

Traballo de
fin de grao

**Innovacións na fabricación de alineadores dentais:
Impresión directa para unha maior precisión e eficiencia**

**Innovaciones en la fabricación de alineadores dentales:
Impresión directa para una mayor precisión y eficiencia**

**Innovations in dental aligner manufacturing: Direct
printing for greater precision and efficiency**

Autor/a: Alba Vidal Otero

Titor/a: María de la Paz Otero Casal

Departamento: Departamento de
Cirugía y Especialidades Médico-
Quirúrgicas

Xuño 2025

Traballo de Fin de Grao presentado na Facultade de Medicina e Odontoloxía da Universidade de Santiago de Compostela para a obtención do Grao en Odontoloxía

Agradecimientos

A mis padres, por su esfuerzo constante y por haberme brindado la oportunidad de estudiar la carrera que siempre he deseado. Gracias por ser ejemplo de trabajo y compromiso, confiar en mis decisiones y por acompañarme en cada paso del camino.

A mis abuelos, por su presencia fundamental a lo largo de mi vida y por su apoyo incondicional durante esta etapa. Aunque alguno ya no esté, su huella sigue presente en cada logro.

A mi tutora, por su disposición y consejos clave que ayudaron a convertir este trabajo en una propuesta sólida y bien encaminada.

Índice

1. Resúmenes	6
2. Introducción, hipótesis del trabajo y objetivos	9
2.1. Contexto histórico de la Ortodoncia y los alineadores	9
2.2. Objetivo de los alineadores en Ortodoncia	10
2.3. Principales materiales utilizados en alineadores dentales	11
3. Objetivos de este trabajo.....	13
3.1. Objetivo principal	13
3.2. Objetivos específicos.....	13
4. Material y métodos	14
5. Resultados	15
6. Discusión	25
6.1. Materiales para alineadores impresos en 3D y procesos de fabricación	25
6.2. Ventajas operativas y clínicas de los alineadores impresos directamente en 3D	26
6.3. Consideraciones biomecánicas y limitaciones clínicas en el uso de los alineadores impresos en 3D	27
6.4. Citotoxicidad y estrogenicidad de los alineadores impresos en 3D	29
6.5. Preocupaciones ambientales de los alineadores impresos en 3D	30
6.6. Tendencia emergente: Polímeros con memoria de forma (SMP)	31
6.7. Limitaciones de cara al futuro de los DPA y del presente trabajo	31
7. Conclusiones	33
8. Referencias bibliográficas.....	34

Índice de tablas

Tabla 1: Criterio de selección de estudios	14
Tabla 2: Tabla comparativa de los artículos incluidos en la revisión bibliográfica	24

Índice de gráficos

Gráfico 1: Diagrama Prisma	15
----------------------------------	----

Índice de abreviaturas

CAT: <i>Clear Aligner Technology</i> (Tecnología de alineadores transparentes)
cDLM: Fabricación de luz digital continua
cDLP: <i>Continuous Digital Light Processing</i> (Procesamiento de luz digital continua)
DLP: <i>Direct Light Printing</i> (Procesamiento digital de luz)
DPA: Alineador de impresión directa
EX30: <i>Exceed30</i>
EVA: Acetato de etileno y vinilo
LCD: <i>Liquid Crystal Display</i> (Diodo de cristal líquido)
N: Newton
TFA: Alineadores Termoformados
TP: <i>Tooth Positioner</i> (Posicionador de diente)
TPU: Poliuretanos termoplásticos
PC: Policarbonato
PC30: <i>Proceed30</i>
PET-G: Tereftalato de glicol de polietileno
PP: Polipropileno
PPP: <i>Polypropylene printing</i> (Impresión con polipropileno)
SLA: Estereolitografía
TFA: Alineador termoformado
UDMA: Dimetacrilato de uretano
UV: Ultravioleta
3D: 3 dimensiones

