPs) mejoró significativamente las propiedades antimicrobianas del alginato ( $p < 0,05$ ), mostrando claras zonas de inhibición frente a los microorganismos estudiados. En cuanto a las propiedades mecánicas, las muestras modificadas con nanopartículas de plata (AgNPs) mostraron una mejor recuperación elástica en comparación con el grupo control ( $p > 0,05$ ). Estos hallazgos sugieren que la incorporación de nanopartículas de plata a los alginatos podría mejorar sus propiedades antimicrobianas sin comprometer la integridad mecánica requerida para las aplicaciones dentales.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

Los alginatos dentales se desarrollaron hace casi un siglo, aún se encuentran en continua evolución y se utilizan regularmente en la mayoría de los consultorios dentales para realizar modelos diagnósticos y digitales [1]. El alginato se caracteriza por su bajo costo en el mercado y por su mejor comportamiento en comparación con otros materiales de impresión [2]. La impresión obtenida con alginatos en la primera consulta odontológica es importante porque genera la evaluación inicial del estado de salud bucal del paciente [3]. Los alginatos para impresiones dentales son sales de ácido algínico, un polisacárido extraído de las paredes celulares de las algas. El ácido algínico luego se convierte en una sal (alginato) de sodio, potasio o magnesio. Si bien el alginato es insoluble en agua, sus sales alcalinas son solubles en agua y, por lo tanto, su uso en odontología [1,3]. La infección cruzada es una de las principales preocupaciones al usar alginatos para producir modelos de yeso, el objetivo de este trabajo fue determinar si la adición de nanopartículas de plata a los alginatos podría proporcionarles propiedades antibacterianas sin afectar su deformación. No consideramos la caracterización completa de los alginatos debido a que las propiedades de estos materiales ya se han descrito en otros estudios. Para ALGINo-plast®, su viscosidad dinámica se reporta como 90 Pa·s, el tiempo de gelificación es de 128,5 s y la resistencia a la compresión de 0,82 Mpa, y el tiempo de gelificación para Cavex Cream es de 126,5 s [4,5].

La cavidad oral contiene más de 1591 especies microbianas, incluyendo bacterias, hongos, arqueas, virus y protozoos, que colonizan las superficies duras y blandas de la cavidad bucal, entre las que se encuentran los órganos dentales y los tejidos adyacentes [6,7]. La desinfección inadecuada y la falta de una correcta implementación de los protocolos resultan en un entorno inseguro. *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Streptococcus* y *Candida albicans* son comunes en pacientes con prótesis dentales o aparatos de

ortodoncia [8,9]. Los microorganismos patógenos no solo pueden alojarse en la superficie del material, sino también en su interior, debido a la naturaleza hidrófila del alginato. Investigaciones recientes han demostrado que muchas impresiones se envían a laboratorios sin someterse a ningún tipo de desinfección [10,11]. Además, la sangre y la saliva son fluidos orales comunes que contaminan los materiales [12]. El procedimiento de enjuagar las impresiones dentales con agua antes de enviarlas al laboratorio elimina los residuos, pero no las desinfecta, siendo un procedimiento inadecuado para una desinfección efectiva [10]. La aspersion y la inmersión son actualmente los métodos más utilizados para desinfectar impresiones; sin embargo, requieren más tiempo y causan efectos negativos relacionados con las propiedades mecánicas del alginato [13,14]. Los desinfectantes aplicados después del fraguado pueden no penetrar eficazmente en todas las áreas [15]. El alginato dental es propenso a la contaminación debido a su naturaleza hidrófila y estructura porosa, que facilitan la penetración de microorganismos [16].

Las nanopartículas de plata se utilizan clínicamente como agentes antibacterianos aprobados por la FDA [17]. Las AgNPs poseen propiedades antimicrobianas y son muy aplicables en odontología, incluyendo prótesis dentales, adhesivos e implantes [18]. En los últimos años, la incorporación de AgNPs en materiales dentales clínicos ha recibido cada vez más atención debido a sus propiedades antimicrobianas bien documentadas. Diversos estudios han reportado que la adición de AgNPs a adhesivos de ortodoncia, selladores biocerámicos endodónticos y polimetilmetacrilato (PMMA) reduce significativamente la carga microbiana en el ambiente bucal. Esta funcionalización no solo mejora el rendimiento clínico de los materiales, sino que también mejora la eficacia terapéutica de los tratamientos en los que se aplican, favoreciendo un mejor pronóstico y una mayor longevidad de los procedimientos dentales. El uso de esta nanotecnología representa un avance prometedor hacia la optimización de la bioseguridad en la práctica odontológica contemporánea [19,20,21]. Su pequeño tamaño, gran superficie y propiedades fisicoquímicas únicas la hacen efectiva contra un amplio espectro de bacterias, virus y hongos. [18] Por lo tanto, el objetivo

de este trabajo es evaluar la deformación y las propiedades antimicrobianas de dos alginatos comerciales mezclados con AgNPs (5,57 nm). La hipótesis fue que la incorporación de nanopartículas de plata a los alginatos dentales proporcionaría actividad antimicrobiana a los materiales sin afectar significativamente su rendimiento mecánico.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El uso de alginatos dentales en odontología como material de impresión es utilizado regularmente dentro del ámbito clínico como medio de diagnóstico bucal de primera instancia, por ser un material económico y de fácil manipulación.

Siendo unos de los materiales más usados en Odontología, ya que desde la primera cita es esencial para poder realizar un diagnóstico dental, primordial para la elaboración de modelos de yeso, para obtener un registro dental de cada paciente. En ocasiones su uso va más allá de un diagnóstico ya que es a veces complementa su uso a algún tratamiento restaurativo.

Es por ello la indagatoria de un proceso de desinfección o de neutralización bacteriana necesario para evitar contaminación alguna, tanto del odontólogo como del técnico dental es decir, contaminación cruzada; sabiendo que la cavidad bucal posee gran cantidad de agentes microbianos, comprobado que la saliva y la sangre son capaces de mezclarse con los materiales de impresión pudiendo provocando contaminaciones cruzadas dentro de una clínica o un consultorio, de ahí la importancia de métodos de desinfección efectivos que sean capaces de eliminar cualquier ambiente bacteriano que pudiera alojarse en dicho material y evitar contaminación alguna.

La utilización de AgNPs como posible solución es una opción que pudiera resultar eficaz para la eliminación de bacterias en dichos materiales de impresión y evitar contaminación no solo del clínico sino también del personal que llegara a manipular dicho material.

## 1.3 HIPÓTESIS DE TRABAJO

La adición de nanopartículas de plata a los alginatos no modificará significativamente su deformación y sus propiedades antibacterianas comparado con el grupo control.

## 1.4 HIPÓTESIS NULA

La adición de nanopartículas de plata a los alginatos modificará significativamente su deformación y sus propiedades antibacterianas comparado con el grupo control.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la adición de nanopartículas de plata a los alginatos sobre su deformación y sus propiedades antibacterianas comparadas con el grupo control.

### 1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar una metodología para mezclar nanopartículas de plata con alginato.
- Evaluar la deformación del alginato ALGINoplast® a concentraciones de 0.25% y 0.5% de AgNPs comparandolo con el grupo control.
- Evaluar la capacidad antibacteriana usando el método de disco por contacto directo del alginato ALGINoplast® a concentraciones de 0.25% y 0.5% de AgNPs comparándolas con el grupo control.

- Evaluar la deformación del alginato Cavex a concentraciones de 0.25% y 0.5% de AgNP en comparación con el grupo control.
- Evaluar la capacidad antibacteriana usando el método de disco por contacto directo y propiedades mecánicas del alginato Cavex a concentraciones de 0.25% y 0.5% de AgNPs.
- Analizar la rugosidad superficial de los alginatos ALGINo-plast® y Cavex Cream.
- Analizar la difracción de rayos x del alginato Cavex Cream y ALGINo-plast® mezclado con nanopartículas de plata en concentraciones de 0 %, 0.25% y 0.5% en peso.

# CAPÍTULO 2

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 MATERIALES

Para este estudio in vitro, se formaron seis grupos, cada uno compuesto por diez muestras ( $n = 10$ ). Se compararon dos marcas comerciales de alginato: Cavex Cream (© Cavex Holland BV, Países Bajos) y ALGINoplast® (Heraeus Kulzer, Alemania). Los grupos se organizaron de la siguiente manera:

Grupo 1: ALGINoplast + agua destilada sin nanopartículas.

Grupo 2: ALGINoplast + agua destilada y AgNPs al 0,25 % en peso.

Grupo 3: ALGINoplast + agua destilada y AgNPs al 0,5 % en peso.

Grupo 4: Cavex Cream + agua destilada sin AgNPs.

Grupo 5: Cavex Cream + agua destilada y AgNPs al 0,25 % en peso.

Grupo 6: Cavex Cream + agua destilada y AgNPs al 0,5 % en peso.

### 2.2 NANOPARTÍCULAS DE PLATA Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Las AgNPs utilizadas en este trabajo se prepararon mediante un método de precipitación química con ácido gálico como agente reductor y estabilizador; las nanopartículas de plata mostraron una morfología esférica con un diámetro de 5,57 nm (medido mediante TEM). El análisis DLS mostró un diámetro hidrodinámico de 5,6 nm con un máximo de resonancia plasmónica superficial (RPS) a 405 nm, lo que confirmó su identidad. Se encontró un potencial zeta de -36 mV con un índice de polidispersidad del 24,36 %; esta caracterización se presenta en detalle en Navarrete-Olvera et al. [19].

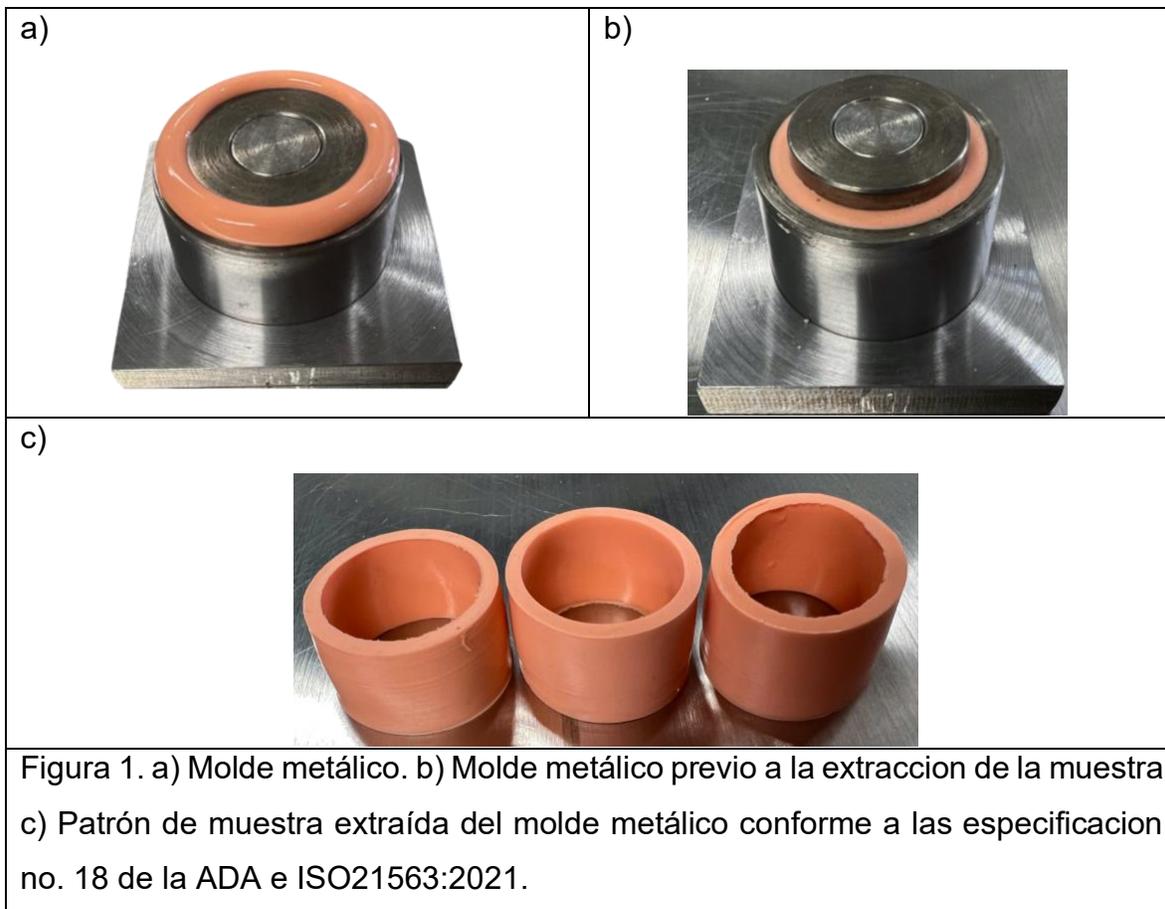
Para los grupos control (1 y 4), se utilizó agua destilada pura para la preparación del alginato sin aditivos. Para los grupos con un 0,25 % en peso de nanopartículas de plata (2 y 5), se combinaron 2,3 g de polvo de alginato con 4,3 ml de agua

destilada y 0,625 ml de nanopartículas de plata (1070 ppm). Para los grupos de AgNPs al 0,50 % en peso (3 y 6), se mezclaron 2,3 g de polvo de alginato con 3,75 ml de agua destilada y 1,25 ml de AgNPs (1070 ppm). Tanto el alginato Cavex como ALGINoplast® requieren un vertido inmediato para mantener su estabilidad dimensional [22].

