

RESISTENCIA COMPRESIVA DE RESINAS DE IMPRESIÓN 3D PARA
RESTAURACIONES DEFINITIVAS TIPO OVERLAY. ESTUDIO IN VITRO

INVESTIGADORES:

Karen Paola Narváez Quiñonez
Nohora Liliana Romero De La Hoz

ASESOR CIENTÍFICO

Dr. Johann Enrique Pabuena Posada
Odontólogo y especialista en Prostodoncia
Institución Universitaria Colegios de Colombia

ASESOR METODOLÓGICO

Dr. Camilo A. Romo Pérez
Odontólogo y magister en Epidemiología
Universidad del Magdalena

ASESOR ESTADÍSTICO

Pr. Gerardo Ardila

2024

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

DEDICATORIA

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
2.	JUSTIFICACIÓN	7
3.	PROPÓSITO	9
4.	ANTECEDENTES	10
5.	MARCO TEÓRICO	12
5.1.	MARCO CONCEPTUAL.....	12
5.2.	MARCO HISTÓRICO.....	20
5.2.1.	Línea de tiempo de la evolución de las tecnologías de impresión en la odontología	20
5.2.2.	Línea de tiempo de la evolución de las resinas de impresión 3D.....	22
5.2.3.	Línea de tiempo de la evolución de las restauraciones parciales adhesivas	24
5.3.	MARCO REFERENCIAL	25
6.	OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	34
6.1.	OBJETIVO GENERAL	34
6.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	34
7.	ASPECTOS METODOLÓGICOS	35
7.1.	Tipo de estudio:	35
7.2.	Objeto de estudio:	35
7.3.	Material objeto de estudio:.....	35
7.4.	Unidad de observación:	35
7.5.	Características de la muestra	35
7.5.1.	Población de estudio:.....	35
7.5.2.	Muestra:.....	35
7.5.6.	Criterios de selección	36
7.5.7.	Procedimiento	36
7.5.8.	Variables	41
7.5.9.	Lugar de investigación	41
7.5.10.	Archivo de datos y sistematización:	41
8.	ASPECTOS ÉTICOS.....	42

9.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	43
10.	RESULTADOS.....	45
11.	DISCUSIÓN.....	49
12.	CONCLUSIONES.....	53
13.	RECOMENDACIONES	55
14.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La evolución de las tecnologías digitales ha transformado profundamente la odontología restauradora, particularmente a través de la impresión 3D, que permite fabricar restauraciones dentales con alta precisión y personalización. En especial, la tecnología de estereolitografía (SLA) ha ganado protagonismo por su capacidad de producir estructuras complejas mediante la fotopolimerización de resinas líquidas capa por capa, ofreciendo una alternativa moderna frente a los métodos convencionales de fabricación como el fresado sustractivo (CAD/CAM) (1,2). Esta técnica permite optimizar parámetros como la orientación de impresión, el grosor de capa y el tipo de poscurado, factores que inciden directamente en el comportamiento mecánico del material final. (3)

Dentro de esta tendencia, el desarrollo de resinas reforzadas con cerámica para impresión 3D ha abierto nuevas posibilidades para restauraciones definitivas, como coronas unitarias, inlays, onlays, carillas y especialmente restauraciones tipo overlay. Estas últimas, por su diseño conservador y funcional, están indicadas en dientes posteriores con gran compromiso estructural, donde la restauración debe resistir fuerzas masticatorias elevadas y condiciones clínicas exigentes. (4) En este contexto, la resistencia compresiva del material utilizado se vuelve un criterio crítico para asegurar la durabilidad clínica de la restauración.

Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos, las resinas impresas en 3D aún presentan desafíos significativos en cuanto a sus propiedades mecánicas. Varios estudios han evidenciado que la resistencia compresiva de estos materiales puede verse afectada por factores intrínsecos como la composición de la resina, el grado de conversión del polímero, la homogeneidad del material y las tensiones residuales generadas durante el proceso de fotopolimerización. (1,3) Adicionalmente, la orientación de impresión influye considerablemente en la integridad estructural de las restauraciones, generando zonas de debilidad que pueden comprometer su comportamiento clínico a largo plazo. (4)

La bibliografía actual indica que, si bien algunas resinas 3D han mostrado resistencias compresivas adecuadas para restauraciones temporales, su desempeño para restauraciones definitivas aún es materia de debate, especialmente al compararlas con materiales convencionales o fresados. (2) A pesar de los esfuerzos por optimizar sus propiedades, la variabilidad entre marcas comerciales y la limitada evidencia clínica hacen necesario comparar el comportamiento mecánico de diferentes resinas disponibles en el mercado, bajo condiciones estandarizadas que permitan extraer conclusiones relevantes para la práctica odontológica.

Considerando que la resistencia compresiva es un parámetro clave para la longevidad de restauraciones definitivas, especialmente en sectores posteriores sometidos a alta carga oclusal, se hace imprescindible estudiar y comparar las resinas impresas en 3D específicamente desarrolladas para este propósito. Evaluar su desempeño permitirá establecer criterios clínicos más objetivos para su indicación y contribuir al desarrollo de materiales más predecibles y duraderos.

- **Pregunta de investigación:** ¿Cuál es la resina de impresión 3D que tiene mayor resistencia compresiva en las restauraciones definitivas tipo overlay?

2. JUSTIFICACIÓN

La odontología ha experimentado una transformación significativa con la incorporación de tecnologías avanzadas que facilitan procedimientos más precisos y eficientes. Entre estas innovaciones, los sistemas de escaneo intraoral y las tecnologías CAD/CAM han revolucionado la fabricación de restauraciones dentales, permitiendo intervenciones más rápidas y con resultados predecibles. (5) Sin embargo, con los avances en la fabricación digital dental, las restauraciones realizadas mediante tecnologías de impresión 3D experimentan factores que deben ser considerados para su rendimiento clínico, como la resistencia compresiva, que es una de las propiedades cruciales de un material dental, ya que indica su comportamiento mecánico ante las cargas masticatorias. La resistencia compresiva de las resinas impresas en 3D puede verse afectada por el proceso de impresión y la fotopolimerización, lo que podría resultar en una reducción de su resistencia en comparación con resinas convencionales y aquellas fabricadas mediante técnicas sustractivas. (6)

La elección de la tecnología de impresión 3D en odontología presenta varias ventajas, como la reducción del desperdicio de material en comparación con la fabricación sustractiva, la capacidad de crear geometrías complejas, la reproducibilidad, la facilidad de uso y producción, así como una alta productividad y rentabilidad. (5) Sin embargo, estas ventajas deben ser ponderadas frente a las limitaciones potenciales, especialmente en cuanto a la resistencia mecánica de las restauraciones, que es crítica para el éxito clínico a largo plazo. (7)

El objetivo de este estudio fue determinar, mediante la norma ASTM D695-02a en una máquina universal de ensayos Instron, cuál marca de resina de impresión 3D entre BEGO VarseoSmile Crown y P-Crown v3 ofrece mayor resistencia compresiva en restauraciones definitivas tipo overlay. Esta evaluación se llevó a cabo utilizando

procedimientos estandarizados que aseguren la precisión y comparabilidad de los resultados. (3)

Dado que la resistencia compresiva es esencial para evaluar la durabilidad y el rendimiento de las restauraciones bajo cargas masticatorias, es fundamental que se realicen ensayos comparativos rigurosos. Estos ensayos permitirán identificar la resina que proporciona una mayor resistencia compresiva, asegurando así una mayor resistencia y longevidad de las restauraciones definitivas impresas en 3D. Estudios previos han demostrado que tanto el grosor de las capas impresas como la orientación de la impresión pueden influir significativamente en las propiedades mecánicas de las resinas, lo que subraya la importancia de este tipo de investigaciones. (7)

Por lo tanto, en el contexto de la odontología moderna, es esencial investigar y comprender cómo los diferentes factores relacionados con la impresión 3D, como la resistencia compresiva, pueden influir en la realización de futuras investigaciones clínicas de las restauraciones definitivas.

3. PROPÓSITO

El propósito del estudio fue conocer de las diferentes opciones de marcas de resinas híbridas que hay en el mercado cuál ofrecía mejores propiedades mecánicas mediante la comparación de la resistencia compresiva para generar nuevos conocimientos sobre las diferentes opciones de materiales disponibles en el país.

Este estudio buscó ayudar a los profesionales de la odontología a tomar decisiones basadas en la evidencia científica que permitirá realizar ajustes en los protocolos de tratamientos para restauraciones en resinas impresas. Por último, este nuevo conocimiento es un factor motivante en la realización de estudios adicionales.

4. ANTECEDENTES

La odontología ha experimentado una evolución significativa con la introducción de tecnologías avanzadas que permiten la creación de restauraciones dentales mediante métodos de fabricación digital, como la impresión 3D. Este avance ha sido impulsado principalmente por la necesidad de mejorar la precisión, eficiencia y estética de las restauraciones dentales, particularmente en el caso de las prótesis dentales provisionales y definitivas. (3) La resistencia mecánica, especialmente la resistencia compresiva, es una propiedad crítica que influye directamente en la durabilidad y el éxito clínico de estas restauraciones. (5)

Históricamente, las resinas convencionales, como las resinas acrílicas autopolimerizables y curadas por presión y calor, han sido ampliamente utilizadas para la fabricación de prótesis dentales temporales debido a su facilidad de manipulación y coste relativamente bajo. (8) No obstante, estos materiales presentan limitaciones en términos de resistencia mecánica, lo que puede comprometer su rendimiento clínico a largo plazo (7) En este contexto, la impresión 3D ha surgido como una tecnología prometedora que permite la producción de restauraciones dentales con propiedades mecánicas mejoradas, incluyendo una mayor resistencia a la compresión, lo que es crucial para soportar las fuerzas masticatorias en la cavidad oral. (9)

La tecnología de impresión 3D en odontología se ha desarrollado principalmente en torno a técnicas como la estereolitografía (SLA) y el procesamiento digital de luz (DLP). (10) Estas tecnologías han permitido la fabricación de resinas dentales con una mayor homogeneidad estructural y mejores propiedades mecánicas en comparación con los métodos de fabricación convencionales. (11) Diversos estudios han comparado la resistencia compresiva de resinas impresas en 3D con las convencionales, encontrando que las primeras suelen ofrecer un rendimiento superior, especialmente cuando se someten a pruebas bajo normas estandarizadas como la ASTM D695-02a. (3,12)

En investigaciones recientes, se ha demostrado que las resinas híbridas impresas en 3D, como las utilizadas en prótesis fijas temporales, no solo superan a las resinas convencionales en términos de resistencia compresiva, sino que también presentan ventajas adicionales como una mejor resistencia a la flexión y menores tasas de desgaste. (13) Estas características son esenciales para asegurar la longevidad y la funcionalidad de las restauraciones, especialmente en situaciones donde se requiere una alta resistencia a las cargas cíclicas y dinámicas típicas del entorno oral. (14)

Sin embargo, a pesar de los avances significativos en la tecnología de impresión 3D, sigue habiendo una necesidad crítica de evaluar y comparar la resistencia compresiva de diferentes marcas de resinas híbridas disponibles en el mercado. (15) Este estudio se enfoca en determinar cuál de las resinas híbridas de impresión 3D, específicamente VarseoSmile Crown y P-CROWN V3 ofrece una mayor resistencia compresiva en restauraciones definitivas tipo overlay, utilizando una máquina universal de ensayos bajo la norma ASTM D695-02a. La importancia de esta evaluación radica en proporcionar evidencia que guíe a los profesionales en la selección del material más adecuado para asegurar restauraciones duraderas y resistentes.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. MARCO CONCEPTUAL