1. Resúmenes

Introdución

Nos últimos anos, os alineadores dentais consolidáronse como unha alternativa estética e cómoda fronte aos brackets tradicionais. Fabricados con polímeros termoplásticos transparentes, permiten mover os dentes de forma progresiva e controlada. Con todo, a súa produción tradicional, baseada en modelos físicos impresos en 3D, supón un elevado consumo de tempo, materiais e custos. Este documento analiza o potencial da impresión directa de alineadores, que prescinde do modelo físico tradicional, para optimizar tempos, reducir custos e mellorar a precisión na adaptación ao paciente. **Obxectivos:** avaliar o impacto da impresión directa sobre a eficiencia do proceso, a súa precisión clínica e a súa viabilidade fronte aos métodos convencionais. **Materiais e métodos:** realizouse unha revisión bibliográfica de estudos recentes sobre impresión 3D aplicada a alineadores, comparando técnicas tradicionais con impresión directa baseada en escaneos intraorais e tecnoloxías SLA/DLP. **Resultados:** os estudos mostran que a impresión directa mellora a precisión do axuste, reduce erros acumulativos e acurta o tempo de fabricación, ademais de diminuír custos loxísticos e materiais. **Conclusión:** a impresión directa representa unha mellora substancial en ortodoncia dixital, con beneficios clínicos e económicos que poderían convertela no novo estándar de fabricación personalizada de alineadores.

Palabras chave: alineadores transparentes, alineadores impresos en 3D, deseño CAD/CAM en ortodoncia, termoformado vs impresión directa, precisión de alineadores impresos, resinas biocompatibles para alineadores, polímeros en ortodoncia, innovación en alineadores dentais, fluxo dixital en ortodoncia, tecnoloxía SLA/DLP en Odontoloxía.

Introducción

En los últimos años, los alineadores dentales se han consolidado como una alternativa estética y cómoda frente a los brackets tradicionales. Fabricados con polímeros termoplásticos transparentes, permiten mover los dientes de forma progresiva y controlada. Sin embargo, su producción tradicional, basada en modelos físicos impresos en 3D, supone un elevado consumo de tiempo, materiales y costes. Este documento analiza el potencial de la impresión directa de alineadores, que prescinde del modelo físico tradicional, para optimizar tiempos, reducir costes y mejorar la precisión en la adaptación al paciente. **Objetivos:** evaluar el impacto de la impresión directa sobre la eficiencia del proceso, su precisión clínica y su viabilidad frente a los métodos convencionales. **Materiales y métodos:** se realizó una revisión bibliográfica de estudios recientes sobre impresión 3D aplicada a alineadores, comparando técnicas tradicionales con impresión directa basada en escaneos intraorales y tecnologías SLA/DLP. **Resultados:** los estudios muestran que la impresión directa mejora la precisión del ajuste, reduce errores acumulativos y acorta el tiempo de fabricación, además de disminuir costes logísticos y materiales. **Conclusión:** la impresión directa representa una mejora sustancial en ortodoncia digital, con beneficios clínicos y económicos que podrían convertirla en el nuevo estándar de fabricación personalizada de alineadores.

Palabras clave: alineadores transparentes, alineadores impresos en 3D, diseño CAD/CAM en ortodoncia, termoformado vs impresión directa, precisión de alineadores impresos, resinas biocompatibles para alineadores, polímeros en ortodoncia, innovación en alineadores dentales, flujo digital en ortodoncia, tecnología SLA/DLP en Odontología.

Introduction

In recent years, dental aligners have become established as an aesthetic and comfortable alternative to traditional braces. Made from transparent thermoplastic polymers, they allow for progressive and controlled tooth movement. However, their traditional production, based on 3D-printed physical models, is time-consuming, material-intensive, and expensive. This paper analyzes the potential of direct aligner printing, which dispenses with the traditional physical model, to optimize time, reduce costs, and improve patient-fitting accuracy. **Objectives:** to evaluate the impact of direct printing on process efficiency, clinical accuracy, and viability compared to conventional methods. **Materials and methods:** a literature review of recent studies on 3D printing applied to aligners was conducted, comparing traditional techniques with direct printing based on intraoral scans and SLA/DLP technologies. **Results:** studies show that direct printing improves fit accuracy, reduces cumulative errors, and shortens manufacturing time, in addition to reducing logistical and material costs. **Conclusion:** direct printing represents a substantial improvement in digital orthodontics, with clinical and economic benefits that could make it the new standard for custom aligner manufacturing.