## 2.3 MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN

La preparación de las muestras de prueba y control se realizó siguiendo el protocolo descrito en la especificación n.º 18 de la ADA [23] e ISO: 21563:2021 [24] utilizando un troquel maestro. Las muestras se crearon colocando un anillo (3 cm de diámetro interior, 16 mm de altura) sobre una placa de vidrio plana y llenándolo ligeramente más de la mitad con alginato dental (grupo de control) o modificado (grupo de prueba).

A continuación, se colocó un molde metálico (12,7 mm de diámetro interior, 25,4 mm de diámetro exterior, 19,2 mm de altura) dentro del anillo y se presionó contra el material hasta que entró en contacto con la placa de vidrio, permitiendo que el exceso de material exudara hacia el molde superior (figura 1). Se colocó una placa de latón macizo sobre la superficie superior del anillo para eliminar cualquier exceso de material. La muestra preparada se transfirió a un aparato de deformación, donde se colocó sobre ella una placa ligera (15 x 15 mm y 2 mm de espesor), (Figura 1). A continuación, se puso en contacto la base de un comparador de carátula con la placa para medir la deformación [25].



El ensayo se realizó de acuerdo con el siguiente cronograma, donde  $t$  fue el tiempo de fraguado inicial: (a)  $t + 45$  segundos: se bajó el husillo del comparador de carátula hasta que entró en contacto con la placa de la muestra; (b)  $t + 55$  segundos: se leyó el comparador de carátula, se registró el valor inicial y se fijó el husillo en la posición "arriba"; (c)  $t + 60$  segundos: la muestra se deformó hasta una altura de  $16 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$  en 1 segundo; esta deformación se mantuvo durante  $5 \text{ segundos} \pm 0,5 \text{ segundos}$  y, a continuación, se liberó. (d)  $t + 90$  segundos: se bajó el husillo del comparador de carátula hasta que entró en contacto con la placa de la muestra; (e)  $t + 100$  segundos: se leyó el comparador de carátula y se registró el valor (Figura 2).

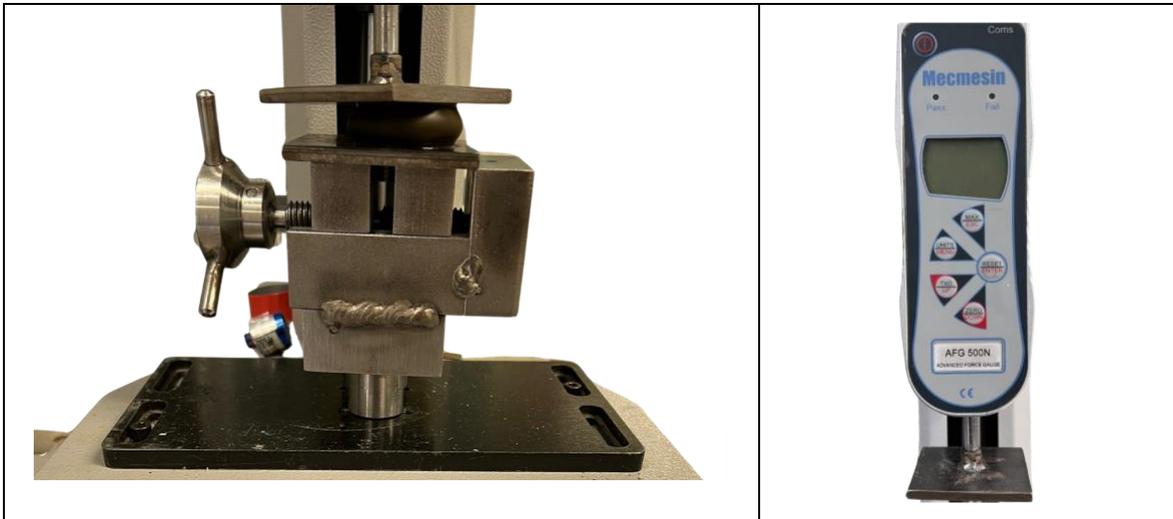


Figura 2. Muestras de deformación colocadas sobre la placa metálica de la máquina de ensayos universal.

La recuperación elástica se calculó como porcentaje utilizando la siguiente fórmula de la especificación ANSI/ADA n.º 18 [23]:

$$100 \left( 1 - \frac{a - b}{16} \right)$$

donde 16 representa la longitud del molde en milímetros. Todas las pruebas se diseñaron de acuerdo con la especificación ANSI/ADA n.º 18 para material de impresión hidrocoloide irreversible [23,25]:

Las muestras de deformación se prepararon de forma similar a las demás muestras y cada sección se colocó sobre la placa metálica de la máquina de ensayos universal (Multitest 1-d/Mecmesin, West Sussex, Reino Unido) y se evaluó su resistencia a la compresión. Las muestras se cargaron de forma continua y lo más uniforme posible para producir una velocidad promedio de 100 N/min  $\pm$  20 N/min hasta el punto de fluencia.

## 2.4 ANÁLISIS DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL.

Se obtuvieron mediciones de rugosidad superficial de tres puntos diferentes en las muestras utilizando microscopía de fuerza atómica (AFM) (Nanosurf Easy Scan 2, SPM Electronics, Liestal, Suiza) en modo de contacto con una velocidad de escaneo de nitruro de silicio (SiN) de 49,5  $\mu\text{m/s}$ . Los valores utilizados para el voladizo corto fueron constante elástica de 0,1 N/m, frecuencia de resonancia de 28 kHz, longitud de 225  $\mu\text{m}$ , anchura media de 28  $\mu\text{m}$ , espesor de 1  $\mu\text{m}$ , altura de la punta de 14  $\mu\text{m}$  y radio  $<10$  nm. Se utilizó una rejilla de calibración de óxido de silicio sobre un sustrato de silicio (Nanosurf AG, CH-4410, SPM Electronics, Liestal, Suiza) con periodicidad XY de 10  $\mu\text{m}$  y una altura Z de 119 nm para calibrar el instrumento antes de la evaluación. Se utilizó el software Nanosurf Easy Scan 2 (versión 1.6) para medir los parámetros AFM. La rugosidad superficial se cuantificó mediante el promedio de rugosidad ( $S_a$ ), que representa la media aritmética de los valores absolutos del perfil de la superficie escaneada.

## 2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Se obtuvieron imágenes de muestras con y sin nanopartículas de plata mediante microscopía electrónica de barrido. Se prepararon discos de cada muestra y se dejaron secar a temperatura ambiente. Posteriormente, se recubrieron con carbono y se analizaron con un microscopio JEOL JSM-6610 (JEOL Ltd., Tokio, Japón) a 25 kV. El análisis químico se realizó con un analizador EDS conectado al microscopio.

## 2.6 MEDICIÓN DEL EFECTO ANTIBACTERIANO.

Se prepararon discos de alginato impregnados con AgNPs (0,25 y 0,5 % en peso) para evaluar su actividad antimicrobiana. Las muestras se estandarizaron en cuanto a dimensiones, con un diámetro de 10 mm y un espesor de 2 mm. Se

establecieron seis grupos experimentales, cada uno compuesto por diez discos, lo que resultó en un total de 120 muestras. Cada grupo se inoculó con cepas bacterianas específicas para evaluar la interacción entre los discos de alginato, las nanopartículas de plata y las bacterias seleccionadas. Los discos se colocaron en placas de agar Mueller-Hinton (M-H) inoculadas con cultivos de *Escherichia coli* (ATCC 25922) y *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) y se incubaron a 37 °C durante 24 horas [24]. El inóculo bacteriano se preparó utilizando el estándar McFarland (0,5), correspondiente a una concentración de  $10^8$  UFC/mL. Tras 24 horas de incubación, se midió el diámetro de las zonas de inhibición del crecimiento en milímetros.

## 2.7 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

La difracción de rayos X se ha convertido en una técnica estándar para la investigación y el análisis de las propiedades de los materiales cristalinos. Su naturaleza no destructiva permite preservar la integridad de la muestra, lo que la hace adecuada para una amplia gama de aplicaciones científicas e industriales. Mediante la difracción de rayos X (DRX), se puede lograr una comprensión más profunda de las propiedades de los materiales, lo cual es esencial para el avance de las innovaciones tecnológicas y la mejora del rendimiento de los materiales en diversas aplicaciones [28]. Los resultados obtenidos de los difractogramas indican la presencia o ausencia de materiales específicos [29].

Para corroborar la presencia de nanopartículas de plata en el alginato, se realizó la prueba de difracción de rayos X, que consiste en analizar la composición de un material y sus componentes, en este caso el alginato. Para el análisis de las muestras, se utilizaron tres mezclas diferentes, previamente trituradas en estado sólido hasta su conversión en polvo. Las muestras se dividieron en tres para cada prueba: muestras mezcladas con alginato y AgNPs al 0,25 % en peso (grupo 0,25 % en peso), muestras mezcladas con alginato y AgNPs al 0,5 % en peso (grupo 0,5 % en peso) y muestras mezcladas con agua destilada y alginato (grupo control).

El análisis se realizó con un difractómetro de rayos X (Bruker modelo D8 Advance Da Vinci, fabricado en Karlsruhe, Alemania) con las siguientes condiciones de difracción:  $2\theta = 4-90^\circ$ , tamaño de paso  $0,02^\circ$ , tiempo/paso = 0,3 seg, con un tiempo de difracción de 21 minutos y una generación de Haz de 40 kV y 35 mA.

### 3. CAPITULO 3.

#### 3. RESULTADOS.

##### 3.1.2 MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN.

La Tabla 1 presenta la recuperación de la deformación, expresada como porcentaje, para alginatos dentales con diferentes concentraciones de AgNPs incorporadas. Se evaluaron dos alginatos dentales distintos: Cavex y ALGINoplast®.

Tabla 1. Recuperación de la deformación en porcentaje, de alginatos dentales incorporados con nanopartículas de plata.				
Concentration	Cavex	<i>p</i>	ALGINoplast®	<i>p</i>
Control	97.43 ± 0.59	Na	98.47 ± 0.31	Na
0.25 wt%	97.36 ± 0.42	0.9246	98.21 ± 0.40	0.1851
0.50 wt%	97.41 ± 0.48	0.9910	98.20 ± 0.30	0.1591
*Los datos se presentan como número (porcentaje), media ± DE y se analizaron mediante un ANOVA de una vía. Las diferencias significativas entre los grupos de control y de prueba se compararon con la prueba de Dunnett n = 10 para cada grupo.				
*Abreviaturas: wt% = porcentaje de peso.				

En el grupo control, tanto Cavex como ALGINoplast® mostraron altos porcentajes de recuperación: Cavex alcanzó el 97,43 ± 0,59 % y Alginoplast el 98,47 ± 0,31 %. Tras la incorporación de AgNPs en concentraciones de 0,25 % y 0,50 % en peso, se observaron ligeras variaciones en los porcentajes de recuperación. En el caso de Cavex, los porcentajes de recuperación fueron del 97,36 ± 0,42 % (*p* = 0,9246) y del 97,41 ± 0,48 % (*p* = 0,9910), a las respectivas concentraciones. De forma similar, ALGINoplast presentó porcentajes de recuperación del 98,21 ± 0,40 % (*p* = 0,1851) y del 98,20 ± 0,30 % (*p* = 0,1591) bajo las mismas concentraciones.

Estos hallazgos indican que la adición de AgNPs no afectó significativamente las propiedades de recuperación elástica de los materiales de alginato analizados.

Las variaciones marginales observadas parecen estar dentro del rango aceptable para estos materiales, lo que sugiere su posible idoneidad para aplicaciones dentales donde la recuperación de la deformación es un parámetro crítico. Se requieren análisis estadísticos adicionales para comprender mejor la importancia de estas diferencias.

### 3.1.3 RUGOSIDAD SUPERFICIAL.

Los valores de rugosidad superficial de los alginatos sin AgNPs fueron de 1360 nm para Cavex y de 1417 nm para ALGINoplast. Al añadir nanopartículas de plata a los alginatos, se observó un aumento en la rugosidad, tanto para los materiales como para las concentraciones de plata, pero sin una diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) en comparación con el grupo control para cada alginato (véase la Tabla 2).

Tabla 2. Rugosidad superficial de alginatos dentales ( $S_a$ , nm) con nanopartículas de plata incorporadas				
Concentración	Cavex	$p$	ALGINoplast®	$p$
Control	1360 ± 279.8	Na	1417 ± 251.3	Na
0.25 wt%	1480 ± 201.2	0.400	1653 ± 41	0.184
0.50 wt%	1664 ± 124.5	0.100	1842 ± 117.8	0.057
*Los datos se presentan como media ± DE y se analizaron mediante la prueba t para el grupo ALGINoplast y la prueba de Mann-Whitney para el grupo Cavex. *Abreviaturas: wt% = porcentaje de peso.				

En la Figura 3 se presentan imágenes representativas de microscopía de fuerza atómica 3D de cada grupo, como podemos observar, las muestras son homogéneas

en su superficie sin alteración visible debido a la presencia de nanopartículas de plata.