- **Flujo digital:** hace referencia a la integración de herramientas y tecnologías digitales en las distintas fases del tratamiento restaurador, desde el diagnóstico hasta la fabricación de la restauración final. Este flujo incluye tres componentes esenciales: el escaneo intraoral o extraoral, el diseño digital (CAD) y la fabricación (CAM), ya sea por técnicas sustractivas (fresado) o aditivas (impresión 3D). La digitalización del proceso clínico permite una mayor precisión, trazabilidad, ahorro de tiempo y personalización del tratamiento. Asimismo, reduce la intervención manual y el margen de error asociado al modelado convencional, favoreciendo una mejor comunicación entre el clínico, el técnico dental y el paciente. (2)
- **CAD/CAM en odontología:** El término CAD/CAM (Computer-Aided Design/Manufacturing) describe un flujo digital de trabajo que incluye el diseño, la simulación y la fabricación de restauraciones dentales. Aunque inicialmente se asoció al fresado de bloques (manufactura sustractiva), actualmente incluye también procesos aditivos como la impresión 3D, lo que permite una mayor personalización y reducción de tiempos clínicos. (2)
- **Impresión tridimensional (3D):** La impresión 3D en odontología ha marcado un cambio significativo en cómo se realizan los procedimientos dentales. Esta tecnología permite la fabricación rápida y precisa de una amplia gama de aplicaciones dentales, desde modelos anatómicos hasta prótesis y guías quirúrgicas. (9) La impresión 3D ofrece una mayor personalización, lo que es esencial en odontología, donde cada paciente presenta una anatomía única. Además, la capacidad de convertir imágenes de tomografía computarizada y escaneo intraoral en modelos físicos ha mejorado la planificación y ejecución de tratamientos dentales, permitiendo una mayor precisión y eficiencia. (16) Ha sido muy útil en diferentes campos de la odontología como en la ortodoncia para la realización de dicha aparatología y una planeación de casos asistidos por software que permiten tener una idea más precisa de los resultados del tratamiento. Su uso en cirugía nos brinda la facilidad de realizar guías

quirúrgicas para la colocación guiada de implantes con diferentes modificaciones y mayor precisión. La impresión 3D también ha facilitado la educación y el entrenamiento en odontología, proporcionando modelos realistas para la práctica y la enseñanza. (17)

Manufactura aditiva vs. Sustractiva:

- **Manufactura sustractiva:** Es una tecnología ampliamente usada basada en el fresado de bloques sólidos mediante máquinas controladas por computadora. Proporciona excelente precisión, aunque implica mayor desperdicio de material y desgaste de fresas. (4)
- **Manufactura aditiva:** Consiste en la construcción de objetos capa por capa a partir de un modelo digital. Es más eficiente, genera menos desperdicio y permite estructuras más complejas (Pot et al., 2024). Entre las tecnologías más utilizadas en odontología destaca la **estereolitografía (SLA)** que utiliza resinas fotopolimerizables curadas por luz para crear restauraciones precisas. (2)
- **La tecnología de fresado:** también conocida como manufactura sustractiva, es un proceso en el que una pieza sólida (generalmente un bloque de cerámica o resina) es tallada por una fresadora controlada por computadora para obtener una restauración con la forma deseada. Esta técnica forma parte del flujo CAD/CAM y ha sido ampliamente utilizada en odontología desde finales del siglo XX. Su principal ventaja es la producción de restauraciones altamente precisas y resistentes, con excelente ajuste marginal y estabilidad a largo plazo. (2)

El fresado se emplea principalmente en la fabricación de coronas, inlays, onlays, overlays y puentes, utilizando materiales como disilicato de litio, zirconia, o resinas híbridas fresables. La limitación de esta técnica radica en el desgaste de herramientas, el costo de los bloques y la imposibilidad de fabricar geometrías internas extremadamente complejas debido al tamaño de las fresas. (1)

- **Modalidades de Impresión 3D según el material utilizado:**
Existen diferentes mecanismos para el funcionamiento de las tecnologías de impresión 3D. Dependiendo de su mecanismo de impresión 3D, el producto tiene características únicas que se adaptan al uso. (18)
- **Estereolitografía (EL):** Patentada en 1984 por el Dr. Hull, la SLA es una técnica que realiza un curado por capas de la resina, por medio de un láser de luz ultravioleta de 0,85 μm . Este curado se realiza desde la parte inferior donde la resina se encuentra en estado líquido y va aumentando por capas a la parte superior. La solidificación de cada capa presenta una resolución de 0,25 μm . (10) La estereolitografía es altamente valorada por su precisión, capaz de imprimir detalles finos que son esenciales para aplicaciones dentales. La tecnología EL es ideal para crear modelos dentales detallados, moldes para fundición y prótesis, especialmente cuando se requiere un alto grado de precisión. Sin embargo, los costos de los materiales y el mantenimiento del equipo pueden ser relativamente altos. (19)
- **Procesador de Luz Digital (PLD):** La técnica utiliza un láser a base de un proyector para que el haz de luz pueda incidir sobre una plataforma, la cual contiene el material que puede ser una resina fotopolimerizable, capa por capa hasta crear la restauración o modelo 3D. La impresión PLD destaca por su velocidad, siendo capaz de imprimir objetos más rápidamente que EL, lo cual es beneficioso en entornos clínicos ocupados. Aunque la precisión puede ser ligeramente inferior a la de la tecnología EL, la PLD sigue siendo una opción viable para la mayoría de las aplicaciones dentales, incluyendo la fabricación de modelos y prótesis. (19)
- **Fused Deposition Modeling (FDM):** emplea un filamento termoplástico que se funde y deposita capa por capa. Su uso en odontología es limitado.

Entre estas, la SLA y la DLP son las tecnologías predominantes en aplicaciones clínicas debido a su alta precisión, resolución y adaptabilidad en materiales biocompatibles. (2,4)

Cada tecnología de impresión 3D ofrece características únicas que la hacen adecuada para diferentes aplicaciones en odontología. La elección de la tecnología adecuada dependerá de las necesidades específicas del tratamiento dental, considerando factores como la precisión, la velocidad de impresión, la calidad de superficie y el costo. (20)

Entre las ventajas que presenta la técnica de estereolitografía se encuentra el tener una mayor incidencia de luz milimétrica al ser punto por punto creando formas que poseen características de alta resolución, reproduciendo mayores detalles y dejando las superficies más lisas, en contraparte, la técnica tiene una vida útil limitada y la fabricación es lenta, además de ser una tecnología de alto costo. ((21)

La técnica de estereolitografía ofrece como beneficio un tiempo de construcción reducido al realizar el curado a la capa completa de resina que se encuentra en la plataforma, ofreciendo una buena precisión en un equipo de menor costo. Pero como desventaja, tiene mejor reproducción de detalle, dejando unas superficies más rugosas y aunque la adquisición de la tecnología es baja en contraste con el estereolitógrafo, los materiales siguen presentando un alto costo. (21)

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, ha experimentado un rápido avance en las últimas décadas. Entre las tecnologías clave que han contribuido significativamente a este avance se encuentran la Estereolitografía (SLA). Ambas técnicas emplean láseres para la fabricación de objetos tridimensionales, pero difieren en sus enfoques y aplicaciones. (21)

- **Precisión en Impresión 3D Dental:** La precisión es un factor crítico en la odontología, donde incluso pequeñas desviaciones pueden afectar el resultado del tratamiento. La tecnología SLA ofrece una alta precisión, lo que es crucial para la fabricación de prótesis y restauraciones dentales. Los avances en software y hardware han mejorado continuamente la precisión de las impresiones 3D, permitiendo reproducciones fieles de los modelos digitales. (22)

- **Postcurado:** El postcurado es una etapa esencial posterior a la impresión 3D, en la que las piezas se exponen a luz ultravioleta adicional para completar la polimerización. Esta fase mejora la estabilidad dimensional, la resistencia mecánica y reduce la toxicidad residual de los monómeros no reaccionados. La calidad del postcurado afecta directamente la resistencia compresiva del material final. (4)
- **Resinas fresadas.** son materiales restauradores que se presentan en bloques prepolimerizados, preparados específicamente para ser mecanizados mediante tecnología CAD/CAM. (23) Estas resinas ofrecen una elevada homogeneidad estructural debido a su polimerización industrial controlada, lo que les confiere mayor resistencia mecánica, menor contracción y mejor estabilidad cromática en comparación con las resinas fotopolimerizadas de impresión 3D. (4)

Se utilizan principalmente en restauraciones provisionales de larga duración o, en algunos casos, como restauraciones definitivas en sectores anteriores o de carga moderada. (23) A pesar de sus buenas propiedades, las resinas fresadas pueden presentar desventajas como mayor rigidez, limitada elasticidad y menor personalización estética frente a materiales cerámicos o resinas ceramizadas impresas. (1) No obstante, constituyen una referencia importante en estudios comparativos por su desempeño mecánico confiable y su uso clínico extendido.

- **Materiales Dentales en Impresión 3D:** La impresión 3D dental utiliza una variedad de materiales, cada uno con propiedades específicas que los hacen adecuados para diferentes aplicaciones clínicas:(1)
- **Polímeros Termoplásticos:** Utilizados en Modelado por Deposición Fundida, estos materiales son versátiles y económicos. Aunque no tan precisos como las resinas, son suficientes para crear prototipos y herramientas quirúrgicas personalizadas. (21)

- **Metales y Cerámicas:** Utilizados en Sinterizado Selectivo por Láser y otras técnicas, permiten la creación de prótesis y restauraciones duraderas. Estos materiales ofrecen una gran resistencia y estabilidad, adecuados para aplicaciones de largo plazo en odontología. (10)
- **Resinas Fotopolimerizables:** Ampliamente utilizadas en EL y PLD, las resinas fotopolímeras ofrecen una excelente precisión de detalle y son ideales para modelos dentales y guías quirúrgicas. Su capacidad para replicar con precisión las estructuras anatómicas las hace esenciales en la planificación de tratamientos. (21)

Las resinas híbridas que son fotopolímeros constan de 75% de oligómeros, 25% de monómeros e iniciadores de fotopolimerización, que cuando son expuestos a la luz ultravioleta, separan los radicales primarios que reaccionan con los oligómeros y monómeros que conducen al endurecimiento o polimerización. (24)

Dentro de las ventajas de todos los procesos aditivos es que se pueden diseñar y realizar objetos tridimensionales en la pantalla para permitir una variedad casi ilimitada de formas y niveles de complejidad con menos desperdicio de material. (16)

- **Resinas de impresión 3D:** Las resinas empleadas en tecnologías SLA y DLP están compuestas por una matriz de monómeros acrílicos o metacrílicos, fotoiniciadores y, en algunos casos, rellenos cerámicos que mejoran sus propiedades mecánicas. Las resinas pueden ser clasificadas según su aplicación clínica: modelos, guías quirúrgicas, provisionales, o restauraciones definitivas. (4) Las resinas definitivas actuales, como P-CROWN V3 y VarseoSmile Crown Plus, presentan propiedades como resistencia compresiva, estabilidad cromática y biocompatibilidad, lo que permite su uso en restauraciones funcionales a largo plazo. (1)

La tecnología digital ha revolucionado los métodos tradicionales de fabricación y diseño de restauraciones dentales en varias etapas del flujo de trabajo dental debido a las mejoras en el diseño asistido por ordenador/fabricación asistida por ordenador (CAD/CAM). En la actualidad el desarrollo de esta tecnología CAD/CAM se utiliza para fabricar varias restauraciones con excelentes propiedades estéticas. (23)

Desde el siglo XVIII, se han utilizado técnicas de impresión convencionales para registrar la geometría tridimensional de los tejidos dentales. (20) No obstante, los cambios volumétricos de los materiales de impresión, su manejo y la expansión del yeso parecen propensos a errores, por lo que el proceso requiere los servicios de un excelente laboratorio dental para solucionar algunos de estos problemas. (10) Para superar estas dificultades, se han venido desarrollando desde hace varios años, diferentes tecnologías como sistemas de escaneo intraoral (IOS) para la práctica odontológica. (20) La implementación de estos dispositivos en la consulta coincidió con el desarrollo de la tecnología CAI/ CAD/CAM (escaneo, diseño y fabricación asistidos por computadora) en odontología, con numerosas ventajas para los profesionales. La digitalización de todo el proceso bajo la asistencia de una computadora es lo que se conoce como flujo digital, el cual puede ser completo o mixto, cuando se habla de unir la tecnología análoga con la digital. Hoy en día, IOS y CAD/CAM facilitan la planificación del tratamiento, la aceptación de casos, la comunicación con los laboratorios, la reducción del tiempo operatorio, los requisitos de almacenamiento y la reducción de los tiempos de tratamiento. (25)

- **VarseoSmile Crown Plus:** es un material híbrido con relleno cerámico que se utiliza para la impresión 3D de restauraciones permanentes como coronas individuales, inlays, onlays y carillas en el área frontal y lateral, incluidas las superficies oclusales. (26)

- **P-Crown V3:** es una resina del color del diente, rellena de cerámica para la impresión 3D de coronas individuales permanentes, inlays, onlays y veneers. P-Crown Resin produce restauraciones de alta resistencia y larga duración con un ajuste exacto y preciso. La baja absorción de agua y el acabado liso garantizan que las restauraciones realizadas con esta resina tendrán una baja tendencia a envejecer, decolorarse o acumular placa. (27)

TIPO DE PREPARACIÓN DE LA RESTAURACIÓN

Entre los avances para procedimientos clínicos se encuentran la tecnología adhesiva y el creciente aumento de las demandas estéticas lo que lleva a indicaciones para restauraciones de cobertura parcial del color de los dientes. Las restauraciones indirectas parciales clasificadas como inlays (sin cubrir las cúspides), onlays (que cubren al menos una cúspide) y overlays (que cubren todas las cúspides), permiten la conservación de la estructura dental restante, promoviendo el refuerzo de un diente comprometido por caries o fracturas. (28)