Keywords: clear aligners, 3D printed aligners, CAD/CAM design in orthodontics, thermoforming vs. direct printing, precision of printed aligners, biocompatible resins for aligners, polymers in orthodontics, innovation in dental aligners, digital workflow in orthodontics, SLA/DLP technology in Dentistry.

2. Introducción, hipótesis del trabajo y objetivos

2.1. Contexto histórico de la Ortodoncia y los alineadores

La Ortodoncia es la especialidad más antigua dentro de la Estomatología, aunque no fue hasta 1890 cuando se estableció formalmente con los fundamentos y enfoques que la definen en la actualidad. Su ámbito de aplicación incluye el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de malposiciones dentales, alteraciones en la mordida y desequilibrios en el crecimiento y la estructura de los maxilares. Además, no existe una edad límite para recibir tratamiento ortodóncico. La preocupación por buscar una correcta alineación dental se remonta al 1000 a.C., donde en excavaciones griegas y etruscas se encuentran los primeros aparatos ortodóncicos diseñados inicialmente, para corregir cuestiones estéticas (1). Durante los siglos XVIII y XIX, la rama de la Odontología se ve inmersa en un desarrollo exponencial donde son descritos una serie de dispositivos para “arreglar” los dientes, durante estos años destacan autores como Norman Kingsley y coetáneos, los cuales tuvieron una gran influencia (1,2).

Aparece la definición de oclusión a finales del S. XIX donde por primera vez se presta atención a los contactos oclusales. Edward H. Angle fue la principal figura a reconocer en el concepto de oclusión recibiendo el título de “Padre de la ortodoncia moderna”, el cual propuso una clasificación de las maloclusiones que actualmente perdura, determinando que los primeros molares superiores deberían relacionarse con sus antagonistas de forma que la cúspide mesiobucal del molar superior ocluya con el surco bucal del molar inferior (1). Fueron los inicios del siglo XX donde las bases de la ortodoncia cobraron importancia más allá de los fines estéticos, siendo la oclusión y la alteración del crecimiento mandibular, los principales intereses (1,2).

Desde inicios del siglo XIX, la estética comenzó a recuperar relevancia tanto para los odontólogos como para los pacientes. Además, la Ortodoncia empezó a considerarse una parte fundamental de un enfoque multidisciplinario en el que diversas especialidades odontológicas trabajan en conjunto para garantizar la salud y conservación de la dentición a largo plazo (1).

Analizar los factores biológicos, psicosociales y culturales de las sociedades actuales nos permite comprender la búsqueda de nuevos aparatos de ortodoncia que cumplan los requisitos estéticos además de funcionales, dando paso al mercado de los alineadores dentales (1,3-5). El término CAT (*Clear Aligner Therapy*) es empleado para englobar el conjunto de tratamientos con diferentes formas de acción, de elaboración y aplicables a numerosos tratamientos para corregir la maloclusión (3), coincidiendo todos ellos con la definición de polímero de resina transparente individualizado a cada paciente (3,6), que cubre todos o casi todos los dientes (3).

Dr. Harold Kesling en 1946 (3,5,7,8), diseñó el TP (*Tooth Positioner*) el cual fue considerado el primer aparato englobado en el término CAT (3,5). Estos “posicionadores termoformados” eran empleados en etapas terminales del tratamiento donde se perfeccionaba el alineamiento dental. Esta técnica consistía en reposicionar dientes en un modelo de yeso para fabricar alineadores transparentes. Sin embargo, cada nuevo movimiento requería un modelo distinto, lo que implicaba múltiples impresiones, visitas y mayor carga de trabajo para el ortodoncista (9). Sin embargo, este procedimiento fue percibido como laborioso, ya que planificar la secuencia de movimientos resultaba complejo, especialmente al intentar lograr desplazamientos significativos sin una visión precisa de la posición final de los dientes (6,10). El TP, elaborado en el laboratorio con caucho de vulcanita flexible a partir de un encerado en una oclusión clase

I, presentaba limitaciones en el control dental, permitiendo únicamente la inclinación de las coronas (3,6,7,11).