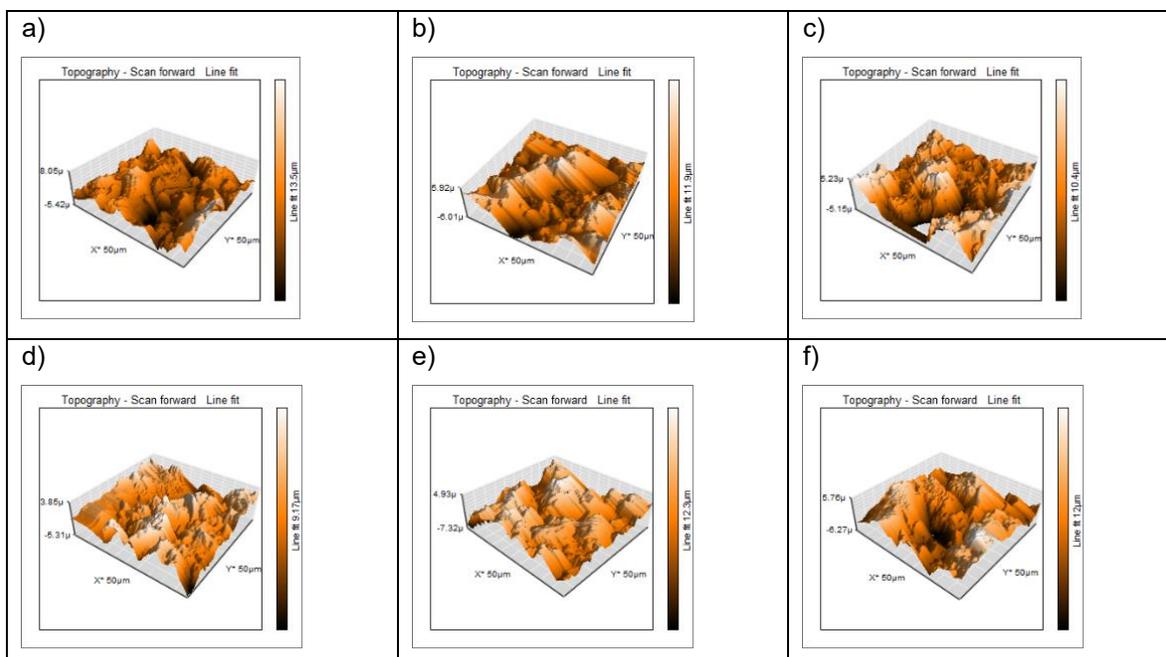
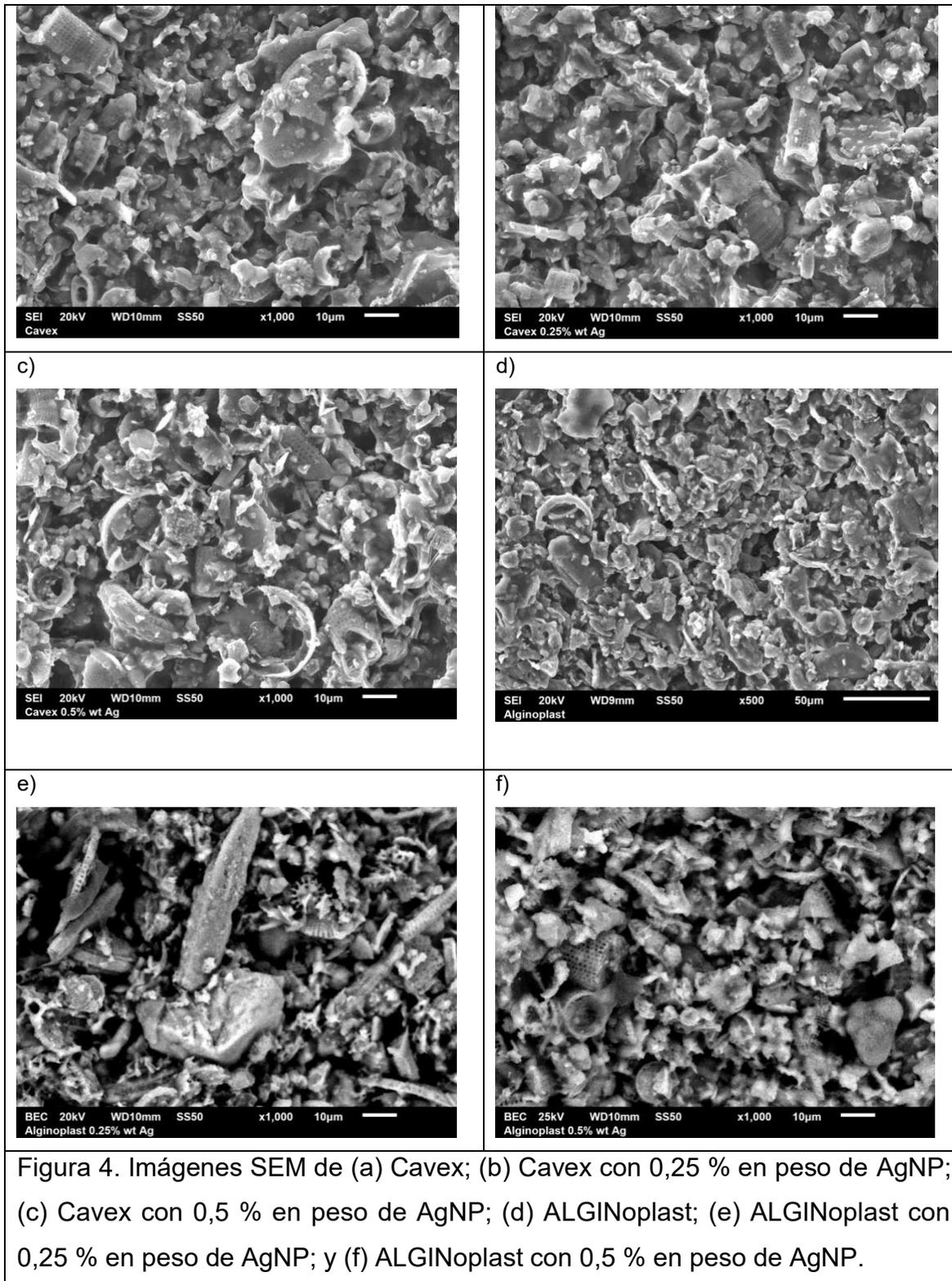


Figura 3. Imágenes de microscopía de fuerza atómica 3D de (a) Cavex; (b) Cavex con 0,25 % en peso de AgNPs; (c) Cavex con 0,5 % en peso de AgNP; (d) ALGINoplast; (e) ALGINoplast con 0,25 % en peso de AgNP; y (f) ALGINoplast con 0,5 % en peso de AgNP.

### 3.1.4 ANÁLISIS POR MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Las imágenes de SEM de las muestras con y sin nanopartículas de plata se presentan en la Figura 4. La fase inorgánica de los materiales se observa con diferentes tamaños y formas; la mayoría de las partículas son irregulares, pero también se encontraron partículas cilíndricas y esféricas con perforaciones a lo largo de su cuerpo; estas son morfologías típicas del relleno en alginatos dentales. No se observó la presencia de nanopartículas de plata, pero el análisis químico la demostró (Figura 4).

a)	b)
----	----



### 3.1.5 ACTIVIDAD ANTIMICROBIANA.

La Tabla 3 presenta la actividad antimicrobiana de los alginatos dentales con nanopartículas de plata incorporadas, expresada en mm. Los datos se presentan como valores medios acompañados de sus respectivas desviaciones estándar.

**Tabla 3.** Actividad antimicrobiana, en milímetros (mm), de hidrocoloides irreversibles con nanopartículas de plata incorporadas (media  $\pm$  DE).

Concentración	ALGINoplast®		Cavex			
	<i>E. Coli</i>	<i>S. Aureus</i>	<i>p</i>	<i>E. Coli</i>	<i>S. Aureus</i>	<i>p</i>
Control	10.00 $\pm$ 0.00	10.00 $\pm$ 0.00	NA	10.00 $\pm$ 0.00	10.00 $\pm$ 0.00	NA
0.25 wt%	10.52 $\pm$ 0.17	10.61 $\pm$ 0.20	<0.0001	10.03 $\pm$ 0.10	10.31 $\pm$ 0.19	<0.0001
0.50 wt%	10.54 $\pm$ 0.24	10.63 $\pm$ 0.31	<0.0001	10.21 $\pm$ 0.08	10.35 $\pm$ 0.14	<0.0001

\*Los datos se presentan como número (porcentaje) media  $\pm$  DE y se analizaron mediante un ANOVA de una vía. Las diferencias significativas entre los grupos de control y de prueba se compararon con la prueba de Dunnett. n = 10 para cada grupo.

\*Abreviaturas: wt% = porcentaje de peso.

Los mecanismos de acción de los materiales dentales sólidos se pueden clasificar en dos categorías: métodos de liberación de antimicrobianos y métodos de eliminación por contacto (superficies potenciadas y sustancias que no permiten la adhesión bacteriana). En este trabajo, los grupos control presentaron solo actividad de inhibición por contacto sin halo detectable más allá de los límites de los discos. Al incorporar nanopartículas de plata en concentraciones de 0,25 % en peso y 0,50 % en peso, se observó un aumento perceptible en la actividad antimicrobiana tanto para ALGINoplast® como para Cavex. Para ALGINoplast® contra *E. coli*, la actividad antimicrobiana media alcanzó 10,52  $\pm$  0,17 ( $p < 0,05$ ) y 10,54  $\pm$  0,24 ( $p < 0,05$ ) mm al 0,25 % en peso y al 0,50 % en peso, respectivamente. Se observaron tendencias similares contra *S. aureus*, con valores medios de 10,61  $\pm$  0,20 ( $p < 0,05$ ) y 10,63  $\pm$  0,31 ( $p < 0,05$ ) mm. El grupo Cavex mostró actividad antimicrobiana con valores medios de 10,03  $\pm$  0,087 y 10,21  $\pm$  0,08 ( $p < 0,05$ ) mm contra *E. coli* y 10,31

$\pm 0,14$  ( $p < 0,05$ ) y  $10,35 \pm 0,19$  ( $p < 0,05$ ) mm contra *S. aureus* al 0,25 % y 0,50 % en peso, respectivamente.

Estos resultados sugieren que la incorporación de nanopartículas de plata potencia la actividad antimicrobiana de ALGINoplast® y Cavex contra *E. coli* y *S. aureus*. Las variaciones observadas en la actividad antimicrobiana pueden atribuirse a las diferentes concentraciones de nanopartículas de plata, que podrían difundirse a través del agar y liberar iones de plata. Las zonas de inhibición (Figura 5) se midieron en cuatro direcciones y se registraron los valores promedio para cada disco [28].

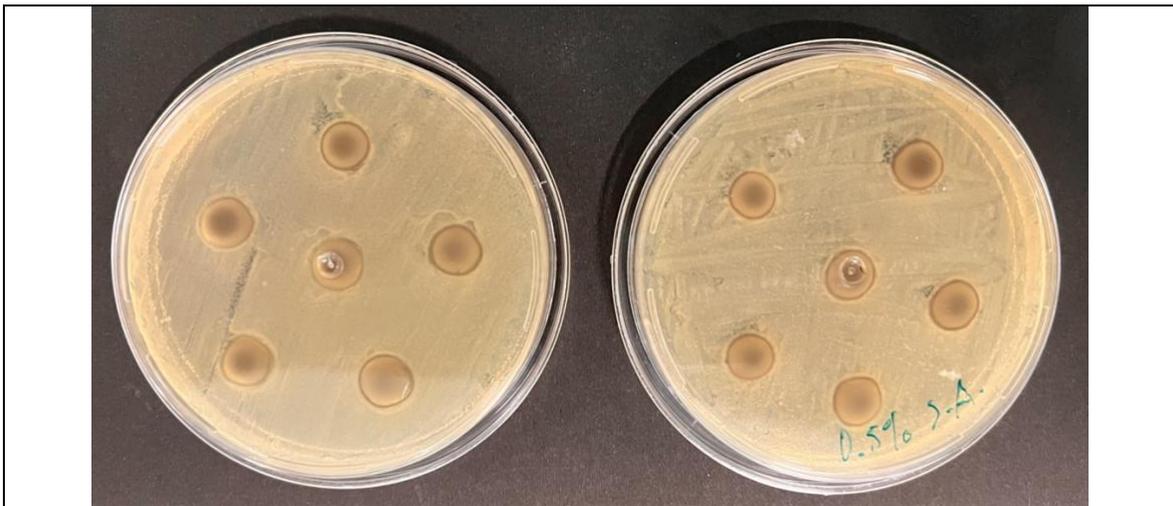


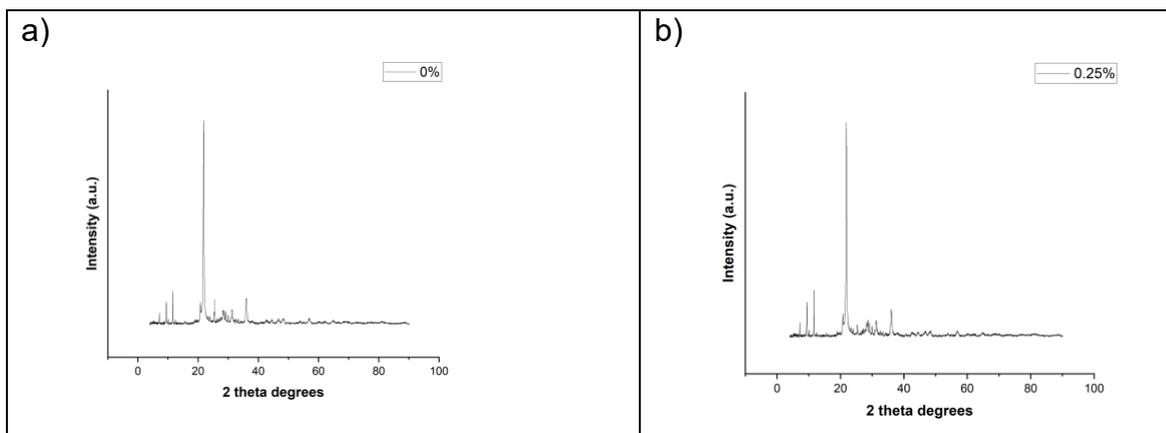
Figura 5. Medición del efecto antibacteriano de las muestras

### 3.1.6 DIFRACCIÓN DE RAYOS X.

Los resultados de la prueba de difracción revelaron un alto grado de similitud entre las tres muestras analizadas en el rango de 4 a 90° del difractómetro. Cabe destacar que la composición del alginato se mantuvo inalterada en todas las muestras.