- **Restauraciones parciales adhesivas:** Las restauraciones indirectas adhesivas son restauraciones fabricadas fuera de la cavidad oral y cementadas posteriormente. Se diseñan para preservar al máximo la estructura dentaria remanente y se adhieren mediante sistemas adhesivos de resina. Se dividen en tres tipos principales:
 - **Inlays:** intracoronarias sin cubrir cúspides.
 - **Onlays:** restauraciones que cubren una o más cúspides.
 - **Overlays:** restauraciones que cubren todas las cúspides, sin envolver el diente por completo. El *overlay* se indica en dientes posteriores con pérdida estructural significativa. Su diseño permite recubrir todas las cúspides, protegiendo la estructura remanente y restaurando la función oclusal. A diferencia de la corona total, el *overlay* es más conservador y está especialmente indicado en casos de caries extensas o dientes tratados endodónticamente. (29)

- Resistencia compresiva:** Es la capacidad de un material para soportar fuerzas de compresión sin sufrir fracturas o deformaciones permanentes. Se expresa megapascales MPa y meganewton MN/m², es un parámetro fundamental en la evaluación de la durabilidad y el desempeño mecánico de los materiales odontológicos. (30) Esta propiedad es crítica en restauraciones ubicadas en sectores posteriores, donde las fuerzas masticatorias pueden superar los 600–900 N. Una restauración con resistencia compresiva adecuada minimiza el riesgo de fractura y mejora la longevidad clínica del tratamiento. (3)

5.2. MARCO HISTÓRICO

5.2.1. Línea de tiempo de la evolución de las tecnologías de impresión en la odontología

Fig.1. Línea de tiempo



Fuente: Elaboración propia

La evolución de las tecnologías de impresión tridimensional (3D) ha transformado significativamente los procesos de diseño y fabricación en diversos campos, siendo la odontología uno de los sectores más beneficiados en las últimas décadas. Este

avance puede comprenderse mediante una línea de tiempo que inicia en 1986, cuando Charles Hull patentó la estereolitografía (SLA), el primer proceso de impresión 3D, basado en la fotopolimerización de resinas líquidas por luz ultravioleta. Este hito marcó el inicio de una nueva era en la manufactura aditiva, permitiendo la creación de estructuras tridimensionales con alto nivel de detalle a partir de modelos digitales. (31) Posteriormente, en 1993, investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) desarrollaron una impresora que funcionaba mediante la técnica de inyección de tinta, sentando las bases para métodos como el material jetting y el binder jetting, que ampliarían las posibilidades de impresión con nuevos materiales. (2)

Durante la década de los años 2000, la impresión 3D comenzó a utilizarse en aplicaciones biomédicas, especialmente en la creación de modelos anatómicos para planificación quirúrgica y guías personalizadas. Aunque inicialmente su uso fue limitado a prototipado rápido y procedimientos indirectos, este período marcó la transición del laboratorio al entorno clínico. (2) A partir de 2010, con el desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías como SLA y DLP (procesamiento digital de luz), se introdujo la impresión de resinas dentales específicas, ampliando su uso a la elaboración de férulas quirúrgicas, guías implantológicas, modelos ortodónticos y restauraciones provisionales. Estas tecnologías permitieron una mayor precisión en la fabricación de dispositivos intraorales, gracias a su capacidad para reproducir geometrías complejas con excelente ajuste marginal. (1)

Para el año 2015, la integración de la impresión 3D en los flujos de trabajo digitales odontológicos se consolidó con la incorporación de sistemas CAD/CAM. Este cambio permitió combinar el escaneo intraoral, el diseño computarizado y la manufactura aditiva en un solo proceso clínico y de laboratorio. A partir de esta integración, se logró reducir el tiempo de fabricación, mejorar la precisión de las restauraciones y aumentar la personalización de tratamientos restauradores. (4) En 2018, se marcó otro punto de inflexión con la introducción comercial de resinas reforzadas con partículas cerámicas destinadas a la fabricación de restauraciones definitivas. Estos materiales, diseñados específicamente para aplicaciones funcionales como coronas,

carillas e inlays/onlays, ofrecieron una mejora considerable en propiedades mecánicas como la resistencia flexural y compresiva, abriendo la posibilidad de su uso en sectores posteriores sometidos a cargas oclusales intensas. (1)

Durante el período 2020–2023, se publicaron múltiples estudios in vitro destinados a evaluar las propiedades físicas y mecánicas de las restauraciones impresas en 3D. Estas investigaciones compararon la resistencia compresiva, el módulo elástico, la resistencia a la fractura y la estabilidad dimensional de las resinas impresas frente a materiales tradicionales como los bloques fresados. Los resultados demostraron que, aunque las resinas impresas aún presentan ciertas limitaciones, pueden ofrecer comportamientos clínicamente aceptables cuando se optimizan parámetros como la orientación de impresión y el poscurado. (3,4) Finalmente, en 2024, se consolida una etapa en la que se reconoce que, si bien la impresión 3D en odontología ha alcanzado un grado alto de sofisticación, aún existen desafíos relacionados con la durabilidad a largo plazo, la conversión polimérica y la estandarización de protocolos clínicos. En consecuencia, el enfoque actual se dirige a mejorar las formulaciones de resinas, aumentar su resistencia mecánica y validar su uso a través de evidencia clínica robusta. (1)

5.2.2. Línea de tiempo de la evolución de las resinas de impresión 3D

La evolución de los materiales utilizados en impresión 3D ha sido determinante para su adopción en odontología clínica, especialmente en la fabricación de restauraciones temporales y definitivas. El desarrollo de resinas fotopolimerizables, base fundamental de tecnologías como estereolitografía (SLA), ha seguido una progresión marcada por hitos técnicos y avances en biocompatibilidad, estética y propiedades mecánicas. En los años 1990, las primeras resinas utilizadas en impresión 3D estaban orientadas al sector industrial, sin consideraciones específicas de biocompatibilidad o resistencia a ambientes intraorales. Estas formulaciones, aunque funcionales para el modelado rápido, no cumplían los requisitos necesarios para uso clínico dental, como la estabilidad dimensional, la resistencia a la compresión ni la inocuidad para los tejidos orales. (2)

El primer paso hacia una aplicación clínica se dio alrededor de 2005, cuando comenzaron a desarrollarse resinas dentales específicas para la impresión de modelos diagnósticos, férulas quirúrgicas y guías implantológicas. Estos materiales, aunque no estaban en contacto directo prolongado con tejidos orales, representaron un avance crucial hacia el uso odontológico de la impresión 3D. Estas resinas tempranas ofrecían una mejora en detalle, dureza superficial y precisión, pero aún carecían de las propiedades necesarias para soportar cargas funcionales elevadas. (2)

Entre 2012 y 2015, se lanzaron al mercado las primeras resinas biocompatibles diseñadas para restauraciones provisionales, tales como coronas temporales y carillas de corta duración. Estas formulaciones incluyeron monómeros más estables y rellenos inorgánicos que mejoraron significativamente la resistencia a la fractura, la adaptación marginal y la estética. Gracias a estos avances, la impresión 3D comenzó a competir con técnicas CAD/CAM sustractivas en la producción de prótesis temporales, al ofrecer mayor eficiencia y personalización. (4)

A partir de 2017, se produjo un cambio radical con la introducción de resinas reforzadas con partículas cerámicas, también conocidas como resinas ceramizadas. Estas resinas híbridas combinaron una matriz orgánica fotopolimerizable con relleno cerámico, mejorando la rigidez, la resistencia compresiva y la estabilidad cromática, y permitiendo por primera vez su indicación para restauraciones definitivas como coronas unitarias, inlays/onlays y carillas. Este desarrollo impulsó la impresión 3D hacia aplicaciones funcionales de mayor exigencia clínica. (1)

En el periodo 2020–2023, múltiples estudios in vitro analizaron el desempeño mecánico de estas nuevas resinas definitivas, comparándolas con materiales fresados y convencionales. Los resultados mostraron que, si bien las resinas impresas aún no alcanzan la resistencia de una cerámica como el disilicato de litio, presentan valores de resistencia compresiva entre 150 y 230 MPa, lo cual es adecuado para su uso en restauraciones de sectores posteriores bajo ciertas condiciones. (3) Finalmente, hacia 2024, el enfoque se ha centrado en optimizar el grado de conversión, mejorar la fotopolimerización postimpresión y minimizar

defectos estructurales como la porosidad, con el objetivo de extender su uso seguro y eficaz en la práctica clínica diaria. (1)

5.2.3. Línea de tiempo de la evolución de las restauraciones parciales adhesivas

Las restauraciones tipo overlay han surgido como una solución intermedia entre las restauraciones intracoronarias tradicionales y las coronas totales, dentro de un enfoque moderno y conservador de la odontología restauradora adhesiva. Su desarrollo está íntimamente ligado a la evolución de los materiales y técnicas adhesivas, así como a una comprensión más profunda de la biomecánica dental. En la década de 1970, se consolidó el uso de restauraciones indirectas como los inlays y onlays, que permitían restaurar dientes posteriores mediante técnicas conservadoras, evitando el desgaste extensivo que implicaban las coronas completas. Estas restauraciones respondían a la necesidad de tratamientos funcionales con un enfoque mínimamente invasivo. (32)

Durante los años 1980, la odontología adhesiva vivió un auge gracias al perfeccionamiento de los sistemas de grabado ácido y los adhesivos dentinarios, lo que amplió las posibilidades de adhesión confiable entre las resinas compuestas y los tejidos dentarios. Esto abrió paso a restauraciones parciales más extensas, que no solo rellenaban cavidades, sino que también cubrían cúspides debilitadas, optimizando la distribución del estrés oclusal. (32) Fue en los años 1990 cuando se formalizó el concepto clínico de overlay, entendido como una restauración indirecta parcial que cubre todas las cúspides del diente, pero sin abarcar toda su superficie externa como lo hace una corona. Esta solución permitió reforzar dientes con pérdida estructural significativa, sin la necesidad de realizar preparaciones circunferenciales. (29)

Con el advenimiento de las tecnologías CAD/CAM en la década del 2000, las restauraciones tipo overlay comenzaron a fabricarse con materiales de alto rendimiento como el disilicato de litio, que ofrecían excelente resistencia mecánica y propiedades ópticas superiores. Estas restauraciones fueron posibles gracias a la precisión en el escaneo digital y el fresado de bloques cerámicos, lo que aseguró un

ajuste marginal predecible y duradero.(16). Hacia el año 2015, con la introducción de la impresión 3D en odontología, comenzaron a fabricarse restauraciones tipo overlay provisionales mediante resinas fotopolimerizables impresas en tecnologías SLA y DLP, lo que ofreció una alternativa rápida y personalizada para evaluar función, estética y ajuste antes de cementar la restauración definitiva. (2)

El verdadero punto de inflexión ocurrió entre 2018 y 2022, con la aparición de resinas ceramizadas específicamente diseñadas para restauraciones definitivas. Estos materiales, como NextDent C&B y VarseoSmile Crown Plus, cuentan con aprobación para uso clínico prolongado, lo que abrió la posibilidad real de fabricar overlays definitivos mediante impresión 3D. (1)Desde 2023, varios estudios in vitro han comenzado a analizar la viabilidad mecánica de estos overlays impresos, centrándose en su resistencia compresiva, módulo elástico y comportamiento en carga cíclica, con resultados prometedores, aunque aún preliminares. (3) Actualmente, la investigación busca validar clínicamente estas restauraciones, considerando su potencial para convertirse en una opción funcional, estética y mínimamente invasiva en el tratamiento restaurador de dientes posteriores comprometidos. (29)

5.3. MARCO REFERENCIAL

El avance de la impresión tridimensional (3D) en el ámbito odontológico ha generado una transformación en los métodos de fabricación de restauraciones indirectas, particularmente mediante el uso de tecnologías aditivas como la estereolitografía (SLA) y el procesamiento digital de luz (DLP).(27) El desarrollo de nuevas resinas fotocurables y compuestos reforzados ha impulsado la necesidad de evaluar sus propiedades mecánicas, especialmente la resistencia compresiva, parámetro clave para asegurar la longevidad clínica de restauraciones sometidas a cargas oclusales. Este marco referencial se organiza de forma cronológica, analizando investigaciones relevantes desde una perspectiva crítica, enfocada en los materiales, métodos y

hallazgos sobre las propiedades mecánicas de resinas para impresión 3D en odontología.(33)