Más tarde, en 1971, el Dr. Ponitz introdujo el *Invisible Retainer*, inspirado en la propuesta de Kesling de reposicionar los dientes en un modelo de estudio maestro. Al igual que el dispositivo original, su función se limitaba a generar movimientos dentales menores, logrando sus efectos principalmente mediante la inclinación de las coronas (12). A inicios de la década de 1990, Sheridan presentó una técnica que combinaba el uso de alineadores con *stripping* para facilitar el movimiento dental. No obstante, en cada cita de control era necesario tomar nuevos modelos y realizar un encerado adicional para alcanzar los objetivos previstos, lo que implicaba un considerable consumo de tiempo tanto en clínica como en laboratorio (13). No es hasta llegado 1997 cuando dos estudiantes de posgrado de la universidad de Standford crean el primer sistema de alineadores transparente a medida para producción en masa a partir de gráficas de imagen por computadora 3D, revolucionando el mundo de la ortodoncia. Finalmente, en 1998, la FDA aprobó el primer alineador denominado *Invisalign* por la compañía *Align Technology*, con la tecnología del alineador que conocemos hoy en día (3,5).

2.2. Objetivo de los alineadores en Ortodoncia

Además de mejorar la alineación dental y satisfacer las demandas estéticas de los pacientes, quienes buscan minimizar el impacto visual del tratamiento debido a su prolongada duración, los alineadores ofrecen una mayor comodidad a largo plazo al ser removibles. Esto facilita su higiene, optimizando la salud bucodental y disminuyendo significativamente el riesgo de desarrollar enfermedades periodontales y dentales (14,15). Además, facilitan una reducción tanto en la frecuencia como en la duración de las visitas del paciente al consultorio, sin comprometer la eficacia del tratamiento (9).

Los alineadores son comparables a férulas que recubren las coronas clínicas y la encía marginal. Están diseñados para desplazar los dientes entre 0,25 y 0,3 mm por alineador en un lapso de dos semanas (9). Cada alineador tiene la función de desplazar los dientes hacia su posición final previamente establecida, ya sea desde un punto de vista estético o funcional (16). Para lograr su efectividad, es fundamental un alto grado de cumplimiento por parte del paciente, ya que deben llevarse entre 20 y 22 horas al día, acumulando un uso total de 400 horas por cada alineador (9).

La efectividad de los alineadores transparentes está determinada en gran medida por la constancia del paciente en su uso, ya que deben permanecer en la boca la mayor parte del tiempo, exceptuando momentos específicos como las comidas y la higiene oral. Además, diversos factores externos, como la exposición a pigmentos de alimentos y bebidas, la radiación UV, la temperatura y la humedad, pueden alterar sus propiedades, afectando su transparencia y resistencia. Por otro lado, seguir correctamente las indicaciones del ortodoncista, incluyendo la frecuencia de cambio de los alineadores, es clave para garantizar el éxito del tratamiento (15,17-20).

Dentro de la amplia gama de alineadores disponibles en la actualidad, muchas marcas ofrecen distintas líneas o gamas diseñadas para abordar casos con distintos niveles de complejidad. Algunas de estas versiones, están específicamente orientadas al tratamiento de discrepancias

dentales leves, por lo que incluyen un número reducido de alineadores y están pensadas para movimientos dentales menores. En cambio, otras gamas dentro de las mismas marcas están diseñadas para tratar maloclusiones más complejas que requieren secuencias más prolongadas (3).