La Figura 2 presenta los resultados de XRD del alginato Cavex Cream mezclado con AgNPs en concentraciones de 0 %, 0,25 % y 0,5 % en peso. El gráfico destaca la consistencia de la composición entre las muestras, lo que indica que no hay variaciones significativas entre las formulaciones analizadas.

Se detectaron los siguientes componentes en la composición del alginato Calvex (Figura 6a): cristobalita (syn); yeso, spencerita (syn); singenita (syn); hidrato de óxido de silicio y calcio (hidróxido), parahopeíta y ácido glutárico. En las muestras mezcladas con AgNPs (Figuras 6b y 6c), los componentes son los mismos con la adición de plata.



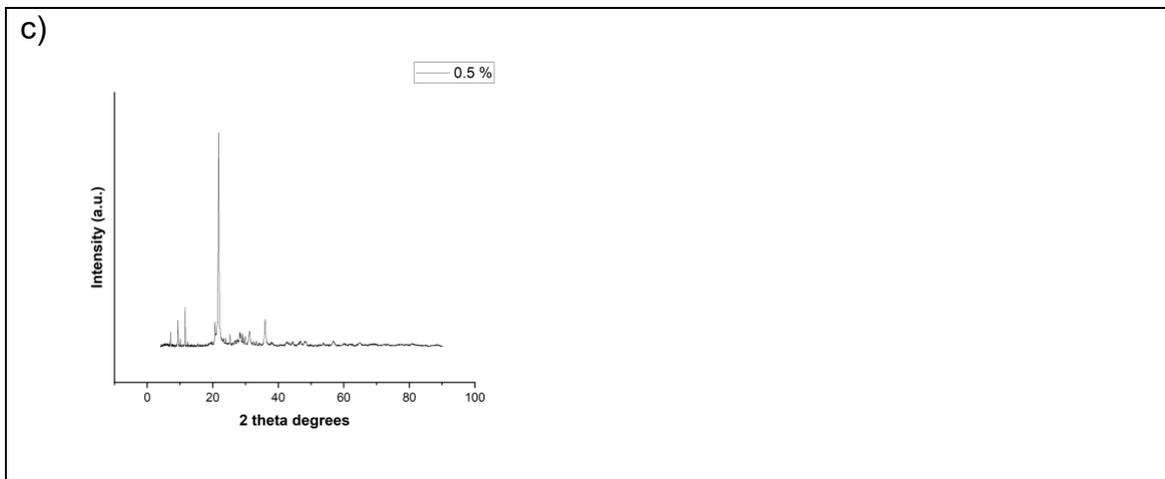


Figura 6. a) Patrón de difracción del alginato sin nanopartículas de plata. B) Patrón de difracción del alginato mezclado con nanopartículas de plata al 0,25 %. c) Patrón de difracción del alginato mezclado con nanopartículas de plata al 0,5 %

La prueba de difracción de rayos X realizada al alginato ALGINo-plast® con AgNPs al 0,25% y al 0,5% (Figuras 7 y 8) mostró los siguientes materiales en su composición: plata, cristobalita, yeso, spencerita, hidróxido de óxido de silicio y calcio hidratado, parahopeíta y ácido glutárico.

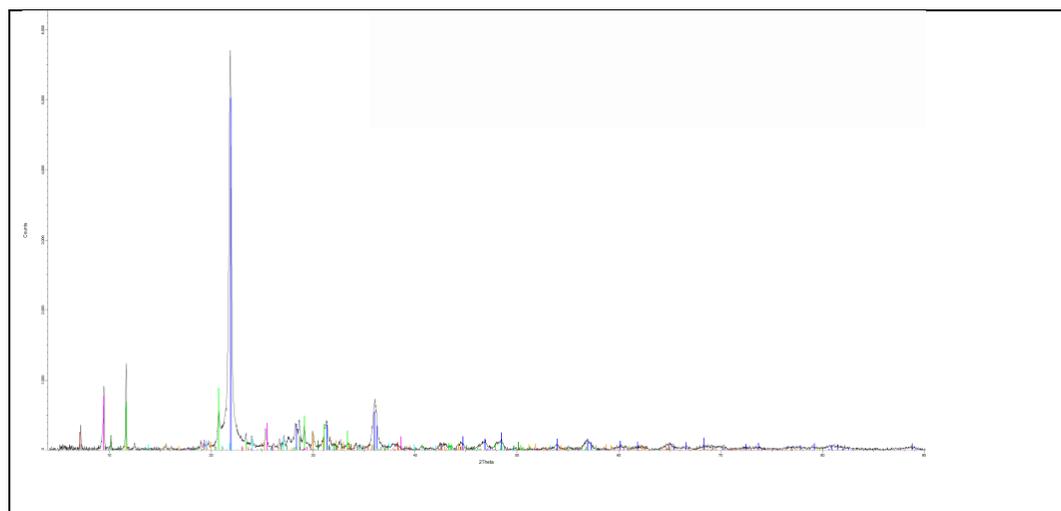
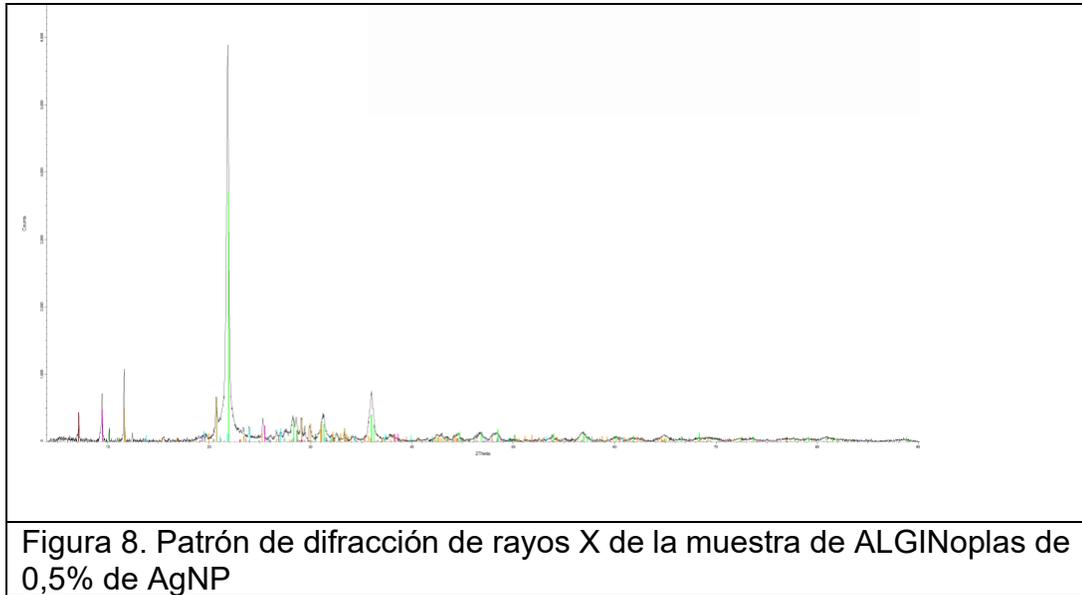


Figura 7. Ensayo de difracción de rayos X con la muestra ALGINoplas al 0,25% de AgNPs.



Los resultados indican que las AgNPs no experimentaron reacción química al mezclarse con el alginato. Además, la estructura del alginato se mantuvo inalterada, como lo demuestran las posiciones de pico consistentes observadas en el análisis de difracción, sin cambios significativos detectados entre ellas.

### 3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El análisis estadístico incluyó un componente descriptivo y uno analítico. La fase descriptiva evaluó las mediciones de deformación, la actividad antimicrobiana, la reproducción de detalles y otras características relevantes de las muestras de control y de prueba. Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía, y las diferencias significativas entre los grupos de control y de prueba se compararon con la prueba de Dunnett ( $p > 0,05$ ). El análisis estadístico se realizó con GraphPad Prism 9 versión 9.0.2 (134) para MacOs.

## 4. CAPÍTULO 4

### 4.1 DISCUSIÓN.

La saliva y la sangre se consideran los principales contaminantes de las impresiones dentales de alginato tomadas de pacientes, lo que representa un riesgo significativo de contaminación cruzada y transferencia de microorganismos infecciosos entre profesionales de la salud dental, incluyendo operadores, auxiliares y laboratorios dentales. Varios estudios han documentado la presencia de patógenos como *S. mutans* y *E. coli* en modelos de yeso, lo que puede contribuir a la aparición de infecciones dentales tanto en clínicas como en laboratorios. Este fenómeno subraya la importancia de implementar protocolos adecuados de desinfección y manipulación de materiales para minimizar el riesgo de transmisión de infecciones [29].

La estructura porosa de los alginatos dentales facilita la retención de microorganismos tanto en su superficie como dentro del material. Para que un alginato dental sea autodesinfectante, se impregna con un desinfectante, lo que permite la desinfección tanto interna como externa. Este enfoque supera las limitaciones de los desinfectantes que actúan exclusivamente sobre la superficie externa, con el objetivo de prevenir la supervivencia microbiana dentro de los poros del material de fraguado [30].

En este estudio, se incorporaron AgNPs de 5,57 nm a alginatos dentales en concentraciones molares de  $10^{-1}$ , específicamente al 0,25 y 0,50 % en peso. Este enfoque se basa en el trabajo de Ginjupalli et al. (2016), quienes utilizaron AgNPs con un tamaño de entre 80 y 100 nm en concentraciones de 0,5, 1, 2 y 5 % en peso. Los hallazgos de estos estudios indican que ni el tamaño ni la concentración de las nanopartículas afectan significativamente sus propiedades antibacterianas. Incluso a concentraciones más bajas de AgNP, se mantuvo la eficacia antimicrobiana. [31].

A diferencia de la metodología empleada por Omidkhoda et al. (2019), este estudio incorporó el método de contacto directo para evaluar la actividad antimicrobiana. Este enfoque se eligió específicamente en lugar de los métodos de difusión en disco o de pocillos de agar debido a su mayor aproximación a las condiciones clínicas [26].

El grado de gelificación y reticulación en el alginato desempeña un papel importante en la determinación de sus propiedades; el tamaño y la distribución de las nanopartículas incorporadas son críticos. La distribución mejora el refuerzo mecánico, mientras que la aglomeración puede reducir el volumen del material. Las interacciones químicas entre partículas pueden alterar la gelificación, lo que influye en la estabilidad general. [16] En este estudio, los grupos Alginoplast y Cavex no observaron defectos tras la deformación, lo que puede atribuirse a la correcta distribución de las AgNPs en el alginato. Es importante considerar que la humedad y la temperatura no pueden ser un factor controlable en la clínica dental; sin embargo, se intentó utilizar agua a 23 °C para simular la temperatura promedio del consultorio dental [32].

Al igual que la metodología empleada por Anastasiadou et al. (1996), en este estudio se utilizó la difracción de rayos X no solo para identificar los componentes del alginato, sino también para confirmar la presencia de AgNPs en la formulación preparada. Podemos afirmar que la presencia de AgNPs no se limita a la superficie del material, sino que también se distribuye internamente. Esta distribución interna proporciona un efecto bactericida superior contra las bacterias, lo que sugiere su potencial como agente antimicrobiano en alginatos dentales [16].

Los resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) permitieron visualizar diferencias morfológicas significativas entre las muestras de alginato con y sin AgNPs. En las imágenes SEM de las muestras con AgNPs se observaron partículas esféricas dispersas homogéneamente en la matriz polimérica, lo que sugiere una buena integración de las nanopartículas al material base. Este

hallazgo es consistente con estudios previos donde se reporta que el alginato puede actuar como un medio eficiente para la dispersión de nanopartículas metálicas debido a su naturaleza hidrofílica y su capacidad de formar geles estables [33].

Estos hallazgos resaltan el potencial de incorporar nanomateriales en materiales de impresión dental para mejorar su rendimiento y garantizar restauraciones dentales de alta calidad.

En comparación con la literatura existente, nuestro estudio representa un avance significativo en la aplicación de AgNPs en alginatos dentales. Mediante difracción de rayos X, hemos evidenciado la presencia de AgNPs tanto internas como externas en el material. Más importante aún, nuestros hallazgos indican que, a pesar de la gelificación del material al mezclarlo, esto no afecta sus propiedades físicas ni mecánicas.

## 5. CAPITULO 5

### 5. CONCLUSION

#### 5.1 CONCLUSIONES

La incorporación de nanopartículas de plata en ALGINoplast® y Cavex Cream Alginate mejora significativamente sus propiedades antimicrobianas, demostrando una notable eficacia contra microorganismos patógenos como *E. coli* y *S. aureus*. Esta mejora es crucial para garantizar la seguridad en los procedimientos dentales, especialmente en pacientes que utilizan prótesis o aparatos de ortodoncia.