Kalsoom y colaboradores en el año 2016, realizaron una revisión sobre materiales compuestos imprimibles en 3D. Aunque el artículo tiene un enfoque general, abarca tecnologías como SLA y DLP, abordando la incorporación de nanopartículas y refuerzos en las matrices poliméricas. El estudio no cuenta con pruebas específicas en el ámbito odontológico ni mediciones de resistencia compresiva en contexto clínico, pero contribuye al conocimiento sobre cómo las propiedades mecánicas pueden mejorarse mediante estrategias de formulación de materiales. La principal limitación es su carácter generalista. (27)

Zimmerli y colaboradores en el año 2010, realizaron una revisión narrativa con el propósito de describir la composición, propiedades y aplicaciones clínicas de los materiales compuestos disponibles en el mercado dental. La muestra consistió en una revisión documental sin ensayo experimental directo. Se exploraron diversos tipos de resinas compuestas, incluyendo híbridas, nanocompuestas, ormoceras, siloranos y compómeros. El estudio, aunque no focalizado en impresión 3D, aporta fundamentos clave sobre los desafíos de la polimerización, resistencia mecánica y compatibilidad biológica. Entre los principales hallazgos destaca la mejora progresiva en las propiedades mecánicas de las resinas híbridas modernas, aunque persisten problemas como la contracción por polimerización y la liberación de monómeros. La revisión no presenta pruebas de laboratorio ni datos cuantitativos, lo que limita la capacidad de extrapolar resultados clínicos directos. (34)

En un estudio pionero, Park y colaboradores evaluaron la influencia de distintos agentes de acoplamiento silano sobre las propiedades interfaciales mecánicas de composites reforzados con fibra de vidrio. Aunque el trabajo no incluye materiales impresos en 3D, es fundamental en el entendimiento del comportamiento mecánico y adhesión en sistemas compuestos, particularmente en el contexto de las interacciones matriz-fibra. Se aplicaron pruebas de resistencia interlaminar al corte (ILSS) y tenacidad a la fractura (K_{IC}), estableciendo correlaciones con la energía

superficial. Una limitación clave es la antigüedad del estudio, que no refleja avances tecnológicos recientes. (35)

Torabi y colaboradores en el 2015 realizaron una revisión de 50 artículos centrada en las tecnologías de prototipado rápido en prostodoncia. Se abordaron métodos aditivos como SLA y su aplicación en guías quirúrgicas, estructuras protésicas y prótesis completas. Aunque no incluye ensayos mecánicos específicos, el artículo contextualiza el avance de la impresión 3D en odontología y su progresiva integración en el flujo de trabajo digital. Su principal limitación es el enfoque general y la falta de análisis de propiedades como la resistencia compresiva. (10)

Morimoto y colaboradores en el 2016 realizaron un metaanálisis donde evaluaron las tasas de supervivencia de inlays, onlays y overlays fabricados con cerámica o resina. Analizaron 15 artículos y si bien no incluyeron impresión 3D, sus datos permiten establecer criterios de comparación clínica para nuevos materiales dentales. Los resultados son útiles para comparar el rendimiento clínico esperado de restauraciones indirectas. Las tasas de supervivencia a 5 y 10 años fueron superiores al 90%. La principal debilidad radica en la ausencia de estudios sobre materiales impresos.(28)

Kalsoom y colaboradores en el 2016 presentaron una revisión sobre materiales compuestos diseñados para impresión 3D, haciendo énfasis en la mejora de propiedades mecánicas mediante refuerzos funcionales. El trabajo aporta fundamentos sobre el diseño de formulaciones poliméricas resistentes. Aunque el artículo tiene un enfoque general, abarca tecnologías como SLA y DLP, abordando la incorporación de nanopartículas y refuerzos en las matrices poliméricas. El estudio no cuenta con pruebas específicas en el ámbito odontológico ni mediciones de resistencia compresiva en contexto clínico, pero contribuye al conocimiento sobre cómo las propiedades mecánicas pueden mejorarse mediante estrategias de formulación de materiales. La principal limitación es su carácter generalista.(27)

Saini y colaboradores en el 2020 investigaron la influencia de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas de una resina fotopolimerizable fabricada por estereolitografía (SLA). Se evaluaron cinco orientaciones diferentes (0°, 22.5°, 45°, 67.5°, y 90°) aplicando pruebas de tracción, compresión, flexión, impacto, fatiga y vibración. Los resultados indicaron que la orientación de 67.5° ofreció la mayor resistencia a la compresión. Este hallazgo es sumamente relevante para optimizar la dirección de impresión en aplicaciones clínicas. La principal limitación del estudio es la falta de especificidad sobre el tipo exacto de resina empleada. (14)

Della Bona y colaboradores en el 2021 realizaron una revisión sistemática sobre materiales restauradores impresos por estereolitografía (SLA) en odontología. Analizaron 48 estudios, con énfasis en materiales poliméricos, aunque también incluyeron cerámicas. Entre las propiedades evaluadas en los artículos revisados, se encuentra la resistencia (incluyendo compresiva), la precisión dimensional, y la morfología superficial. La mayoría de estudios eran pruebas de concepto, y solo cinco incluían aplicaciones clínicas. Como hallazgo central, se destaca el potencial de la impresión SLA para restauraciones dentales, aunque aún existen limitaciones relacionadas con la resistencia al desgaste, precisión en ambientes húmedos y propiedades estéticas. La ausencia de ensayos clínicos a gran escala representa una limitación significativa. (36)

Zhao y colaboradores en el 2021 desarrollaron un material híbrido de alta viscosidad para impresión 3D destinado a coronas dentales, utilizando impresión por extrusión directa, no SLA. Se combinaron monómeros acrílicos con partículas inorgánicas multiescalares. La muestra consistió en cuerpos impresos y curados con orientación cruzada. Las pruebas incluyeron resistencia a la flexión (hasta 145,5 MPa) y resistencia compresiva ($323,6 \pm 5,6$ MPa). Estos valores indican un rendimiento mecánico superior respecto a materiales moldeados convencionalmente. Aunque no se usó SLA, el enfoque experimental y resultados obtenidos son extrapolables conceptualmente al objetivo del presente trabajo. La principal limitación fue la falta de pruebas clínicas. (37)

El grupo liderado por Grzebieluch en el año 2021 comparó materiales CAD/CAM (mecanizados) con resinas impresas en 3D como VarseoSmile Crown plus. Se evaluaron resistencia a la flexión, módulo elástico y dureza Vickers. El material impreso mostró menor resistencia y módulo elástico (σ_f : 118.96 MPa para Enamic vs. 118 MPa para VarseoSmile), lo cual se atribuye al menor contenido de relleno (24% en resinas impresas vs. 70–80% en bloques). La fractografía reveló fracturas típicas de materiales frágiles. Este estudio es altamente pertinente, aunque limitado por la falta de pruebas compresivas.(23)

Al-Qahtani y colaboradores en este estudio publicado en el año 2021 compararon las propiedades superficiales y mecánicas (dureza y resistencia a la flexión) de resinas fabricadas mediante técnicas convencionales, CAD-CAM y 3D printing. Los resultados mostraron que las resinas impresas en 3D tienen dureza comparable y resistencia a la flexión similar a las CAD-CAM, pero con mayor rugosidad superficial. Aunque no se evaluó resistencia compresiva, el artículo proporciona una visión comparativa valiosa. La falta de orientación específica hacia aplicaciones definitivas y a largo plazo es una limitación.(8)

Chen et al. En el 2022 evaluaron la resistencia compresiva de biomateriales compuestos de PEGDA con nanopartículas de hidroxiapatita (nHAP) impresos mediante SLA. La muestra consistió en estructuras impresas con diferentes proporciones de PEGDA/nHAP. Se aplicó una metodología experimental rigurosa que incluyó un diseño experimental uniforme para optimizar parámetros de curado y contenido de sólidos. Los resultados mostraron una resistencia compresiva máxima de $61,0 \pm 3,9$ MPa, significativamente superior al PEGDA puro. Este estudio es especialmente relevante, pues valida experimentalmente la viabilidad de materiales compuestos impresos por SLA con propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones biomédicas. Como limitación, no se evaluó el comportamiento en condiciones intraorales reales.(38)

Masciotti en el año 2022 realizó junto a su equipo un metaanálisis que comparó las propiedades mecánicas de materiales protésicos impresos en 3D, fresados y

convencionales. Aunque la resistencia compresiva no fue evaluada directamente, se observó que las resinas impresas presentan valores inferiores de resistencia a flexión y dureza en comparación con los materiales fresados. Se destaca la necesidad de más estudios clínicos para validar su uso en restauraciones definitivas. (4)

Valvez y colegas analizaron en el año 2022 el comportamiento compresivo de compuestos de PETG impresos por FFF, reforzados con fibras de carbono o Kevlar. Aunque el material no es de uso dental, la metodología es pertinente. Se encontró que la adición de Kevlar reduce significativamente la resistencia compresiva, mientras que el carbono mejora el módulo elástico. El estudio es útil para extrapolar estrategias de refuerzo aplicables a matrices dentales. (39)

Pantea y colaboradores realizaron en el año 2022 un estudio que comparó la resistencia compresiva y flexural de resinas impresas y convencionales para prótesis dentales provisionales. Se utilizaron cuatro resinas (dos impresas y dos convencionales), observándose que las impresas presentaron mayor módulo elástico y resistencia flexural. Este resultado apoya el uso de impresión 3D en aplicaciones temporales, aunque la falta de envejecimiento acelerado o simulación de cargas cíclicas es una limitación destacable.(3)

Paradowska-Stolarz y colaboradores en el 2022 compararon el módulo de compresión y tracción de dos resinas dentales impresas (BioMed Amber y Dental LT Clear). Las pruebas se realizaron según normas ISO. Ambos materiales mostraron alta resistencia y rigidez, aunque BioMed Amber fue más resistente a la compresión, mientras que Dental LT Clear destacó en tracción. Este artículo es directamente relevante para el presente estudio, aportando datos cuantitativos útiles para análisis comparativo. Su limitación es la baja diversidad de materiales analizados. (40)

Farkas et al. En el 2023 evaluaron la influencia de la orientación y espesor de capa de impresión sobre las propiedades de tracción y compresión de una resina DLP (NextDent C&B MFH). La impresión a 0,05 mm ofreció mejores propiedades

mecánicas. El comportamiento frágil se mantuvo independiente de la orientación. Este estudio proporciona información esencial sobre parámetros de impresión que afectan directamente la resistencia de estructuras SLA/DLP. Limita su aplicabilidad clínica por ser un estudio in vitro. (5)

Paradowska-Stolarz y colaboradores en otro estudio pero en el año 2023, se analizaron tres resinas impresas en 3D sometidas a compresión, incluyendo análisis de textura y dimensión fractal. BioMed Amber mostró la mayor estabilidad mecánica; IBT presentó la mayor deformación. Se concluyó que existen diferencias significativas en las propiedades biomecánicas entre resinas, lo que limita su uso indistinto. Este trabajo es particularmente valioso por combinar análisis mecánico y morfológico post-compresión. (6)

Kim y Song en el 2023 compararon la resistencia a la fractura de una resina para coronas temporales impresa en 3D con diferentes espesores de capa (0,01, 0,05 y 0,15 mm). Los resultados mostraron que a mayor espesor de capa, menor resistencia. La capa de 0,01 mm mostró la mayor resistencia a fractura, con diferencias estadísticamente significativas frente a 0,15 mm. Este estudio tiene aplicación directa en la optimización de parámetros de impresión para maximizar la resistencia compresiva. (15)

Prause y colaboradores en el 2023 compararon resinas compuestas impresas en 3D con materiales fresados para restauraciones definitivas. La resina 3D presentó la menor resistencia a la flexión (σ_{in} : $83,6 \pm 18,5$ MPa) y fatiga (σ_{ff} : $37,4 \pm 23,8$ MPa), con mayor degradación relativa de resistencia. Se observó que defectos microestructurales actúan como puntos de fractura. Este estudio refuerza la necesidad de optimizar la homogeneidad de las mezclas previas a impresión. Su principal limitación es la ausencia de pruebas compresivas directas. (33)

Rezaie y colaboradores en el 2023 realizaron una revisión sobre las aplicaciones actuales y emergentes de la impresión 3D en prótesis dentales. Se discuten distintas

técnicas de impresión y materiales como polímeros, cerámicas y metales. Aunque no se presentan datos experimentales, el artículo menciona los retos actuales relacionados con la resistencia mecánica, biocompatibilidad y estabilidad dimensional, reafirmando la necesidad de validación clínica de las resinas 3D. (2)