La oferta actual de alineadores en el mercado se clasifica en cuatro subgrupos según su método de producción, supervisión profesional y tecnología utilizada:

- **Sistemas comercializados:** incluyen alineadores diseñados por el ortodoncista y fabricados por empresas, manteniendo siempre la supervisión por un profesional. Un mayor o menor número de alineadores son utilizados en función de la complejidad del tratamiento. Dentro de este sistema encontramos marcas como: “Invisalign® – Align Technology”, “Clear Correct® – Straumann”, “Suresmile® – Dentsply Sirona”, “Spark® – Ormco”, “AngelAligner®”, entre otras.
- **Sistemas directos al consumidor:** Estos sistemas se comercializan directamente al paciente, sin necesidad de visitas presenciales al ortodoncista. La supervisión profesional suele ser remota o incluso inexistente. Algunas marcas representativas son: Dr. Smile®, Crystal Clear Aligners®, entre otras.
- **Sistemas con entrega de archivos STL para fabricación interna:** la empresa o el software proporciona los archivos STL y es el profesional quien los imprime en su propia clínica o laboratorio. Esto ofrece un alto grado de control clínico. Algunas marcas que ofrecen este sistema son: Orchestrate 3D®, Suresmile®, 3Shape®, entre otras.
- **Software de planificación y diseño (sistemas abiertos o semiautónomos):** estos sistemas le permiten al profesional diseñar y planificar tratamientos mediante herramientas como CAD/CAM. Son ideales para clínicas que desean un control total del flujo de trabajo digital. Algunos ejemplos son marcas como: Nemotec®, Archform®, BlueSkyPlan®, entre otras.

2.3. Principales materiales utilizados en alineadores dentales

Invisalign, empresa pionera, introdujo los primeros alineadores Proceed30 (PC30), fabricados con un material flexible que ofrecía mayor transparencia y resistencia a la fractura. Posteriormente, desarrolló el material polimérico Exceed30 (EX30), cuya elasticidad superaba en un 50 % a la del PC30, lo que facilitaba su inserción y extracción. Además, presentaba una adaptabilidad cuatro veces superior en comparación con los alineadores producidos con PC30 (21-23).

Tras ocho años de investigación, en 2013 se lanzó el SmartTrack®, un material polimérico (LD30) compuesto por poliuretano termoplástico con un elastómero integrado. Este material innovador permitía la aplicación de fuerzas ligeras y continuas sobre los dientes, mejorando la previsibilidad de los movimientos ortodóncicos gracias a su mayor elasticidad (21-23).

Actualmente, otros fabricantes han incrementado el uso de tereftalato de glicol de polietileno (PET-G), seguido por materiales como polipropileno (PP), policarbonato (PC), poliuretanos termoplásticos (TPU), acetato de etileno y vinilo (EVA), entre otros (3,21).

Se han desarrollado diversos sistemas de fabricación, entre los cuales destacan los alineadores transparentes secuenciados. Estos dispositivos personalizados se diseñan y fabrican mediante tecnología asistida por ordenador (CAD/CAM), a partir del escaneo de una impresión de polivinilsiloxano que genera un modelo tridimensional de la boca del paciente. Dicho modelo se va modificando progresivamente, y sobre cada una de sus etapas se termoforma una serie de alineadores secuenciales destinados a corregir las maloclusiones del paciente (9).

Además, el proceso convencional de fabricación de alineadores como los de Invisalign no solo implica el uso de tecnología CAD/CAM y escaneos intraorales o impresiones de polivinilsiloxano, sino también una serie de pasos físicos posteriores que aseguran la calidad del producto final. A partir del archivo digital generado (normalmente en formato .STL), se imprime en 3D un modelo físico de los dientes del paciente. Sobre este modelo, se termoforma una lámina plástica transparente —habitualmente de poliuretano— que dará forma al alineador. Una vez moldeado, el alineador se recorta cuidadosamente para eliminar bordes afilados o excesos que puedan causar irritación en la encía. Finalmente, sus superficies y contornos se suavizan mediante procesos de acabado, como el pulido mecánico o el tamboreado, con el objetivo de mejorar la comodidad y evitar lesiones en los tejidos blandos (16).

En este contexto, la posibilidad de fabricar alineadores directamente mediante impresión 3D, sin requerir un modelo físico intermedio, representa un avance significativo en la evolución de este tipo de tratamiento. Esta innovación tecnológica fue liderada por la empresa surcoreana Graphy, que en 2019 presentó la resina TC-85DAC, el primer material específicamente diseñado para la impresión directa de alineadores, marcando un hito en la simplificación y precisión de proceso de fabricación (24).