Además, se destaca que estos biomateriales no alteran las propiedades físicas ni mecánicas del alginato dental, lo que los hace especialmente útiles en aplicaciones dentales. Estos resultados no solo ofrecen una posible solución para reducir la contaminación cruzada, sino que también abren la puerta a futuros ensayos clínicos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Vasiliu, S., Racovita, S., Gugoasa, I. A., Lungan, M., Popa, M., & Desbrieres, J. The Benefits of Smart Nanoparticles in Dental Applications. *Int J Mol Sci.* **2021**;22(5), 1–23. <https://doi.org/10.3390/ijms22052585>
2. Nassar, U., Aziz, T., Flores-Mir C. Dimensional stability of irreversible hydrocolloid impression materials as a function of pouring time: A systematic review. *Journal of Prosthetic Dentistry.* **2011.** 106(2),126–33. DOI: 10.1016/S0022-3913(11)60108-X
3. Cervino G., Fiorillo L., Herford A.S., Laino L., Troiano G., Amoroso G., et al. Alginate materials and dental impression technique: A current state of the art and application to dental practice. *Mar Drugs.* **2019**;17,1–15. DOI: 10.3390/md17010018.
4. Murata, H., Kawamura, M., Hamada, T., Chimori, H., & Nikawa, H. Physical properties and compatibility with dental stones of current alginate impression materials. *Journal of oral rehabilitation.* **2004.** 31(11), 1115-1122.
5. Abdelraouf, R. M. Chemical analysis and microstructure examination of extended-pour alginate impression versus conventional one (characterization of dental extended-pour alginate). *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials.* **2018.** 67(10), 612-618.
6. Kilian, M., Chapple, I. L. C., Hannig, M., Marsh, P. D., Meuric, V., Pedersen, A. M. L., et al. The oral microbiome—an update for oral healthcare professionals. *British dental journal.* **2016** 221(10), 657-666. DOI: 10.1038/sj.bdj.2016.865
7. Luo, S. C., Wei, S. M., Luo, X. T., Yang, Q. Q., Wong, K. H., Cheung, P. C., & Zhang, B. B. How probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics prevent dental caries: An oral microbiota perspective. *npj Biofilms and Microbiomes.* **2024**;10(1), 14. DOI: 10.1038/s41522-024-00488-7
8. Demajo, J. K., Cassar, V., Farrugia, C., Millan-Sango, D., Sammut, C., Valdramidis, V., & Camilleri, J. Effectiveness of disinfectants on antimicrobial and physical properties of dental impression materials. *The International journal of prosthodontics,* **2016**,29(1), 63-67. DOI: 10.11607/ijp.4358
9. Qiu, Y., Xu, J., Xu, Y., Shi, Z., Wang, Y., Zhang, L., & Fu, B. Disinfection efficacy of sodium hypochlorite and glutaraldehyde and their effects on the dimensional stability and surface properties of dental impressions: a systematic review. *PeerJ.* **2023**,11, e14868. DOI: 10.7717/peerj.14868

10. Nia, A., Ataei, M., Zeighami, H. A comparative study on the antimicrobial activity of irreversible hydrocolloid mixed with silver nanoparticles and chlorhexidine. *Dent Res J (Isfahan)*. **2020**;17(2):120. PMID: PMC7224260
11. Singer, L., & Bourauel, C. Mechanical and physical properties of an experimental chemically and green-nano improved dental alginate after proven antimicrobial potentials. *Gels*. **2023**;9(5), 429. DOI: 10.3390/gels9050429
12. Grădinaru, I., Ciubotaru, B. I., Dascălu, M., Bargan, A., & Vasiliu, A. L. Alginate Dental Impression Materials with Allantoin Enrichment: A Morphology, Dynamic Vapor Sorption And Swelling Evaluation. In *2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)* **2022**, 1-4.
13. Omidkhoda, M., Hasanzadeh, N., Soleimani, F., & Shafaei, H. Antimicrobial and physical properties of alginate impression material incorporated with silver nanoparticles. *Dental Research Journal*. **2019**,16(6), 372-376. PMID: PMC6873245
14. Wang, J., Wan, Q., Chao, Y., & Chen, Y. A self-disinfecting irreversible hydrocolloid impression material mixed with chlorhexidine solution. *The Angle Orthodontist*. **2007**,77(5), 894-900. DOI: 10.2319/070606-277
15. Beuter, L., Bourauel, C., & Singer, L. Assessing the impact of an environmentally friendly approach on irreversible dental hydrocolloid performance. *Scientific Reports*. **2024**,14(1), 1-13. DOI: 10.1038/s41598-024-83035-w
16. Singer, L., Beuter, L., Karacic, S., Bierbaum, G., Karacic, J., & Bourauel, C. Enhancing dental alginate with *Syzygium aromaticum*, *Zingiber officinale* and green silver nanoparticles: A nature-enhanced approach for superior infection control. *Gels*. **2024**,10(9), 600. DOI: 10.3390/gels10090600
17. Liu, S., Phillips, S., Northrup, S., & Levi, N. The Impact of Silver Nanoparticle-Induced Photothermal Therapy and Its Augmentation of Hyperthermia on Breast Cancer Cells Harboring Intracellular Bacteria. *Pharmaceutics*. **2023**. 15(10), 2466. DOI: 10.3390/pharmaceutics15102466.
18. Noronha, V. T., Paula, A. J., Durán, G., Galembeck, A., Cogo-Müller, K., Franz-Montan, M., & Durán, N. Silver nanoparticles in dentistry. *Dental Materials*. **2017**,33(10), 1110-1126. DOI: 10.1016/j.dental.2017.07.002
19. Navarrete-Olvera, K.; Niño-Martínez, N.; De Alba-Montero, I.; Patiño-Marín, N.; Ruiz, F.; Bach, H.; Martínez-Castañón, G.-A. The Push-Out Bond Strength, Surface Roughness, and Antimicrobial Properties of Endodontic Bioceramic Sealers Supplemented with Silver Nanoparticles. *Molecules*. **2024**, 29, 4422.

20. Tristán-López, J. D., Niño-Martínez, N., Kolosovas-Machuca, E. S., Patiño-Marín, N., De Alba-Montero, I., Bach, H., & Martínez-Castañón, G. A. Application of silver nanoparticles to improve the antibacterial activity of orthodontic adhesives: an in vitro study. *International Journal of Molecular Sciences*. **2023**, 24(2), 1401.
21. Choure, R., Yadav, N. S., Somkuwar, K., Saxena, V., Tiwari, R., & Bhatia, R. Comparative Assessment of Flexural Strength in Heat-cured Polymethyl Methacrylate Resin Reinforced with Silver Nanoparticles, Siwak, and Fluconazole: An In-vitro Study. *Journal of Clinical & Diagnostic Research*. **2024**, 18(3).
22. Niyazi, A. A., Alabrash, M. A., Elzouhry, M. S., AlFarra, R. M., Althubayani, N. M., Huraib, W. M., ... & Pullishery, F. Comparative Analysis of Alginate Dimensional Stability with Varied Pouring Intervals. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, **2024**, 16(Suppl 5), S4599-S4603.
23. Council on Dental Materials, Instruments, and Equipment. American National Standard/American Dental Association (ANSI/ADA), Specification No. 18, Alginate Impression Materials 1992; American Dental Association: Chicago, IL, USA, 1992.
24. ISO 21563:2021; Dentistry—Test Method for Alginate Impression Materials. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021.
25. Lemon, J. C., Okay, D. J., Powers, J. M., Martin, J. W., & Chambers, M. S. Facial moulage: the effect of a retarder on compressive strength and working and setting times of irreversible hydrocolloid impression material. *The Journal of prosthetic dentistry*. **2003**, 90(3), 276-281. DOI: 10.1016/s0022-3913(03)00366-4
26. Ginjupalli, K., Alla, R. K., Tellapragada, C., Gupta, L., & Perampalli, N. U. Antimicrobial activity and properties of irreversible hydrocolloid impression materials incorporated with silver nanoparticles. *The Journal of prosthetic dentistry*. **2016**, 115(6), 722-728. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.11.006
27. Singer, L., Karacic, S., Szekat, C., Bierbaum, G., & Bourauel, C. Biological properties of experimental dental alginate modified for self-disinfection using green nanotechnology. *Clinical Oral Investigations*. **2023**, 27(11), 6677-6688. DOI: 10.1007/s00784-023-05277-8.
28. Bunaciu, A. A., UdriŞtioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*. **2015**, 45(4), 289-299. DOI: 10.1080/10408347.2014.949616.

29. Anastassiadou, V., Dolopoulou, V., & Kaloyannides, A. X-ray diffraction study of crystalline phases of calcium sulphate in alginate impression materials. *European Journal of Oral Sciences*. **1996**,104(5-6), 637-640. DOI: 10.1111/j.1600-0722.1996.tb00156.x.
30. Egusa, H., Watamoto, T., Abe, K., Kobayashi, M., Kaneda, Y., Ashida, S. & Yatani, H. An analysis of the persistent presence of opportunistic pathogens on patient-derived dental impressions and gypsum casts. *International Journal of Prosthodontics*. **2008**,21(1).
31. Rajendran, V., Suma, K., Ali, S. A., Karthigeyan, R., & Kalarani, G. Antimicrobial efficacy of irreversible hydrocolloid impression impregnated with silver nanoparticles compared to surface disinfected impressions-an in vivo study. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*. **2021**. 13(Suppl 1), S532-S536.
32. Farzin, M., & Panahandeh, H. Effect of pouring time and storage temperature on dimensional stability of casts made from irreversible hydrocolloid. *Journal of Dentistry (Tehran, Iran)*, **2010**. 7(4), 179.
33. Guiraldo, R. D., Berger, S. B., Consani, R. L. X., Consani, S., de Carvalho, R. V., Lopes, M. B., ... & Sinhorette, M. A. C. Characterization of morphology and composition of inorganic fillers in dental alginates. *BioMed. 2014 Research International*, 2014(1), 178064.

# ANEXOS

## ANEXO 1. ARTÍCULO

Article

# Evaluation of Deformation and Antibacterial Properties of Dental Alginates Mixed with Silver Nanoparticles

Mario A. Rivera-Cortés <sup>1</sup>, Nereyda Niño-Martínez <sup>2,\*</sup>, Facundo Ruiz <sup>2</sup>, Brianda Karina Félix-Sicaños <sup>3</sup> and Gabriel-Alejandro Martínez-Castañón <sup>4,\*</sup>

<sup>1</sup> Doctorado Institucional en Ingeniería y Ciencia de los Materiales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Sierra Leona No. 550, Col. Lomas 2da. Sección, San Luis Potosí C.P. 78210, Mexico; m\_rivec@hotmail.com

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Parque Chapultepec No. 1570, Privadas del Pedregal, San Luis Potosí C.P. 78295, Mexico; facundo@ciencias.uaslp.mx

<sup>3</sup> Doctorado en Ciencias Biomédicas Básicas, Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Sierra Leona No. 550, Col. Lomas 2da. Sección, San Luis Potosí C.P. 78210, Mexico; dra.briandafelix@gmail.com

<sup>4</sup> Facultad de Estomatología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava No. 2, Zona Universitaria, San Luis Potosí C.P. 78290, Mexico

\* Correspondence: nereyda.nino@uaslp.mx (N.N.-M.); mtzcastanon@ciencias.uaslp.mx (G.-A.M.-C.)

**Abstract:** This study aimed to evaluate the effect of the incorporation of silver nanoparticles (AgNPs) of 5.57 nm size into dental alginates on their deformation and antimicrobial properties. Six experimental groups were prepared: 2 different alginates with 0.25 wt% AgNPs, 2 different alginates with 0.5 wt% AgNPs (5.57 nm), and 2 unmodified control alginate groups. The presence of AgNPs was confirmed using X-ray diffraction analysis with a Bruker D8 Advance diffractometer. Antimicrobial activity was evaluated using the Kirby-Bauer disk diffusion method (direct contact) against *E. coli* and *S. aureus* cultures incubated on Mueller–Hinton (M-H) agar at 37 °C for 24 h. The results demonstrated that the addition of 0.25% and 0.5% AgNPs significantly enhanced the antimicrobial properties of alginate ( $p < 0.05$ ), showing clear inhibition zones against the tested microorganisms. In terms of mechanical properties, AgNPs-modified samples exhibited improved elastic recovery compared to the control group ( $p > 0.05$ ). These findings suggest that incorporating silver nanoparticles into alginates could enhance their antimicrobial properties without compromising the mechanical integrity required for dental applications.

**Keywords:** biomaterials; alginate; silver nanoparticles; deformation and antimicrobial activity

Academic Editor: Bongju Kim

Received: 19 March 2025

Revised: 21 April 2025

Accepted: 24 April 2025

Published: 30 April 2025

**Citation:** Rivera-Cortés, M.A.; Niño-Martínez, N.; Ruiz, F.; Félix-Sicaños, B.K.; Martínez-Castañón, G.-A.

Evaluation of Deformation and Antibacterial Properties of Dental Alginates Mixed with Silver Nanoparticles. *Materials* **2025**, *18*, 2069. <https://doi.org/10.3390/ma18092069>

**Copyright:** © 2025 by the author. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Dental alginates were developed almost a century ago; they are still under continuous evolution and are used regularly in most dental offices to make diagnostic and digital models [1]. Alginate is characterized by its low cost in the market, and it behaves better when compared to other impression materials [2]. The impression obtained with alginates at the first dental consultation is important because it generates the initial evaluation of the patient's oral health status [3]. Alginates for dental impressions are salts of alginic acid, a polysaccharide extracted from the cell walls of algae. Alginic acid is then converted into a salt (alginate) of sodium, potassium, or magnesium. Although alginate is insoluble in water, its alkaline salts are soluble in water, and therefore, it is used in dentistry [1,3]. Cross-infection is one of the main concerns when using alginates to produce stone models;

the aim of this work was to determine whether the addition of silver nanoparticles to alginates could provide them with antibacterial properties without affecting their deformation. We did not consider the complete characterization of the alginates because the properties of these materials have already been reported elsewhere. For ALGINoplast®, their dynamic viscosity is reported as 90 Pa·s, the gelation time is 128.5 s, and the compressive strength of 0.82 MPa, and the gelation time for Cavex Cream is 126.5 s [4,5].