Veeman y Palaniyappan en el 2023 en un estudio exploraron la resistencia compresiva de un composite de ácido poliláctico (PLA) reforzado con cáscara de almendra, impreso mediante FDM. Aunque el material y la técnica (FDM) no son de uso directo en odontología, la metodología de optimización es altamente relevante. Se evaluaron 27 combinaciones de parámetros (patrón de relleno, densidad de relleno, orientación de impresión, velocidad y temperatura) mediante un diseño de Taguchi. El mayor impacto en la resistencia compresiva lo tuvo la orientación de impresión y la densidad de relleno, alcanzando hasta 36.8 MPa. Este trabajo ofrece valiosos lineamientos para la optimización de impresión 3D, aplicables también a resinas dentales si se considera una extrapolación metodológica. Como limitación, no se estudió ningún material clínicamente aprobado. (41)

Pot y colaboradores en el año 2024 realizaron una revisión exploratoria evaluó las propiedades mecánicas de resinas compuestas para restauraciones definitivas impresas por técnicas aditivas. Se analizaron 14 estudios centrados en resistencia compresiva, flexión, dureza y módulo elástico de materiales como VarseoSmile Crown Plus y Crowntec. Se concluyó que las resinas 3D aún no alcanzan los estándares de uso permanente. La escasez de estudios clínicos y el bajo nivel de evidencia constituyen las principales limitaciones.(1)

Jeong y colaboradores en el 2024 publicaron una revisión narrativa que aborda las tecnologías de impresión 3D en odontología, incluyendo materiales fotocurables usados en SLA y DLP. Aunque no se reportan pruebas de resistencia compresiva, se destacan los avances en materiales y su integración en disciplinas como prótesis, ortodoncia e implantología. Este artículo establece un marco conceptual útil para contextualizar los desarrollos tecnológicos y materiales en impresión 3D. (42)

Espinar y colaboradores en el 2024 estudiaron la influencia de la orientación de impresión en las propiedades mecánicas (módulo elástico y resistencia a la flexión) de resinas dentales impresas con tecnologías SLA y DLP. Se utilizaron cuatro tipos de resinas, en dos orientaciones (0° y 90°), con posterior envejecimiento en agua durante 14 días. Las pruebas consistieron en ensayos de flexión de tres puntos. Se concluyó que la orientación de impresión no tuvo un efecto estadísticamente significativo, pero el tipo de tecnología sí influyó en la topografía superficial. Aunque no se evaluó directamente la resistencia compresiva, el estudio es pertinente para establecer parámetros de impresión que no comprometan el rendimiento mecánico de las restauraciones. Su principal limitación es la ausencia de otras cargas mecánicas (compresión, impacto). (43)

6. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia compresiva de restauraciones definitivas tipo overlay fabricadas en resinas de impresión 3D.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar la resistencia compresiva de las restauraciones tipo overlay de resina de impresión 3D realizadas con resina VarseoSmileCrown, por medio de una máquina universal de ensayos.
2. Identificar la resistencia compresiva de las restauraciones tipo overlay de resina de impresión 3D realizadas con resina P-CROWN V3 por medio de una máquina universal de ensayos.
3. Comparar la resistencia compresiva de los dos grupos de estudio de resina de impresión 3D en las restauraciones tipo overlay por medio de la aplicación de pruebas estadísticas.

7. ASPECTOS METODOLÓGICOS

7.1. Tipo de estudio

Estudio de investigación aplicada, cuantitativa, experimental, comparativa, in vitro.

7.2. Objeto de estudio

Restauraciones definitivas tipo Overlay en resina de impresión 3D con dos marcas comerciales y sus propiedades de resistencia al aplicar fuerzas compresivas.

7.3. Material objeto de estudio

Resinas impresas 3D

7.4. Unidad de observación

Unidad de fuerza: N (Newton)

7.5. Características de la muestra

7.5.1. Población de estudio

Restauraciones en resina impresa tipo Overlay sobre un primer molar inferior izquierdo.

7.5.2. Muestra

3 grupos, cada uno de 21 especímenes.

El tamaño de la muestra se determinó por medio del software estadístico R para Windows versión 2024, teniendo en cuenta un error de 0,4, una potencia de 80% y una confianza del 95%, obteniendo una muestra de N=21 overlays por grupo, las cuales fueron divididas en 2 grupos así:

- **Grupo 1:** (n=21) restauración overlay elaborada en resina impresa marca VarseoSmileCrown plus de Bego.
- **Grupo 2:** (n=21) restauración overlay elaborada en resina impresa marca P-CROWN V3 de Senertek.

- **Grupo 3:** (n=21) restauración overlay elaborada en resina maquinable marca CRIOS de Coltene.

7.5.6. Criterios de selección

7.5.6.1. Criterios de inclusión

- Restauraciones tipo overlay realizadas en resina de impresión 3D en VarseoSmileCrown plus de Bego
- Restauraciones tipo overlay realizadas en resina de impresión 3D en P-CROWN V3
- Restauraciones con espesor de 2mm

7.5.6.2. Criterios de exclusión

- Restauraciones con defectos de fabricación
- Restauraciones con defectos producto del proceso de ajuste y pulido

7.5.7. Procedimiento

El presente estudio fue de tipo experimental in-vitro, de la línea de investigación biomateriales y procesos de laboratorio dental, realizado en el laboratorio de la Fundación Universitaria CIEO-UniCIEO.

Como muestra inicial, se utilizó un primer molar inferior derecho, el cual fue preparado para recibir una restauración tipo **overlay**. Esta preparación fue revisada y aprobada por el Dr. Johann Pabuena, especialista en Prostodoncia, quien verificó que cumpliera con las dimensiones requeridas para una restauración parcial adhesiva tipo overlay. Posteriormente, se escaneó la preparación y se obtuvo un archivo STL, a partir del cual se imprimieron dos muestras con la preparación dental.

1. Estas muestras fueron utilizadas para realizar una prueba piloto y calibrar las impresoras según la resina correspondiente. (Fig. 2). Un gold estándar con --- años de experiencia y formación en prostodoncia evaluó la calidad de las pruebas piloto para estandarizar la calidad de las restauraciones impresas.

2. Previa autorización del asesor científico se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

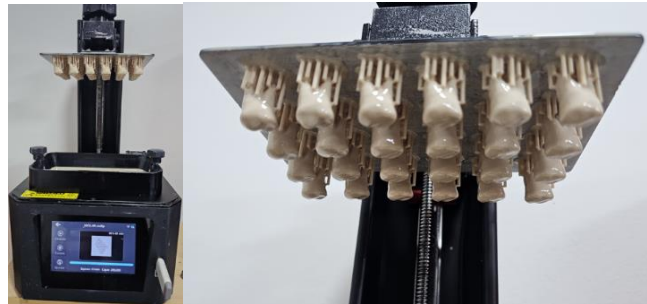
Fig. 2 Diseño de prototipo



Fuente: (Dr. Pabuena 2024)

3. Impresión de prototipo en resina de impresión 3D AQUA VANILLA de PHROZEN de Gama Alta Dental. (Fig. 2 y 3)

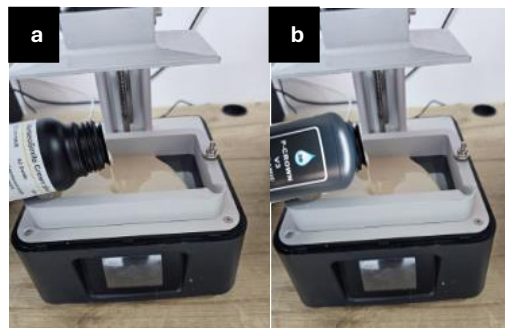
Fig. 3 Impresión de prototipos



Fuente: Elaboración propia

4. Calibración de resinas de impresión 3D (VarseoSmileCrown plus de Bego, y P-CROWN V3). (Fig. 4)

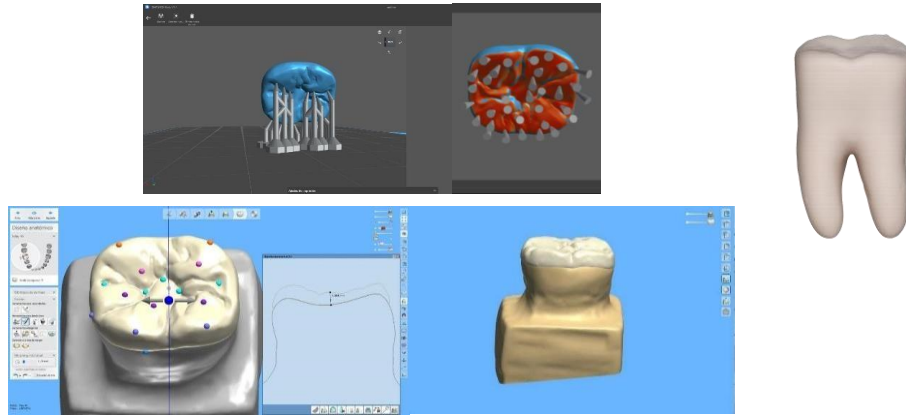
Fig. 4 Calibración resina VarseoSmileCrown y p-Crown V3



Fuente: Elaboración propia. (a) VarseoSmileCrown (b) P-Crown V3

5. Estandarización del prototipo con preparación para restauración indirecta tipo Overlay. (Fig. 5)

Fig. 5 Estandarización y preparación del prototipo



Fuente: Dra. Rivas y col (2023)

6. Escaneo del prototipo estandarizado con escáner Shinning Aoralscan 3 y envío del archivo STL para impresión.
7. Encofrado de prototipo en acrílico transparente realizando simulación del ligamento periodontal con silicona de adición consistencia liviana. (Fig. 5)

Fig. 5 Simulación de ligamento periodontal y encofrado de prototipo



Fuente: Elaboración propia

8. Tratamiento de superficie del prototipo mediante Oxido de Aluminio 50 micras a 2,5 bares de presión. (Fig. 6)

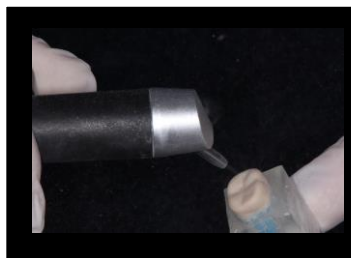
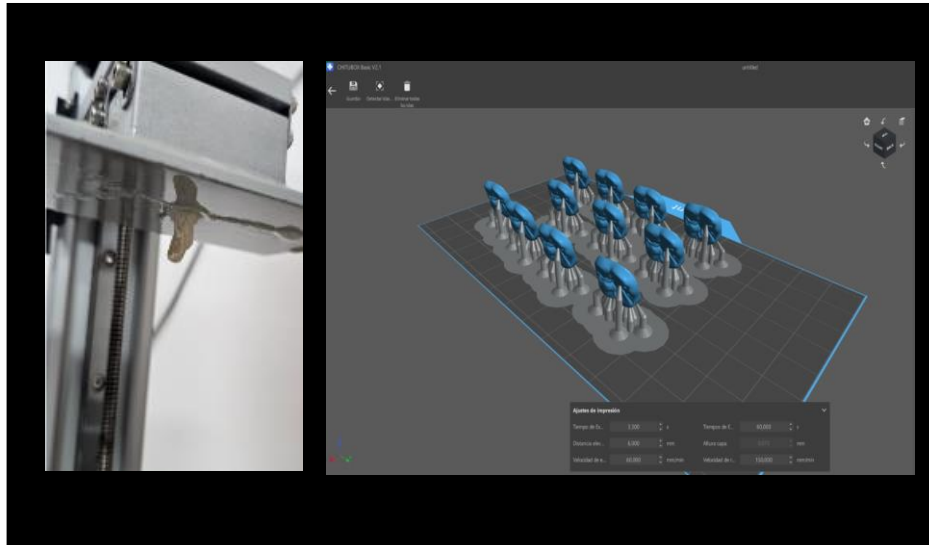


Fig. 6 Arenado del prototipo

Fuente: Elaboración propia

9. Impresión de restauraciones mediante estereolitografía con impresora SHINING ACCUFAB L4K de las diferentes marcas de resina de impresión 3D (VarseoSmileCrown plus de Bego, y P-CROWN V3). (Fig. 7)