3. Objetivos de este trabajo

3.1. Objetivo principal

En esta revisión bibliográfica se plantea evaluar a través de la literatura científica, una alternativa al método convencional termoformado utilizado por las compañías para la fabricación de alineadores, que consiste en imprimir alineadores directamente en 3D, considerando sus ventajas, limitaciones actuales y proyecciones de futuro en el campo de la ortodoncia.

3.2. Objetivos específicos

- Examinar el proceso de fabricación directa de alineadores mediante impresión 3D.
- Comparar las propiedades mecánicas y clínicas de los DPA frente a los TFA.
- Evaluar la biocompatibilidad de los materiales utilizados en alineadores impresos.
- Identificar las ventajas clínicas y logísticas de producir alineadores *in-office*.
- Detectar las limitaciones actuales de los DPA y posibles mejoras futuras.
- Analizar el impacto ambiental y potencial sostenible de estas tecnología.

4. Material y métodos

En este trabajo de revisión bibliográfica se realizaron diversas búsquedas detalladas de información, tanto en inglés como en castellano, principalmente en Scopus, PubMed y Google Scholar. Se restringió la fecha de publicación inicial priorizándose los estudios de los últimos 5 años.

Se emplearon operadores Booleanos (AND, NOT, OR, etc.) para obtener búsquedas más limitadas realizando combinaciones con los siguientes términos: “3D printed aligners”, “dental aligners”, “materials” y “biocompatibility of orthodontic aligners” en las diferentes bases de datos.

La selección de artículos fue realizada por la autora, quien valoró si los artículos cumplían o no con los criterios establecidos.

Se utilizó también la función de búsqueda avanzada para filtrar artículos originales, meta-análisis, revisiones narrativas, revisiones sistemáticas, ensayos clínicos y estudios experimentales. Se utilizó en buscadores como “Scopus” una restricción a artículos exclusivamente del campo de Odontología.

Con el objetivo de definir la búsqueda, se establecieron los siguientes criterios de inclusión o límites de búsqueda (**Tabla 1**).

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Estudios que evalúen propiedades mecánicas o biológicas de materiales utilizados en la impresión directa de alineadores.	Artículos de opinión, cartas al editor y publicaciones no científicas.
Artículos centrados en métodos de fabricación directa mediante tecnologías como SLA, DLP o similares.	Investigaciones que abordaran únicamente alineadores termoformados sin referencia a impresión directa o viceversa.
Publicaciones revisadas por pares (<i>peer-reviewed</i>).	Estudios duplicados, resúmenes sin texto completo disponible o artículos sin revisión por pares.
Estudios realizados en humanos, modelos <i>in vitro</i> o simulaciones digitales relevantes para la práctica clínica ortodóncica.	
Estudios que comparen alineadores impresos en 3D con alineadores termoformados o que al menos comparen alineadores impresos 3D entre sí.	
Estudios que evalúen al menos uno de los siguientes aspectos: resistencia, elasticidad, retención, precisión de ajuste, biocompatibilidad, confort del paciente.	
Estudios que describan claramente la tecnología de impresión 3D utilizada (SLA, DLP, etc.).	

Tabla 1: Criterio de selección de estudios

5. Resultados

Esta revisión bibliográfica se elaboró siguiendo las directrices de la declaración PRISMA (Gráfico 1) (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), con el objetivo de identificar y analizar la evidencia científica disponible sobre la impresión directa en 3D de alineadores dentales, en comparación con los métodos convencionales termoformados.