The oral cavity contains more than 1591 microbial species, including bacteria, fungi, archaea, viruses, and protozoa, colonizing the hard and soft surfaces of the mouth cavity, among which dental organs and adjacent tissues are found [6,7]. Inadequate disinfection and the lack of correct implementation of protocols result in an unsafe environment. *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Acinetobacter*, *Streptococcus*, and *Candida albicans* are common in patients with prosthetic dental appliances or orthodontic appliances [8,9]. Pathogenic microorganisms cannot only be accommodated on the surface of the material but also within it, due to the hydrophilic nature of the alginate. Currently, research has shown that many impressions have been sent to laboratories without being subjected to any type of disinfection [10,11]. In addition, blood and saliva from the mouth are common oral fluids that contaminate materials [12]. The procedure of rinsing dental impressions with water before sending them to the laboratory removes waste but does not disinfect them, being an inadequate procedure for actual disinfections [10]. Spray and immersion are currently the most widely used methods to disinfect impressions; however, they require more time and cause negative effects related to the mechanical properties of the alginate [13,14]. Disinfectants applied after setting may not effectively penetrate all areas [15]. Dental alginate is prone to contamination due to its hydrophilic nature and porous structure that facilitate the penetration of microorganisms [16].

Silver nanoparticles are used clinically as FDA-approved antibacterial agents [17]. Silver nanoparticles (AgNPs) contain antimicrobial properties and are very applicable in dentistry involving dental prosthesis, adhesives, and implants [18]. In recent years, the incorporation of silver nanoparticles (AgNPs) into clinical dental materials has garnered increasing attention due to their well-documented antimicrobial properties. Several studies have reported that the addition of AgNPs to orthodontic adhesives, endodontic bioceramic sealers, and polymethylmethacrylate (PMMA) significantly reduces microbial load in the oral environment. This functionalization not only enhances the clinical performance of the materials but also improves the therapeutic efficacy of the treatments in which they are applied, favoring a better prognosis and increased longevity of dental procedures. The use of this nanotechnology represents a promising advancement toward optimizing biosafety in contemporary dental practice [19–21]. Its small size, large surface area, and unique physicochemical properties make it effective against a broad spectrum of bacteria, viruses, and fungi [18]. Thus, the aim of this work is to evaluate the deformation and antimicrobial properties of two commercial alginates mixed with silver nanoparticles (5.57 nm). The hypothesis was that incorporation of silver nanoparticles into dental alginates would provide antimicrobial activity to the materials without significantly affecting their mechanical performance.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Materials

For this in vitro study, six groups were formed, each consisting of ten samples ( $n = 10$ ). Two commercial brands of alginate were compared: Cavex Cream © (Cavex Holland BV, Haarlem, The Netherlands) and ALGINoplast® (Heraeus Kulzer, Hanau, Germany). The groups were organized as follows:

Group 1: ALGINoplast + distilled water without nanoparticles.

Group 2: ALGINoplast + distilled water and AgNPs 0.25 wt%.

- Group 3: ALGINoplast + distilled water and AgNPs 0.5 wt%.
- Group 4: Cavex cream + distilled water without nanoparticles.
- Group 5: Cavex cream + distilled water and AgNPs 0.25 wt%.
- Group 6: Cavex cream + distilled water and AgNPs 0.5 wt%.

## 2.2. Silver Nanoparticles and Preparation of Samples

The AgNPs used in this work were prepared using a chemical precipitation method with gallic acid as reducing and stabilizing agent; AgNPs showed a spherical morphology with a diameter of 5.57 nm (measured with TEM). DLS analysis showed a hydrodynamic diameter of 5.6 nm with a surface plasmon resonance maximum at 405 nm, confirming their identity. A zeta potential of  $-36$  mV was found with a polydispersity index of 24.36%; this characterization is presented in full by Navarrete-Olvera et al. [19].

For the control groups (1 and 4), pure distilled water was used for alginate preparation without any additives. For 0.25 wt% AgNPs groups (2 and 5), 2.3 g of alginate powder was combined with 4.3 mL distilled water and 0.625 mL AgNPs (1070 ppm). For 0.50 wt% AgNPs groups (3 and 6), 2.3 g of alginate powder was mixed with 3.75 mL distilled water and 1.25 mL of AgNPs (1070 ppm). Both Cavex cream and ALGINoplast® require immediate pouring to maintain their dimensional stability [22].

## 2.3. Measurement of Deformation

The preparation of test and control samples was conducted following the protocol outlined in the ADA specification no. 18 [23] and ISO: 21563:2021 [24] using a master die. The specimens were created by placing a ring (3 cm inside diameter, 16 mm high) on a flat glass plate and filling the ring slightly more than halfway with either dental alginate (control group) or modified (test group).

A metal mold (12.7 mm inside diameter, 25.4 mm outside diameter, 19.2 mm high) was then placed inside the ring and pressed into the material until it contacted the glass plate, allowing the excess material to exude to the top mold. A solid brass plate was positioned on the upper surface of the ring to remove any surplus material. The prepared specimen was transferred to a deformation apparatus, where a lightweight plate (15 × 15 mm in size and 2 mm thick) was placed on the specimen. The foot of a dial indicator was then brought into contact with the plate to measure deformation [25].

The test was carried out in accordance with the following time schedule, where  $t$  was the initial setting time: (a)  $t + 45$  s—the spindle of the dial indicator was lowered so that it came into contact with the plate on the specimen; (b)  $t + 55$  s—the dial indicator was read, the value was recorded as the initial reading, and the spindle was fixed in the “up” position; (c)  $t + 60$  s—the specimen was deformed to a height of 16 mm ± 0.1 mm within 1 s, and this deformation was maintained for 5 s ± 0.5 s, then released; (d)  $t + 90$  s—the spindle of the dial indicator was lowered so that it came into contact with the plate on the specimen; (e)  $t + 100$  s the dial indicator was read, and the value was recorded.

The elastic recovery was calculated as a percentage using the following formula from ANSI/ADA specification no. 18 for irreversible hydrocolloid impression material [23,25]:

$$\left(1 - \frac{a - b}{16}\right) \quad (1)$$

where the constant 16 was the length of the mold in millimeters. All tests were designed in accordance with ANSI/ADA specification no. 18 for irreversible hydrocolloid impression material [23,25].

The deformation specimens were prepared in a similar manner to the other specimens, and each section was placed on the metal slab of the Universal Testing Machine (Multitest 1-d, Mecmesin, Horsham, UK) and tested for compressive strength. The

specimens were loaded continuously and as uniformly as possible to produce an average rate of 100 N/min  $\pm$  20 N/min until the point of yield.

#### 2.4. Surface Roughness Analysis

Measurements for surface roughness were obtained from three different points in the samples using atomic force microscopy (AFM) (Nanosurf Easy Scan 2, SPM Electronics, Liestal, Switzerland) in contact mode with a silicon nitride (SiN) scanning rate of 49.5  $\mu\text{m/s}$ . The values used for the short cantilever were spring constant 0.1 N/m, resonant frequency 28 kHz, length 225  $\mu\text{m}$ , mean width 28  $\mu\text{m}$ , thickness 1  $\mu\text{m}$ , tip height 14  $\mu\text{m}$ , and radius <10 nm. A calibration grid of silicon oxide on a silicon substrate (Nanosurf AG, CH-4410, SPM Electronics, Liestal, Switzerland) with XY periodicity of 10  $\mu\text{m}$  and a Z height of 119 nm was used to calibrate the instrument before the evaluation. The Nanosurf Easy Scan 2 software (version 1.6) was used to measure the AFM parameters. The surface roughness was quantified using roughness average ( $S_a$ ), which represents the arithmetical mean of the absolute values of the scanned surface profile.

#### 2.5. Scanning Electron Microscopy

Samples with and without silver nanoparticles were imaged using scanning electron microscopy. Disks of each sample were prepared and allowed to dry under room conditions; after that, samples were carbon-coated and analyzed using a JEOL JSM-6610 (JEOL Ltd., Tokyo, Japan) at 25 kV. Chemical analysis was performed using an EDS analyzer attached to the microscope.

#### 2.6. Measurement of Antibacterial Effect

Alginate disks impregnated with AgNPs (0.25 and 0.5 wt%) were prepared to assess their antimicrobial activity. The samples were standardized in terms of dimensions, with a diameter of 10 mm and a thickness of 2 mm. Six experimental groups were established, each consisting of 10 discs, resulting in a total of 120 specimens. Each group was inoculated with specific bacterial strains to evaluate the interaction between the alginate discs with AgNPs and the selected bacteria. The disks were placed on Mueller–Hinton (M-H) agar plates inoculated with lawn cultures of *Escherichia coli* (ATCC 25922) and *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923) and incubated at 37 °C for 24 h [24]. The bacterial inoculum was prepared using the McFarland standard (0.5), corresponding to a concentration of 10<sup>8</sup> CFU/mL. After 24 h of incubation, the diameter of the growth inhibition zones was measured in millimeters.

#### 2.7. X-Ray Diffraction

X-ray diffraction has now become a standard technique for investigating and analyzing the properties of crystalline materials. Its non-destructive nature allows for the preservation of sample integrity, making it suitable for a wide range of scientific and industrial applications. Through XRD, a deeper understanding of material properties can be achieved, which is essential for advancing technological innovations and improving material performance in various applications [26]. The results obtained from the diffractograms indicate the presence or absence of specific materials [27].

To corroborate the presence of silver nanoparticles in the alginate, the X-ray diffraction test was carried out, which consists of analyzing the composition of a material and its components, in this case, the alginate; for the analysis of the samples, three different mixtures previously crushed in solid form were used until they were turned into powder; the specimens were divided into three for each test: specimens mixed with alginate and silver nanoparticles 0.25 wt% (0.25 wt% group), specimens mixed with alginate and silver

nanoparticles 0.5 wt% (0.5 wt% group), and specimens mixed with distilled water and alginate (control group).

The analysis was performed using an X-ray diffractometer (Bruker model D8 Advance Da Vinci made in Karlsruhe, Germany) with the following diffracted conditions:  $2\theta = 4\text{--}90^\circ$ , step size  $0.02^\circ$ , time/step = 0.3 seg, with a time of diffracted of 21 min and the Haz generation = 40 kV 35 mA.

### 2.8. Statistical Analysis

Statistical analysis comprised both descriptive and analytical components. The descriptive phase evaluated deformation measurements, antimicrobial activity, detailed reproduction, and other relevant characteristics of the control and test specimens. Data were analyzed using 1-way ANOVA, and significant differences between the control and test groups were compared with the Dunnett test ( $p > 0.05$ ). Statistical analysis was performed using GraphPad Prism 9 version 9.0.2 (134) for MacOs.

## 3. Results

### 3.1. Measurement of Deformation

Table 1 presents the recovery from deformation, expressed as a percentage, for dental alginates incorporated with different concentrations of silver nanoparticles. Two distinct dental alginates were evaluated: Cavex Cream (© Cavex Holland BV, Haarlem, The Netherlands) and ALGINoplast® (Heraeus Kulzer, Hanau, Germany).

**Table 1.** Recovery from deformation, in percentage of dental alginates incorporated with silver nanoparticles.

Concentration	Cavex	<i>p</i>	ALGINoplast®	<i>p</i>
Control	97.43 ± 0.59	Na	98.47 ± 0.31	Na
0.25 wt%	97.36 ± 0.42	0.9246	98.21 ± 0.40	0.1851
0.50 wt%	97.41 ± 0.48	0.9910	98.20 ± 0.30	0.1591

Data are presented as number (percentage) mean ± SD and analyzed using a with 1-way ANOVA, and significant differences between the control and test groups were compared with the Dunnett test.  $n = 10$  for each group. Abbreviations: wt% = weight percentage.

In the control group, both Cavex and ALGINoplast® demonstrated high recovery percentages, with Cavex achieving  $97.43 \pm 0.59\%$  and ALGINoplast  $98.47 \pm 0.31\%$ . Upon the incorporation of silver nanoparticles (AgNPs) at concentrations of 0.25 wt% and 0.50 wt%, slight variations in recovery percentages were observed. For Cavex, the recovery percentages were  $97.36 \pm 0.42\%$  ( $p = 0.9246$ ) and  $97.41 \pm 0.48\%$  ( $p = 0.9910$ ), at the respective concentrations. Similarly, ALGINoplast exhibited recovery percentages of  $98.21 \pm 0.40\%$  ( $p = 0.1851$ ) and  $98.20 \pm 0.30\%$  ( $p = 0.1591$ ) under the same concentrations. These findings indicate that the addition of AgNPs did not significantly affect the elastic recovery properties of the tested alginate materials.

The marginal variations observed appear to fall within the acceptable range for these materials, suggesting their potential suitability for dental applications, where recovery from deformation is a critical parameter. Further statistical analyses are warranted to provide deeper insights into the significance of these differences.