Fig. 7 Impresión y diseño de las restauraciones



Fuente: Elaboración propia

10. Tratamiento de superficie de la restauración con Oxido de Aluminio 50 micras a 2,5 bares de presión. (Fig. 8)

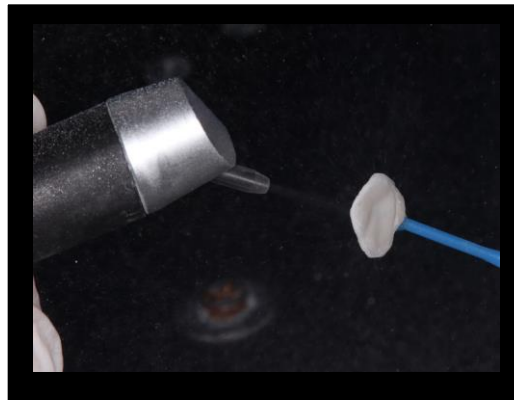
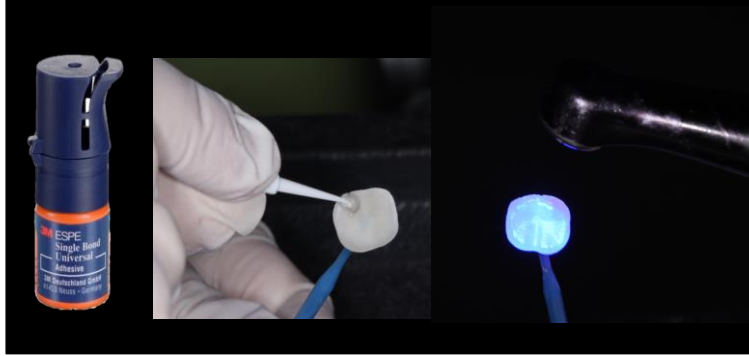


Fig. 8 Arenado de las restauraciones

Fuente: Elaboración propia

11. Aplicación de agente adhesivo Single Bond Universal de 3M (Fig. 9)

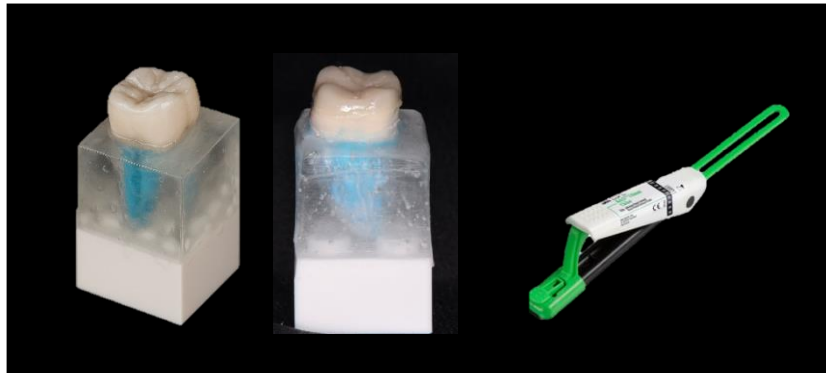
Fig. 9 Técnica adhesiva de las restauraciones



Fuente: Elaboración propia

12. Cementación con cemento adhesivo de curado dual Relyx Ultimate. (Fig 10)

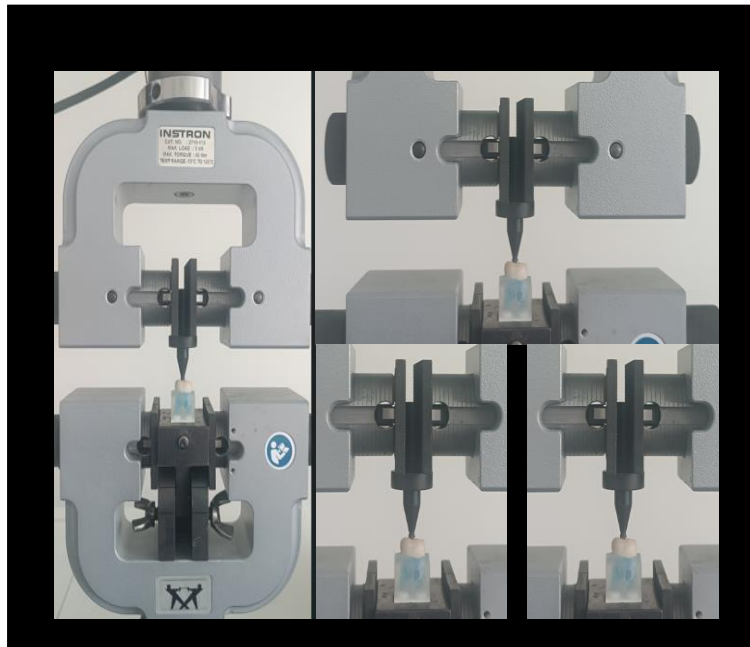
Fig. 10 Cementación de las restauraciones



Fuente: Elaboración propia

13. Evaluación de la resistencia compresiva mediante la norma ISO 604 en una máquina universal de ensayos Instron 3366 (Fig. 11)

Fig. 11 Prueba compresiva



14. Se diseñó una tabla en Excel para la recolección de la información y exportación de los valores obtenidos según cada cuerpo de prueba, se registraron en N (Newtons).
15. Análisis de los datos para identificar cuál resina presentó la mayor compresiva mediante el método estadístico ANOVA mediante el software SPSS.

7.5.8. Variables

7.5.8.1. Variable(s) dependiente(s)

Resistencia compresiva de las restauraciones definitivas tipo overlay en resina de impresión 3D

7.5.8.2. Variable independiente

Resina impresa VarseoSmileCrown plus de Bego, resina impresa V3 P-Crown de Senertek y resina fresada CRIOS de Coltene.

7.5.8.3. Variable de confusión

No presenta

7.5.9. Lugar de investigación

Institución Universitaria Colegios de Colombia.

7.5.10. Archivo de datos y sistematización

La información se manejará en bases de datos de Excel las cuales se organizarán en carpetas y en las nubes virtuales.

8. ASPECTOS ÉTICOS

Este estudio es un estudio experimental in vitro en el cual no se utilizaron muestras de procedencia humana o animal por tal razón no tiene ningún tipo de compromiso ético.

9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Tabla 1. Datos estadísticos descriptivos de la resistencia compresiva en restauraciones tipo overlay para los tres grupos de resina evaluados

	Grupo1: Resina BEGO (N)	Grupo2: Resina V3 (N)	Grupo3: Disilicato (N)
Promedio	1100,08	1040,08	814,38
Desviación estándar	180,97	176,07	140,97
Máximo	1415,33	1446,84	1045,89
Mínimo	734,64	789,08	544,84
IQR	224,64	183,10	233,22

Tabla 2. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los grupos experimentales de resinas evaluadas

	Grupo1: Resina BEGO (N)	Grupo2: Resina V3 (N)	Grupo3: Disilicato (N)
W-stat	0,95	0,94	0,94
p-value	0,41	0,17	0,19

El tamaño de la muestra se determinó por medio del software estadístico R para Windows versión 4 del 2025, teniendo en cuenta un error de 0,4, una potencia de 80% y una confianza del 95%, obteniendo una muestra de N=21 overlays por grupo, las cuales fueron divididas en 2 grupos así: Grupo 1: (n=21) restauración overlay elaborada en resina impresa marca VarseoSmileCrown plus de Bego. Grupo 2: (n=21) restauración overlay elaborada en resina impresa marca P-CROWN V3 de Senertek. Grupo 3: (n=21) restauración overlay elaborada en resina maquinable marca CRIOS de Coltene.

Análisis estadístico descriptivo univariado: Se ejecutó la prueba de Shapiro Wilk, para determinar la distribución de los datos. Debido a que su distribución fue normal se utilizaron medidas paramétricas para resumir y contrastar resultados. (Tabla 1 y 2)

Análisis inferencial: Teniendo en cuenta los tres aspectos necesarios para realizar el análisis estadístico:

- El número de grupos
- Distribución de los datos de la variable
- Homocedasticidad u homogeneidad de la muestra

Se realizó la prueba de ANOVA para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas. La prueba nos determinó que sí existían por lo que se realizó la prueba post-hoc (tukey) para analizar entre cuáles de los tres grupos existían las diferencias, lo que nos permitió observar que entre el grupo 1 y 2 no existieron diferencias, pero entre el grupo 1 y el grupo 3 y entre el grupo 2 y el grupo 3 sí existían diferencias estadísticamente significativas. (Tabla 3)

Tabla 3. Diferencias de medias y significancia estadística entre grupos experimentales y control según prueba de Tukey HSD/Kramer

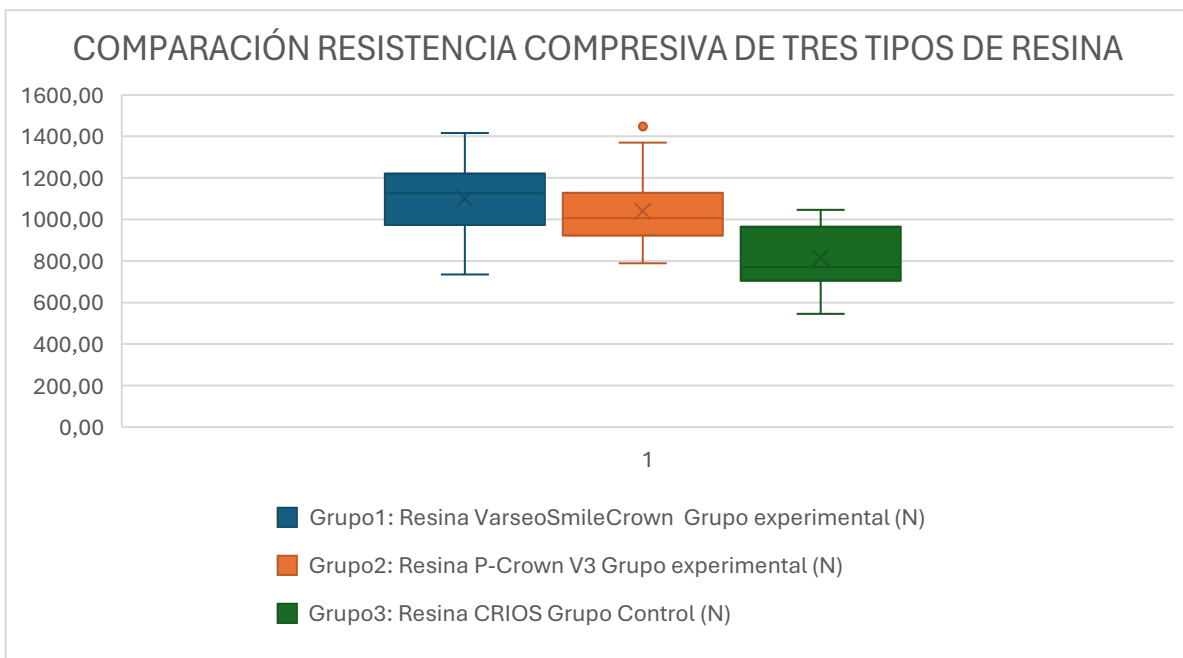
Grupo 1	Grupo 2	Promedio
Grupo1: Resina VarseoSmileCrown (N) Grupo experimental	Grupo2: Resina P-Crown V3 (N) Grupo experimental	60,0
Grupo1: Resina VarseoSmileCrown (N) Grupo experimental	Grupo3: Resina CRIOS (N) Grupo Control	285,7
Grupo2: Resina P-Crown V3 (N) Grupo experimental	Grupo3: Resina CRIOS (N) Grupo Control	225,7

10. RESULTADOS

11. *Tabla 4. Comparación de medias mediante la prueba de Tukey HSD/Kramer para la resistencia compresiva de restauraciones tipo overlay con tres tipos de resina*

	N	Promedio	Error Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo	IQR	SW p-value
Grupo1 Resina impresa VarseoSmileCrown De Bego Grupo experimental (N)	21	1100,1	39,5	1126,6	1415,3	734,6	224,6	0,414
Grupo 2 Resina impresa P-Crown V3 De Senertek Grupo experimental (N)	21	1040,1	38,4	1006,5	1446,8	789,1	183,1	0,175
Grupo 3 Resina maquinable CRIOS de Coltene Grupo Control (N)	21	814,4	30,8	769,9	1045,9	544,8	233,2	0,186

Fig 13. *Comparación de la resistencia compresiva de restauraciones tipo overlay elaboradas con resinas VarseoSmileCrown, P-Crown V3 y CRIOS*



El análisis de la resistencia compresiva de tres tipos de resinas dentales — VarseoSmile Crown (Grupo 1), P-Crown V3 (Grupo 2) y CRIOS (Grupo 3, grupo control)— permitió identificar diferencias significativas en el comportamiento mecánico de los materiales evaluados. La interpretación de estos resultados se fundamenta en los análisis estadísticos realizados y en la representación gráfica mediante un diagrama de cajas (Figura 13), que proporciona una visualización clara de la distribución y dispersión de los datos obtenidos.

El diagrama de cajas evidencia diferencias notables entre los grupos. El Grupo 1, correspondiente a la resina VarseoSmile Crown, presentó los valores más elevados de resistencia compresiva, con una mediana próxima a los 1100 N y un rango intercuartílico (RIQ) que se extiende aproximadamente entre 950 N y 1250 N. Se registraron valores máximos cercanos a los 1400 N y un valor mínimo inferior a 800 N. La media, representada por el símbolo “X”, se ubicó ligeramente por encima de la mediana, lo que sugiere una leve asimetría positiva.

El Grupo 2, asociado a la resina P-Crown V3, también mostró un rendimiento mecánico elevado. Su mediana se situó en torno a los 1050 N, con un RIQ que abarca desde aproximadamente 900 N hasta 1200 N. Se identificaron valores atípicos (outliers) por encima de los 1400 N, indicando una mayor variabilidad individual. En este grupo, la media también se posicionó levemente por encima de la mediana, lo cual refleja una distribución relativamente simétrica.

En contraste, el Grupo 3, correspondiente a la resina CRIOS, evidenció la menor resistencia compresiva entre los grupos analizados. La mediana se aproximó a los 850 N, con un RIQ comprendido entre 700 N y 1000 N. No se identificaron valores atípicos y tanto la media como la mediana fueron considerablemente menores en comparación con los grupos experimentales. Estos resultados se detallan en la Tabla 1, donde se presentan los estadísticos descriptivos de cada grupo.

Las pruebas de Shapiro-Wilk normality test W cercano a 1 indica que los datos son cercanos a una distribución normal. Para el grupo1 $W = 0.92629$, $p\text{-value} = 0.2142$, grupo2: $W = 0.94873$, $p\text{-value} = 0.4658$, grupo3: $W = 0.94456$, $p\text{-value} = 0.3573$.

El análisis de varianza (ANOVA) evidenció la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos evaluados ($p < 0,05$), lo que justifica la aplicación de pruebas post hoc para identificar cuáles grupos difieren entre sí (Tabla 2).

Los análisis estadísticos mediante la prueba de Tukey HSD/Kramer confirmaron estas observaciones. Se detectó una diferencia media de 285,70 N entre el Grupo 1 y el Grupo 3, con un valor de $p < 0,00001$ y un tamaño del efecto (Cohen's d) de 1,71, lo cual representa una diferencia altamente significativa. Entre el Grupo 2 y el Grupo 3, la diferencia media fue de 225,70 N ($p = 0,00014$; Cohen's $d = 1,35$), también estadísticamente significativa. Por el contrario, la comparación entre el Grupo 1 y el Grupo 2 arrojó una diferencia media de 60,00 N, sin significancia estadística ($p = 0,4788$), con un tamaño del efecto menor (Cohen's $d = 0,36$). Estos resultados se resumen en la Tabla 3 y se amplían con los valores de tamaño del efecto en la Tabla 4.

Estos hallazgos permiten concluir que las resinas impresas VarseoSmile Crown y P-Crown V3, ambas fabricadas mediante estereolitografía (SLA), presentan una resistencia compresiva significativamente superior respecto a la resina CRIOS, desarrollada con tecnología CAD/CAM. Aunque esta última está diseñada para restauraciones definitivas, sus propiedades mecánicas fueron superadas por ambas alternativas impresas. La ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los grupos 1 y 2 sugiere una equivalencia funcional entre estas dos resinas impresas bajo condiciones de carga compresiva.

En conjunto, los datos obtenidos respaldan la viabilidad clínica de las resinas compuestas impresas mediante SLA como materiales resistentes y eficaces para

restauraciones funcionales, especialmente en contextos de rehabilitación que requieren un elevado desempeño mecánico.

12. DISCUSIÓN

En el presente estudio se evaluó la resistencia compresiva de restauraciones tipo overlay elaboradas con tres materiales restauradores de base compuesta, fabricados mediante tecnologías digitales: dos resinas impresas mediante estereolitografía (Grupo 1: VarseoSmileCrown de Bego; Grupo 2: P-Crown de Senertek) y una resina compuesta maquinable (Grupo 3: Brilliant CRIOS de Coltene). Considerando el creciente uso clínico de las tecnologías de fabricación aditiva en odontología restauradora, el objetivo de este estudio fue comparar el comportamiento mecánico de estos materiales bajo carga compresiva, mediante el uso de una máquina de ensayos universal, hasta llegar al punto de fractura. La prueba de resistencia a la compresión permitió identificar diferencias significativas entre los grupos, siendo las resinas impresas las que mostraron mejor desempeño frente a cargas compresivas.

Los resultados obtenidos mostraron que las resinas impresas (G1 y G2) presentaron una resistencia significativamente mayor que la resina maquinada (G3). En particular, la resina BEGO obtuvo la mayor resistencia compresiva media ($1100,1 \pm 180,9$ N), seguido por el grupo 2 (P-Crown) con $1040,1 \pm 176,1$ N, y en tercer lugar el grupo 3 (CRIOS) con $814,4 \pm 140,9$ N. La prueba ANOVA indicó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p < 0,001$), y las comparaciones post hoc (Tukey HSD) confirmaron que dichas diferencias eran significativas entre los grupos de resinas impresas y el grupo de resina maquinada. Sin embargo, no se hallaron diferencias significativas entre los dos materiales impresos.

Este comportamiento contrasta parcialmente con la literatura previa que históricamente ha reportado una superioridad mecánica de los materiales CAD/CAM sobre los impresos. No obstante, recientes investigaciones han evidenciado un cambio en esta tendencia debido a un avance en las propiedades mecánicas de las resinas impresas. En una revisión sistemática realizada en el 2024 por Pot y colaboradores, concluyeron que ciertos composites impresos mediante SLA, como VarseoSmile Crown Plus, han alcanzado valores de resistencia flexural, módulo

elástico y dureza que los posicionan como candidatos viables para restauraciones indirectas definitivas, pudiendo ser comparables a materiales maquinados, aunque aún se requieren más estudios clínicos para validar su comportamiento a largo plazo. En este sentido, la composición cerámica de los materiales impresos es un factor determinante: en el caso de P-Crown, el fabricante reporta una carga cerámica del 65%, lo que puede explicar su comportamiento mecánico favorable.

Pantea y colaboradores en el 2022 también encontraron que las resinas impresas para prótesis provisionales exhiben módulos elásticos y resistencia flexural superiores en comparación con resinas convencionales curadas por calor o autopolimerización, lo cual se traduce en una mejor homogeneidad estructural y desempeño bajo carga. (3)

Por su parte, Masciotti et al. (2022), en un metaanálisis comparativo entre materiales impresos, maquinados y convencionales, concluyeron que los materiales fabricados aditivamente han alcanzado niveles de resistencia que permiten su uso clínico, especialmente en restauraciones temporales y en sectores posteriores no sometidos a estrés extremo, aunque recomiendan precaución hasta que se disponga de más evidencia in vivo. (4)

Desde el punto de vista tecnológico, Jeong y colaboradores destacan que los métodos de impresión 3D como SLA y DLP permiten obtener estructuras con alta precisión y control de diseño, y que su desarrollo ha traído consigo la aparición de nuevos materiales compuestos con propiedades mecánicas mejoradas, permitiendo ampliar su uso en odontología restauradora y prostodóntica. (42)

Es importante resaltar que no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las dos resinas impresas (BEGO y P-Crown). Esto sugiere que, desde el punto de vista mecánico, ambas ofrecen un comportamiento comparable, lo que otorga al clínico mayor flexibilidad en la elección del material, considerando otros factores como estética, disponibilidad y costos.

Asimismo, estudios como el de Mohammed y colaboradores en el 2023 han señalado que, aunque las restauraciones impresas pueden mostrar una menor resistencia al desgaste frente a antagonistas naturales o metálicos, su comportamiento compresivo puede ser optimizado mediante mejoras en el diseño, orientación de impresión y post-curado. (24)

No obstante, algunos autores advierten limitaciones importantes. Pot y colaboradores en el 2024, señalan que, aunque ciertas resinas impresas han mostrado buenos resultados en pruebas in vitro, todavía no se consideran primera elección para restauraciones definitivas debido a la escasa evidencia clínica acumulada. (1) Asimismo, Saini en el 2020 demostró que las muestras impresas en orientación diagonal ($67,5^\circ$) alcanzan mayores resistencias compresivas y flexurales debido a la distribución de esfuerzos entre capas de fotopolimerización (14) y Cresswell-Boyes en el 2022 remarca que la orientación de impresión, el tipo de resina y el protocolo de postcurado son variables críticas que afectan directamente las propiedades mecánicas del material final. (44) Esto resalta la importancia de estandarizar protocolos clínicos y laboratoriales para garantizar el comportamiento esperado de estos materiales.

Por su parte, la resina maquinada CRIOS mostró valores inferiores, lo cual podría atribuirse a su formulación orientada a imitar las propiedades biomecánicas de la dentina, según lo indica el fabricante en su ficha técnica oficial. Esta resina está compuesta por una matriz de resina reforzada con vidrio de bario y materiales como UDMA, BIS-GMA y sílice amorfa, con una intención biomimética que prioriza elasticidad, resiliencia y comportamiento reparable frente a cargas funcionales buscando replicar el comportamiento biomecánico de los tejidos dentales, especialmente la dentina. Esta decisión de diseño se orienta hacia una respuesta más elástica y amortiguadora frente a cargas masticatorias, a costa de una resistencia absoluta menor. (23)

Este enfoque biomimético encuentra respaldo clínico en un metaanálisis realizado por Morimoto y col. En el 2016, en el cual reportaron tasas de supervivencia clínica de restauraciones de resina superiores al 90% a cinco años, pese a su menor resistencia inicial, debido a su patrón de fractura menos catastróficos y su mejor absorción de fuerzas en comparación con materiales cerámicos. (28)

Los resultados de este estudio sugieren que las resinas impresas mediante estereolitografía SLA pueden ser una alternativa confiable y eficiente para restauraciones tipo overlay en sectores posteriores. Su resistencia compresiva fue igual o superior a la del material maquinado evaluado, lo que indica una adecuada capacidad para soportar cargas funcionales, lo que puede además traducirse en una mayor longevidad funcional y menor riesgo de fractura, incluso frente a cargas masticatorias intensas. Esta capacidad, sumada a las ventajas logísticas y económicas de la impresión 3D, puede contribuir a tratamientos más accesibles y personalizados para los pacientes.(27)

Además, las ventajas logísticas y económicas de la impresión 3D —como el menor costo por unidad, la producción bajo demanda y la personalización— podrían facilitar su implementación en la práctica clínica diaria, siempre que se sigan protocolos estrictos de diseño, impresión y postcurado. Sin embargo, es importante subrayar que las propiedades mecánicas no son el único criterio clínico. Las restauraciones basadas en materiales maquinados como CRIOS, pueden ofrecer ventajas en términos de absorción de cargas, reducción de estrés en la estructura remanente y mejor integración biomecánica en situaciones específicas, como dientes tratados endodónticamente o con estructura debilitada. No obstante, es necesario continuar investigando su comportamiento a largo plazo, especialmente en condiciones intraorales dinámicas.

13. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió comparar la resistencia compresiva de tres tipos de materiales restauradores utilizados en la elaboración de restauraciones tipo overlay mediante tecnologías digitales. Los resultados obtenidos muestran que las resinas compuestas impresas mediante estereolitografía (SLA), específicamente VarseoSmile Crown (BEGO) y P-Crown (Senertek), presentan un desempeño mecánico superior al de la resina compuesta maquinable Brilliant CRIOS (Coltene), tradicionalmente utilizada en sistemas CAD/CAM. Esta diferencia, estadísticamente significativa, pone en evidencia la evolución de los materiales impresos y su creciente viabilidad para aplicaciones clínicas permanentes.

Entre los grupos evaluados, la resina impresa BEGO obtuvo la mayor resistencia media, seguida por la resina impresa P-Crown, mientras que Brilliant CRIOS mostró el valor más bajo. A pesar de esto, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los dos materiales impresos, lo que sugiere que ambos presentan un comportamiento mecánico comparable bajo carga compresiva.

Cabe destacar que la formulación de cada material obedece a principios de diseño distintos. Mientras que las resinas impresas están orientadas a maximizar la resistencia estructural a través del uso de cargas cerámicas — como en el caso de P-Crown, que contiene un 65% de partículas cerámicas— la resina CRIOS fue concebida con un enfoque biomimético, buscando reproducir la elasticidad y el patrón de deformación de la dentina natural. Este diseño, aunque sacrifica en parte la resistencia absoluta, puede ofrecer beneficios clínicos relevantes en términos de absorción de cargas funcionales y reparabilidad frente a fracturas.

En términos clínicos, los resultados respaldan el uso de resinas impresas como una alternativa válida a los materiales maquinados, especialmente en restauraciones indirectas de sectores posteriores. Además de su buen comportamiento mecánico, estas resinas ofrecen ventajas en cuanto a eficiencia, personalización y costos, lo que refuerza su potencial en la práctica odontológica moderna. Sin embargo, es importante considerar que variables técnicas como la orientación de impresión, el protocolo de curado, el espesor de las restauraciones y la distribución de las cargas internas influyen directamente en el rendimiento del material y deben ser cuidadosamente controladas en el laboratorio.