### 3.2. Surface Roughness

The surface roughness values of the alginates without AgNPs are 1360 nm for Cavex and 1417 nm for ALGINoplast; when silver nanoparticles were added to the alginates, there were an increment in the roughness for both the materials and the silver

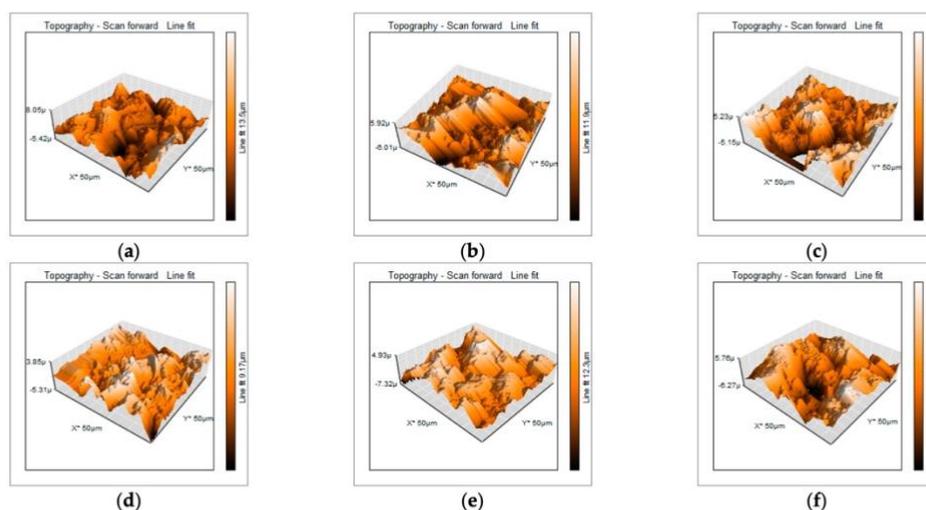
concentrations but without a significant difference ( $p > 0.05$ ) when compared with the control group for each alginate, see Table 2.

**Table 2.** Surface roughness ( $S_a$ , nm) of dental alginates incorporated with silver nanoparticles.

Concentration	Cavex (nm)	$p$	ALGINoplast (nm)	$p$
Control	1360 ± 279.8	-	1417 ± 251.3	-
0.25 wt%	1480 ± 201.2	0.400	1653 ± 41	0.184
0.50 wt%	1664 ± 124.5	0.100	1842 ± 117.8	0.057

Data are presented as mean ± SD and were analyzed using t test for the ALGINoplast group and Mann–Whitney for the Cavex group. Abbreviations: wt% = weight percentage.

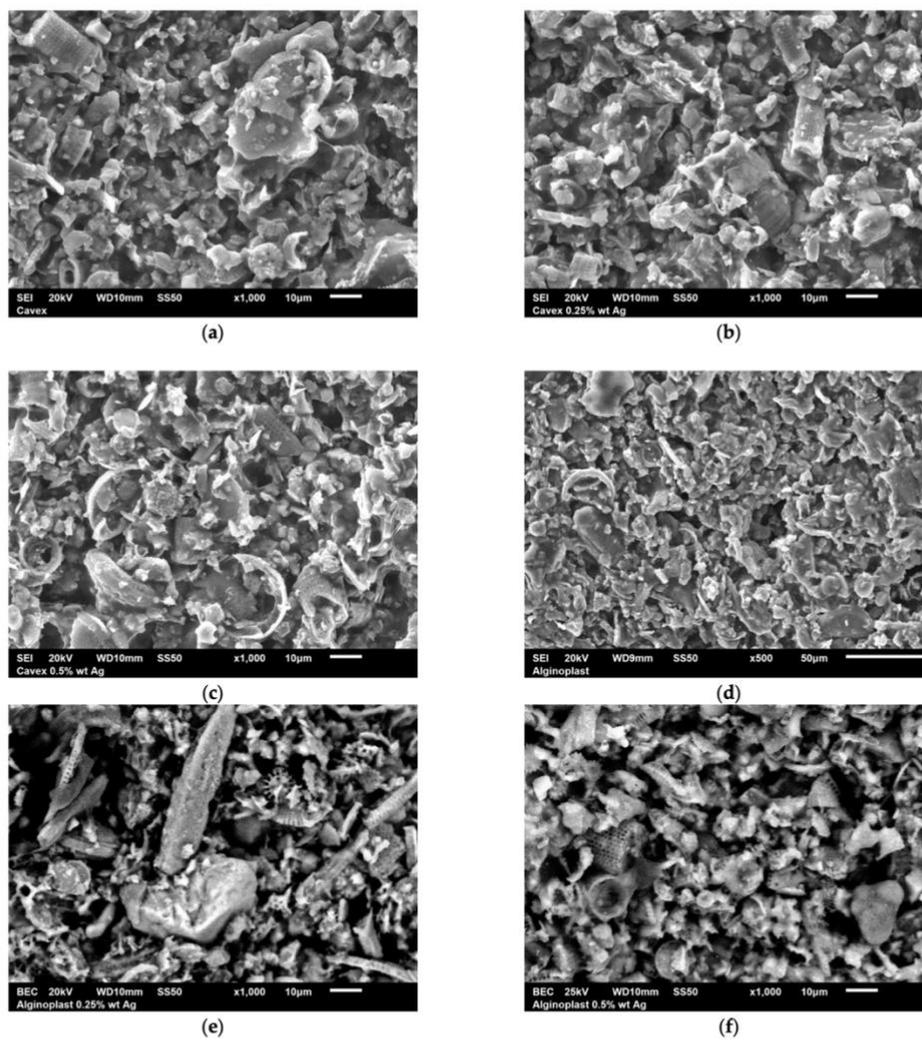
Representative 3D atomic force microscopy images of each group are presented in Figure 1; as we can see, samples are homogeneous in their surface with no visible alteration due to the presence of silver nanoparticles.



**Figure 1.** 3D atomic force microscopy images of (a) Cavex; (b) Cavex with 0.25 wt% AgNPs; (c) Cavex with 0.5 wt% AgNPs; (d) ALGINoplast; (e) ALGINoplast with 0.25 wt% AgNPs; and (f) ALGINoplast with 0.5 wt% AgNPs.

### 3.3. Scanning Electron Microscope Analysis

SEM images of the samples with and without silver nanoparticles are presented in Figure 2. The inorganic phase of the materials can be observed with different sizes and shapes; most of the particles are irregular, but we also found cylindrical and spherical particles with perforations along their body; these are typical morphologies for filler in dental alginates. The presence of silver nanoparticles could not be observed, but the chemical analysis demonstrated the presence of silver nanoparticles (Figure S1).



**Figure 2.** SEM images of (a) Cavex; (b) Cavex with 0.25 wt% AgNPs; (c) Cavex with 0.5 wt% AgNPs; (d) ALGINoplast; (e) ALGINoplast with 0.25 wt% AgNPs; and (f) ALGINoplast with 0.5 wt% AgNPs.

#### 3.4. Antimicrobial Activity

Table 3 presents the antimicrobial activity of dental alginates incorporated with silver nanoparticles, expressed in mm. The data are reported as mean values accompanied by their respective standard deviations.

**Table 3.** Antimicrobial activity, in millimeters (mm), of irreversible hydrocolloids incorporated with silver nanoparticles (mean  $\pm$  SD).

Concentration	ALGINoplast®			Cavex		
	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>p</i>	<i>E. coli</i>	<i>S. aureus</i>	<i>p</i>
Control	10.00 $\pm$ 0.00	10.00 $\pm$ 0.00	NA	10.00 $\pm$ 0.00	10.00 $\pm$ 0.00	NA
0.25 wt%	10.52 $\pm$ 0.17	10.61 $\pm$ 0.20	<0.0001	10.03 $\pm$ 0.10	10.31 $\pm$ 0.19	<0.0001
0.50 wt%	10.54 $\pm$ 0.24	10.63 $\pm$ 0.31	<0.0001	10.21 $\pm$ 0.08	10.35 $\pm$ 0.14	<0.0001

Data are presented as number (percentage) mean  $\pm$  SD and analyzed using a 1-way ANOVA, and significant differences between the control and test groups were compared with the Dunnett test.  $n = 10$  for each group. Abbreviations: NA = no antibacterial activity observed; wt% = weight percentage.

The mechanisms of action for solid dental materials could be classified into two categories: antimicrobial-releasing and contact-killing methods (potentiated surfaces and substances that do not allow for bacterial adhesion). In this work, control groups presented only contact inhibition activity with no detectable halo beyond the limits of the disks. Upon incorporating silver nanoparticles at concentrations of 0.25 wt% and 0.50 wt%, there was a discernible increase in antimicrobial activity for both ALGINoplast® and Cavex. For ALGINoplast® against *E. coli*, the mean antimicrobial activity reached 10.52  $\pm$  0.17 ( $p < 0.05$ ) and 10.54  $\pm$  0.24 ( $p < 0.05$ ) mm at 0.25 wt% and 0.50 wt%, respectively. Similar trends were observed against *S. aureus*, with mean values of 10.61  $\pm$  0.20 ( $p < 0.05$ ) and 10.63  $\pm$  0.31 ( $p < 0.05$ ) mm. Cavex group exhibited antimicrobial activity with mean values of 10.03  $\pm$  0.087 and 10.21  $\pm$  0.08 ( $p < 0.05$ ) mm against *E. coli* and 10.31  $\pm$  0.14 ( $p < 0.05$ ) and 10.35  $\pm$  0.19 ( $p < 0.05$ ) mm against *S. aureus* at 0.25 wt% and 0.50 wt%, respectively.

These results suggest that the incorporation of silver nanoparticles enhances the antimicrobial activity of both ALGINoplast® and Cavex against *E. coli* and *S. aureus*. The observed variations in antimicrobial activity can be attributed to the different concentrations of silver nanoparticles, which could diffuse through the agar and release silver ions. The inhibition zones (Figure 3) were measured in four directions, and the average values were recorded for each disk [28].

**Figure 3.** Measurement of the antibacterial effect of the materials tested.

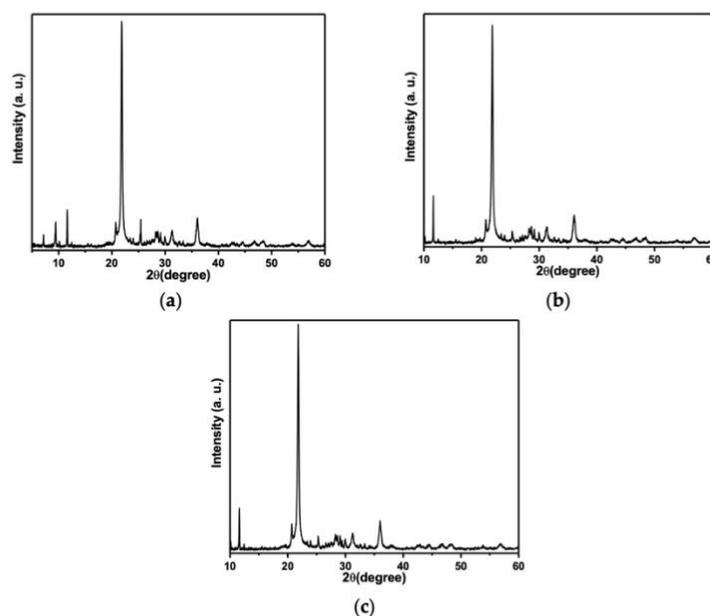
### 3.5. The X-Ray Diffraction

The diffraction test results revealed a high degree of similarity among the three samples analyzed within the 4–90° range on the diffractometer. Notably, the composition of the alginate remained unaltered across all samples.

Figure 2 presents the XRD results of the Cavex alginate mixed with silver nanoparticles at concentrations of 0% wt, 0.25% wt, and 0.5% wt. The graph highlights the compositional consistency among the samples, indicating no significant variations across the tested formulations.

The following components were detected in the composition of Calvex alginate (Figure 2a): Cristobalite, syn; Gypsum, Spencerite, Syngenite, syn; Calcium silicon oxide hydroxide hydrate, Parahopeite, and Glutaric acid. For the samples mixed with silver nanoparticles (Figure 2b,c), the components are the same with the addition of silver.

The X-ray diffraction test made to alginate ALGINoplast with silver nanoparticles at 0.25% and 0.5% (Figures 3 and 4) results in the following materials in its composition: Silver, Cristobalite, Gypsum, Spencerite, Calcium silicon oxide hydroxide hydrate, Parahopeite, and Glutaric acid.



**Figure 4.** (a) Diffraction pattern of the Cavex alginate without silver nanoparticles. (b) Diffraction pattern of the Cavex alginate mixed with silver nanoparticles at 0.25%. (c) Diffraction pattern of the Cavex alginate mixed with silver nanoparticles at 0.5%.

The results indicate that the silver nanoparticles did not undergo a chemical reaction when mixed with the alginate. Furthermore, the structure of the alginate remained unaltered, as evidenced by the consistent peak positions observed in the diffraction analysis, with no significant shifts detected between them.

#### 4. Discussion

Saliva and blood are considered the main contaminants of dental alginate impressions taken from patients, representing a significant risk of cross-contamination and transfer of infectious microorganisms between dental health professionals, including operators, assistants, and dental laboratories. Several studies have documented the presence of pathogens such as *S. mutans* and *E. coli* on plaster models, which may contribute to the

occurrence of dental infections both in clinics and laboratories. This phenomenon underlines the importance of implementing proper disinfection and handling protocols for materials to minimize the risk of infection transmission [29].

The porous structure of dental alginates facilitates the retention of microorganisms both on their surface and within the material. To render a dental alginate self-disinfecting, it is impregnated with a disinfectant, enabling both internal and external disinfection. This approach overcomes the limitations of disinfectants that act exclusively on the external surface, with the objective of preventing microbial survival within the pores of the setting material [29]. It is important to produce a self-disinfectant alginate without altering other properties as the mechanical and surface properties; our results showed no alteration in the recovery and surface roughness properties of the materials tested.

In this study, 5.57 nm silver nanoparticles (AgNPs) were incorporated into dental alginates at molar concentrations of  $10^{-1}$  M, specifically at 0.25 and 0.50% by weight. This approach builds on the work of Gijupalli et al. 2016, who used silver nanoparticles (AgNPs) ranging in size from 80 to 100 nm at concentrations of 0.5, 1, 2, and 5% by weight [30]. The findings of these studies indicate that neither the size nor the concentration of the nanoparticles significantly affects their antibacterial properties. Even at lower AgNP concentrations, antimicrobial efficacy was maintained [31].

In contrast to the methodology employed by Omidkhoda et al. (2019), this study incorporated the direct contact method to assess antimicrobial activity [13]. This approach was specifically chosen over the disk diffusion or agar well methods due to its closer approximation to clinical conditions. The direct contact method enables us to differentiate between contact inhibition-only materials and releasing inhibition materials; our group has demonstrated that the incorporation of silver nanoparticles into dental materials such as alginates, orthodontic adhesives, and endodontic materials can improve their antibacterial activity by releasing silver nanoparticles or silver ions [19].

The degree of gelation and cross-linking in alginate plays an important role in determining its properties; the size and distribution of the incorporated nanoparticles are critical; the distribution improves the mechanical reinforcement, while agglomeration can debulk the material. Chemical interactions between particles can alter gelation, which influences the overall stability [16]. In this study, both ALGINoplast and Cavex groups did not observe any defects upon deformation; this can be attributed to the correct distribution of AgNPs in alginate. It is important to consider that humidity and temperature cannot be controlled factors in the dental clinic; however, an attempt was made to use water at 23 °C, simulating the average temperature of the dental office [32].

Like the methodology employed by Anastasiadou et al. (1996), X-ray diffraction was utilized in this study not only to identify the components of the alginate but also to confirm the presence of silver nanoparticles (AgNPs) within the prepared formulation [27]. We can assert that the presence of silver nanoparticles is not limited to the surface of the material but is also distributed internally. This internal distribution provides a superior bactericidal effect against the bacteria, suggesting its potential as an antimicrobial agent in dental alginates [16].

These findings highlight the potential of incorporating nanomaterials into dental impression materials into dental impression materials to enhance their performance and ensure high-quality dental restorations.

Compared to the existing literature, our study represents a significant advance in the application of silver nanoparticles (AgNPs) in dental alginates. Using X-ray diffraction, we have evidenced the presence of both internal and external AgNPs in the material. More importantly, our findings indicate that, despite the gelation of the material upon mixing, this does not affect its physical and mechanical properties.

## 5. Conclusions

The incorporation of silver nanoparticles into ALGINoplast® and Cavex Cream Alginate significantly enhances their antimicrobial properties, demonstrating notable effectiveness against pathogenic microorganisms such as *E. coli* and *S. aureus*. This improvement is particularly crucial for ensuring safety in dental procedures, especially for patients utilizing prosthetic devices or orthodontic appliances.

In addition, it is highlighted that these biomaterials do not alter the physical or mechanical properties of dental alginate, which makes them especially useful in dental applications. These results not only offer a potential solution to reduce cross-contamination but also open the door to future clinical trials.

**Supplementary Materials:** The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/ma18092069/s1>, Figure S1: EDS results for dental alginates with nanoparticles. (a) ALGINoplast with 0.5 wt% AgNPs; (b) ALGINoplast with 0.25 wt% AgNPs; (c) Cavex with 0.5 wt% AgNPs; (d) Cavex with 0.25 wt% AgNPs; Figure S2: X-ray diffraction test with the samples (a) ALGINoplas at 0.25% AgNPs and (b) ALGINoplas at 0.5% AgNPs.

**Author Contributions:** Conceptualization, N.N.-M. and G.-A.M.-C.; formal analysis, M.A.R.-C.; investigation, M.A.R.-C., N.N.-M., and G.-A.M.-C.; methodology, M.A.R.-C.; resources, N.N.-M. and F.R.; writing—original draft, B.K.F.-S., M.A.R.-C. and G.-A.M.-C.; writing—review and editing, N.N.-M., F.R., B.K.F.-S., and G.-A.M.-C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by CONAHCYT (grant No. 888265).

**Institutional Review Board Statement:** Not applicable.

**Informed Consent Statement:** Not applicable.

**Data Availability Statement:** The data used to support the findings of this study are included within the article.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Vasiliu, S.; Racovita, S.; Gugoasa, I.A.; Lungu, M.-A.; Popa, M.; Desbrieres, J. The Benefits of Smart Nanoparticles in Dental Applications. *Int. J. Mol. Sci.* **2021**, *22*, 2585. <https://doi.org/10.3390/ijms22052585>.
2. Nassar, U.; Aziz, T.; Flores-Mir, C. Dimensional stability of irreversible hydrocolloid impression materials as a function of pouring time: A systematic review. *J. Prosthet. Dent.* **2011**, *106*, 126–133. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(11\)60108-X](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(11)60108-X).
3. Cervino, G.; Fiorillo, L.; Herford, A.S.; Laino, L.; Troiano, G.; Amoroso, G.; Crimi, S.; Matarese, M.; D'amico, C.; Siniscalchi, E.N.; et al. Alginate materials and dental impression technique: A current state of the art and application to dental practice. *Mar. Drugs* **2019**, *17*, 18. <https://doi.org/10.3390/md17010018>.
4. Murata, H.; Kawamura, M.; Hamada, T.; Chimori, H.; Nikawa, H. Physical properties and compatibility with dental stones of current alginate impression materials. *J. Oral Rehabil.* **2004**, *31*, 1115–1122.
5. Abdelraouf, R.M. Chemical analysis and microstructure examination of extended-pour alginate impression versus conventional one (characterization of dental extended-pour alginate). *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.* **2017**, *67*, 612–618.
6. Kilian, M.; Chapple, I.L.C.; Hannig, M.; Marsh, P.D.; Meuric, V.; Pedersen, A.M.L.; Tonetti, M.S.; Wade, W.G.; Zaura, E. The oral microbiome—An update for oral healthcare professionals. *Br. Dent. J.* **2016**, *221*, 657–666. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2016.865>.
7. Luo, S.-C.; Wei, S.-M.; Luo, X.-T.; Yang, Q.-Q.; Wong, K.-H.; Cheung, P.C.K.; Zhang, B.-B. How probiotics, prebiotics, synbiotics, and postbiotics prevent dental caries: An oral microbiota perspective. *NPJ Biofilms Microbiomes* **2024**, *10*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41522-024-00488-7>.
8. Demajo, J.; Cassar, V.; Farrugia, C.; Millan-Sango, D.; Sammut, C.; Valdramidis, V.; Camilleri, J. Effectiveness of disinfectants on antimicrobial and physical properties of dental impression materials. *Int. J. Prosthodont.* **2016**, *29*, 63–67. <https://doi.org/10.11607/ijp.4358>.

9. Qiu, Y.; Xu, J.; Xu, Y.; Shi, Z.; Wang, Y.; Zhang, L.; Fu, B. Disinfection efficacy of sodium hypochlorite and glutaraldehyde and their effects on the dimensional stability and surface properties of dental impressions: A systematic review. *PeerJ* **2023**, *11*, e14868. <https://doi.org/10.7717/peerj.14868>.
10. Nia, A.; Ataei, M.; Zeighami, H. A comparative study on the antimicrobial activity of irreversible hydrocolloid mixed with silver nanoparticles and chlorhexidine. *Dent. Res. J.* **2020**, *17*, 120–125.
11. Singer, L.; Bourauel, C. Mechanical and physical properties of an experimental chemically and green-nano improved dental alginate after proven antimicrobial potentials. *Gels* **2023**, *9*, 429. <https://doi.org/10.3390/gels9050429>.
12. Grădinaru, I.; Ciubotaru, B.I.; Dascălu, M.; Bargan, A.; Vasiliu, A.L. Alginate Dental Impression Materials with Allantoin Enrichment: A Morphology, Dynamic Vapor Sorption And Swelling Evaluation. In Proceedings of the 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), Iasi, Romania, 17–18 November 2022; pp. 1–4.
13. Omidkhoda, M.; Hasanzadeh, N.; Soleimani, F.; Shafae, H. Antimicrobial and physical properties of alginate impression material incorporated with silver nanoparticles. *Dent. Res. J.* **2019**, *16*, 372–376. PMID: PMC6873245.
14. Wang, J.; Wan, Q.; Chao, Y.; Chen, Y. A self-disinfecting irreversible hydrocolloid impression material mixed with chlorhexidine solution. *Angle Orthod.* **2007**, *77*, 894–900. <https://doi.org/10.2319/070606-277>.
15. Beuter, L.; Bourauel, C.; Singer, L. Assessing the impact of an environmentally friendly approach on irreversible dental hydrocolloid performance. *Sci. Rep.* **2024**, *14*, 30516. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83035-w>.
16. Singer, L.; Beuter, L.; Karacic, S.; Bierbaum, G.; Karacic, J.; Bourauel, C. Enhancing dental alginate with *Syzygium aromaticum*, *Zingiber officinale* and green silver nanoparticles: A nature-enhanced approach for superior infection control. *Gels* **2024**, *10*, 600. <https://doi.org/10.3390/gels10090600>.
17. Liu, S.; Phillips, S.; Northrup, S.; Levi, N. The Impact of Silver Nanoparticle-Induced Photothermal Therapy and Its Augmentation of Hyperthermia on Breast Cancer Cells Harboring Intracellular Bacteria. *Pharmaceutics* **2023**, *15*, 2466. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15102466>.
18. Noronha, V.T.; Paula, A.J.; Durán, G.; Galembeck, A.; Cogo-Müller, K.; Franz-Montan, M.; Durán, N. Silver nanoparticles in dentistry. *Dent. Mater.* **2017**, *33*, 1110–1126. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2017.07.002>.
19. Navarrete-Olvera, K.; Niño-Martínez, N.; De Alba-Montero, I.; Patiño-Marín, N.; Ruiz, F.; Bach, H.; Martínez-Castañón, G.-A. The Push-Out Bond Strength, Surface Roughness, and Antimicrobial Properties of Endodontic Bioceramic Sealers Supplemented with Silver Nanoparticles. *Molecules* **2024**, *29*, 4422.
20. Tristán-López, J.D.; Niño-Martínez, N.; Kolosovas-Machuca, E.S.; Patiño-Marín, N.; De Alba-Montero, I.; Bach, H.; Martínez-Castañón, G.A. Application of silver nanoparticles to improve the antibacterial activity of orthodontic adhesives: An in vitro study. *Int. J. Mol. Sci.* **2023**, *24*, 1401.
21. Choure, R.; Yadav, N.S.; Somkuwar, K.; Saxena, V.; Tiwari, R.; Bhatia, R. Comparative Assessment of Flexural Strength in Heat-cured Polymethyl Methacrylate Resin Reinforced with Silver Nanoparticles, Siwak, and Fluconazole: An In-vitro Study. *J. Clin. Diagn. Res.* **2024**, *18*, ZC7–ZC11.
22. Niyazi, A.A.; Alabrash, M.A.; Elzouhry, M.S.; AlFarra, R.M.; Althubayani, N.M.; Huraib, W.M.; Alghalib, T.A.; Pullishery, F. Comparative Analysis of Alginate Dimensional Stability with Varied Pouring Intervals. *J. Pharm. Bioallied Sci.* **2024**, *16* (Suppl. S5), S4599–S4603.
23. Council on Dental Materials, Instruments, and Equipment. American National Standard/American Dental Association (ANSI/ADA), Specification No. 18. In *Alginate Impression Materials 1992*; American Dental Association: Chicago, IL, USA, 1992.
24. ISO 21563:2021; Dentistry—Test Method for Alginate Impression Materials. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2021.
25. Lemon, J.C.; Okay, D.J.; Powers, J.M.; Martin, J.W.; Chambers, M.S. Facial moulage: The effect of a retarder on compressive strength and working and setting times of irreversible hydrocolloid impression material. *J. Prosthet. Dent.* **2003**, *90*, 276–281. [https://doi.org/10.1016/s0022-3913\(03\)00366-4](https://doi.org/10.1016/s0022-3913(03)00366-4).
26. Bunaciu, A.A.; UdrişTioiu, E.G.; Aboul-Enein, H.Y. X-ray diffraction: Instrumentation and applications. *Crit. Rev. Anal. Chem.* **2015**, *45*, 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>.
27. Anastassiadou, V.; Dolopoulou, V.; Kaloyannides, A. X-ray diffraction study of crystalline phases of calcium sulphate in alginate impression materials. *Eur. J. Oral Sci.* **1996**, *104*, 637–640. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1996.tb00156.x>.
28. Singer, L.; Karacic, S.; Szekat, C.; Bierbaum, G.; Bourauel, C. Biological properties of experimental dental alginate modified for self-disinfection using green nanotechnology. *Clin. Oral Investig.* **2023**, *27*, 6677–6688. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05277-8>.

29. Egusa, H.; Watamoto, T.; Abe, K.; Kobayashi, M.; Kaneda, Y.; Ashida, S.; Yatani, H. An analysis of the persistent presence of opportunistic pathogens on patient-derived dental impressions and gypsum casts. *Int. J. Prosthodont.* **2008**, *21*, 62–68.
30. Ginjupalli, K.; Alla, R.K.; Tellapragada, C.; Gupta, L.; Perampalli, N.U. Antimicrobial activity and properties of irreversible hydrocolloid impression materials incorporated with silver nanoparticles. *J. Prosthet. Dent.* **2016**, *115*, 722–728. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.11.006>.
31. Rajendran, V.; Suma, K.; Ali, S.A.; Karthigeyan, R.; Kalarani, G. Antimicrobial efficacy of irreversible hydrocolloid impression impregnated with silver nanoparticles compared to surface disinfected impressions-an in vivo study. *J. Pharm. Bioallied Sci.* **2021**, *13* (Suppl. S1), S532–S536.
32. Farzin, M.; Panahandeh, H. Effect of pouring time and storage temperature on dimensional stability of casts made from irreversible hydrocolloid. *J. Dent.* **2010**, *7*, 179.

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.