Finalmente, aunque los resultados obtenidos son alentadores, es necesario continuar investigando sobre el comportamiento clínico de estos materiales en el mediano y largo plazo. Estudios in vivo que evalúen la fatiga mecánica, la estabilidad dimensional, el desgaste oclusal y la interacción con el medio oral serán fundamentales para validar el uso extendido de resinas impresas como opción restauradora definitiva.

14. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, y considerando tanto los aspectos estadísticos como los criterios clínicos y materiales evaluados, se proponen a continuación una serie de recomendaciones dirigidas a profesionales de la odontología restauradora, investigadores y fabricantes de materiales dentales.

Desde una perspectiva clínica, se recomienda considerar a las resinas compuestas impresas mediante estereolitografía (SLA) como una opción restauradora válida y segura para restauraciones indirectas tipo overlay, especialmente en sectores posteriores donde la resistencia a la carga oclusal es un factor determinante. Su comportamiento mecánico favorable, comparable o incluso superior al de algunos materiales CAD/CAM maquinados, junto con las ventajas logísticas y económicas del flujo digital, las convierte en una alternativa eficiente y moderna. No obstante, su indicación clínica debe estar respaldada por una correcta planificación del diseño restaurador, un grosor adecuado de las paredes y una técnica de impresión y postcurado estandarizada y controlada.

En cuanto al uso de materiales maquinables como Brilliant CRIOS, es importante no desestimar su valor clínico, ya que su composición biomimética busca asemejarse al comportamiento fisiológico de la dentina. Esto puede representar una ventaja significativa en pacientes con estructuras dentarias debilitadas o en casos donde se requiera una mayor capacidad de absorción de tensiones. La elección del material debe realizarse en función de las características del caso clínico, considerando no solo la resistencia mecánica, sino también la respuesta del material frente al entorno oral y las posibilidades de retratamiento o reparación.

Desde el punto de vista científico, se recomienda ampliar las investigaciones sobre el comportamiento de los materiales impresos en condiciones clínicas reales. Estudios in vivo que contemplen variables como el desgaste funcional, la resistencia a la fatiga, la degradación hidrotérmica, la adaptación marginal y la durabilidad en el tiempo serán esenciales para validar los hallazgos in vitro. Asimismo, se sugiere profundizar en el análisis del impacto de la orientación de impresión, la dirección de carga, los protocolos de curado y la interacción entre matriz polimérica y cargas cerámicas, dado que estos factores pueden modificar sustancialmente las propiedades del material final.

Por último, se alienta a los fabricantes a proporcionar información técnica detallada y estandarizada sobre la composición exacta de sus productos, especialmente en lo referente a porcentaje de carga inorgánica, tipo de rellenos y comportamiento frente a tratamientos de superficie. Este tipo de transparencia favorecerá tanto la elección informada del clínico como el desarrollo de estudios comparativos rigurosos en el ámbito académico.

15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pot GJ, Van Overschelde PA, Keulemans F, Kleverlaan CJ, Tribst JPM. Mechanical Properties of Additive-Manufactured Composite-Based Resins for Permanent Indirect Restorations: A Scoping Review. Vol. 17, *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
2. Rezaie F, Farshbaf M, Dahri M, Masjedi M, Maleki R, Amini F, et al. 3D Printing of Dental Prostheses: Current and Emerging Applications. Vol. 7, *Journal of Composites Science*. MDPI; 2023.
3. Pantea M, Ciocoiu RC, Greabu M, Totan AR, Imre M, Țâncu AMC, et al. Compressive and Flexural Strength of 3D-Printed and Conventional Resins Designated for Interim Fixed Dental Prostheses: An In Vitro Comparison. *Materials*. el 1 de mayo de 2022;15(9).
4. Valenti C, Isabella Federici M, Masciotti F, Marinucci L, Xhimitiku I, Cianetti S, et al. Mechanical properties of 3D printed prosthetic materials compared with milled and conventional processing: A systematic review and meta-analysis of in vitro studies. Vol. 132, *Journal of Prosthetic Dentistry*. Elsevier Inc.; 2024. p. 381–91.
5. Farkas AZ, Galatanu SV, Nagib R. The Influence of Printing Layer Thickness and Orientation on the Mechanical Properties of DLP 3D-Printed Dental Resin. *Polymers (Basel)*. el 1 de marzo de 2023;15(5).
6. Paradowska-Stolarz A, Wieckiewicz M, Kozakiewicz M, Jurczyszyn K. Mechanical Properties, Fractal Dimension, and Texture Analysis of Selected 3D-Printed Resins Used in Dentistry That Underwent the Compression Test. *Polymers (Basel)*. el 1 de abril de 2023;15(7).
7. Borba M, Della Bona Á, Cecchetti D. Flexural strength and hardness of direct and indirect composites Dental Materials. Vol. 23, *Dental Materials Braz Oral Res*. 2009.
8. Al-Qahtani AS, Tulbah HI, Binhasan M, Abbasi MS, Ahmed N, Shabib S, et al. Surface properties of polymer resins fabricated with subtractive and additive manufacturing techniques. *Polymers (Basel)*. el 1 de diciembre de 2021;13(23).
9. Tahayeri A, Morgan MC, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dental Materials*. el 1 de febrero de 2018;34(2):192–200.
10. Torabi K, Farjood E, Hamedani S. Rapid Prototyping Technologies and their Applications in Prosthodontics, a Review of Literature. Vol. 16, *J Dent Shiraz Univ Med Sci*. 2015.
11. Haddadi Y, Ranjkesh B, Isidor F, Bahrami G. Marginal and internal fit of crowns based on additive or subtractive manufacturing. *Biomater Investig Dent*. el 1 de enero de 2021;8(1):87–91.
12. Alharbi N, Osman R, Wismeijer D. Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations.

13. Cicciù M, Fiorillo L, D'Amico C, Gambino D, Amantia EM, Laino L, et al. 3D digital impression systems compared with traditional techniques in dentistry: A recent data systematic review. Vol. 13, *Materials*. MDPI AG; 2020.
14. Saini JS, Dowling L, Kennedy J, Trimble D. Investigations of the mechanical properties on different print orientations in SLA 3D printed resin. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*. el 1 de junio de 2020;234(11):2279–93.
15. Kim SM, Song YJ. Comparison of Compressive Fracture Strength according to the Layered Thickness of 3D Printing Resin. *International Journal of Clinical Preventive Dentistry*. el 31 de diciembre de 2023;19(4):57–60.
16. Schweiger J, Edelhoff D, Güth JF. 3d printing in digital prosthetic dentistry: An overview of recent developments in additive manufacturing. Vol. 10, *Journal of Clinical Medicine*. MDPI; 2021.
17. Etemad-Shahidi Y, Qallandar OB, Evenden J, Alifui-Segbaya F, Ahmed KE. Accuracy of 3-dimensionally printed full-arch dental models: A systematic review. Vol. 9, *Journal of Clinical Medicine*. MDPI; 2020. p. 1–18.
18. Jeong M, Radomski K, Lopez D, Liu JT, Lee JD, Lee SJ. Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. Vol. 12, *Dentistry Journal*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
19. The Glossary of Prosthodontic Terms: Ninth Edition. *J Prosthet Dent*. el 1 de mayo de 2017;117(5):e1–105.
20. Singh S, Dhawan P, Nautiyal M. Application of Rapid Prototyping in Prosthodontics. Vol. 9, *Frontiers in Biomedical Technologies*. Tehran University of Medical Sciences; 2022. p. 237–45.
21. Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. el 11 de diciembre de 2015;219(11):521–9.
22. Anadioti E, Kane B, Zhang Y, Bergler M, Mante F, Blatz MB. Accuracy of Dental and Industrial 3D Printers. *Journal of Prosthodontics*. el 1 de marzo de 2022;31:30–7.
23. Grzebieluch W, Kowalewski P, Grygier D, Rutkowska-Gorczyca M, Kozakiewicz M, Jurczyszyn K. Printable and machinable dental restorative composites for cad/cam application—comparison of mechanical properties, fractographic, texture and fractal dimension analysis. *Materials*. el 1 de septiembre de 2021;14(17).
24. Gad MM, Fouda SM. Factors affecting flexural strength of 3D-printed resins: A systematic review. *Journal of Prosthodontics*. John Wiley and Sons Inc; 2023.
25. Özçelik T, Yilmaz B, Şeker E, Shah K. Marginal Adaptation of Provisional CAD/CAM Restorations Fabricated Using Various Simulated Digital Cement Space Settings. *Int J Oral Maxillofac Implants*. septiembre de 2018;33(5):1064–9.

26. Suksuphan P, Krajangta N, Didron PP, Wasanapiarnpong T, Rakmanee T. Marginal adaptation and fracture resistance of milled and 3D-printed CAD/CAM hybrid dental crown materials with various occlusal thicknesses. *J Prosthodont Res.* 2024;68(2):326–35.
27. Kalsoom U, Nesterenko PN, Paull B. Recent developments in 3D printable composite materials. Vol. 6, *RSC Advances*. Royal Society of Chemistry; 2016. p. 60355–71.
28. Morimoto S, Rebello De Sampaio FBW, Braga MM, Sesma N, Özcan M. Survival Rate of Resin and Ceramic Inlays, Onlays, and Overlays: A Systematic Review and Meta-analysis. Vol. 95, *Journal of Dental Research*. SAGE Publications Inc.; 2016. p. 985–94.
29. Veneziani M. Posterior indirect adhesive restorations: updated indications and the Morphology Driven Preparation Technique [Internet]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/317022052>
30. The Glossary of Prosthodontic Terms: Ninth Edition. *J Prosthet Dent.* el 1 de mayo de 2017;117(5):e1–105.
31. Hull CW, Arcadia C. United States Patent (19) Hull (54) (75) (73) 21) 22 (51) 52) (58) (56) APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DMENSONAL OBJECTS BY STEREO THOGRAPHY.
32. Rosenstiel SF, Land MF, Walter R. *Contemporary fixed prosthodontics (Sixth edition)*. 6th ed. Elsevier, editor. 2023.
33. Prause E, Malgaj T, Kocjan A, Beuer F, Hey J, Jevnikar P, et al. Mechanical properties of 3D-printed and milled composite resins for definitive restorations: An in vitro comparison of initial strength and fatigue behavior. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry.* el 1 de febrero de 2024;36(2):391–401.
34. Zimmerli Brigitte, Strub Matthias, Jeger Franziska, Stadler Oliver, Lussi Adrian. *Composite materials: Composition, properties and clinical applications A Literature Review*. 2010 nov.
35. Park SJ, Jin JS, Lee JR. Influence of silane coupling agents on the surface energetics of glass fibers and mechanical interfacial properties of glass fiber-reinforced composites. *J Adhes Sci Technol.* 2000;14(13):1677–89.
36. Della Bona A, Cantelli V, Britto VT, Collares KF, Stansbury JW. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. Vol. 37, *Dental Materials*. Elsevier Inc.; 2021. p. 336–50.
37. Zhao M, Geng Y, Fan S, Yao X, Zhu M, Zhang Y. 3D-printed strong hybrid materials with low shrinkage for dental restoration. *Compos Sci Technol.* el 8 de septiembre de 2021;213.
38. Chen Q, Zou B, Lai Q, Zhu K. SLA-3d printing and compressive strength of PEGDA/nHAP biomaterials. *Ceram Int.* el 15 de octubre de 2022;48(20):30917–26.

39. Valvez S, Silva AP, Reis PNB. Compressive Behaviour of 3D-Printed PETG Composites. *Aerospace*. el 1 de marzo de 2022;9(3).
40. Paradowska-Stolarz A, Malysa A, Mikulewicz M. Comparison of the Compression and Tensile Modulus of Two Chosen Resins Used in Dentistry for 3D Printing. *Materials*. el 1 de diciembre de 2022;15(24).
41. Veeman D, Palaniyappan S. Process optimisation on the compressive strength property for the 3D printing of PLA/almond shell composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. el 1 de junio de 2023;36(6):2435–58.
42. Jeong M, Radomski K, Lopez D, Liu JT, Lee JD, Lee SJ. Materials and Applications of 3D Printing Technology in Dentistry: An Overview. Vol. 12, *Dentistry Journal*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
43. Espinar C, Pérez MM, Pulgar R, Leon-Cecilla A, López-López MT, Della Bona A. Influence of printing orientation on mechanical properties of aged 3D-printed restorative resins. *Dental Materials*. el 1 de abril de 2024;40(4):756–63.
44. Cresswell-Boyes AJ, Davis GR, Krishnamoorthy M, Mills D, Barber AH. Composite 3D printing of biomimetic human teeth. *Sci Rep*. el 1 de diciembre de 2022;12(1).