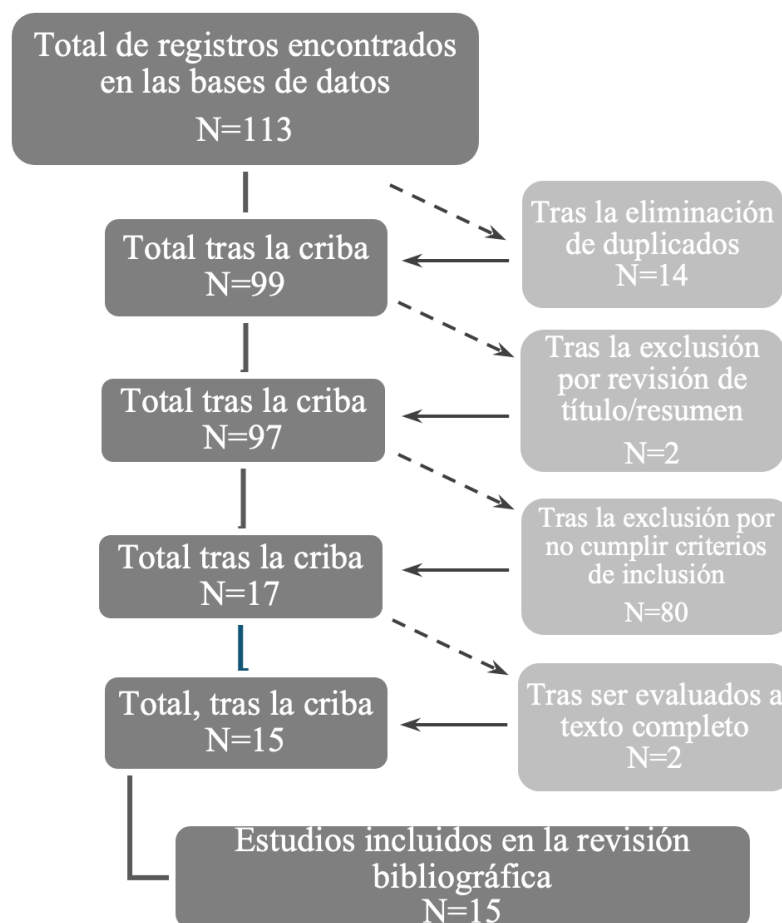


Gráfico 1: Diagrama Prisma

Una única revisora llevó a cabo la lectura completa de los artículos finalmente incluidos en este trabajo. Con la información obtenida de éstos, he realizado una tabla a modo de resumen y posteriormente, una discusión de forma narrativa enfrentando las opiniones de los diferentes autores para poder así llegar a unas conclusiones.

De cada estudio se extrajeron los siguientes datos: título, autor(es), año de publicación, tipo de artículo y resultados principales. Los datos se organizaron en una tabla comparativa, para facilitar su análisis.

Título artículo/ Tipo de estudio/ Año	Métodos	Objetivos específicos	Resultados	Conclusión
<p><i>Accuracy of three-dimensionally printed retainers and aligners: A systematic review</i> (25).</p> <p>Tipo de estudio: revisión sistemática</p> <p>Año: 2025</p>	<p>Se realizaron búsquedas en bases de datos electrónicas en PubMed, Science Direct, Web of Science, Scopus, Ovid y Clinicaltrial.gov hasta el 17 de noviembre de 2023. Se utilizó la herramienta de evaluación de la calidad de los estudios de precisión diagnóstica (QUADAS-2) para evaluar el riesgo de sesgo y las preocupaciones de aplicabilidad de la calidad metodológica de los artículos.</p>	<p>Evaluar la evidencia teniendo en cuenta la precisión de los modelos impresos en 3D. Determinar el tiempo de impresión y la resina utilizada en relación con diferentes ángulos de impresión. Además de determinar las propiedades mecánicas de los retenedores y alineadores impresos en 3D.</p>	<p>5 estudios defendieron la precisión y veracidad de los alineadores impresos en 3D frente a los otros 7 estudios que optaban por los alineadores termoformados. Técnicas como la SLA (estereolitografía) y PPP (<i>polypropilene printing</i>) demostraron mayor precisión y veracidad que las impresoras DLP (<i>digital light processing</i>) y cDLP (<i>continuous digital light processing</i>). También se demostró mayor precisión y veracidad de los alineadores impresos en 3D fabricados en resina de poliuretano fotopolimerizable en comparación con los alineadores termoformados.</p>	<p>Se concluye que el flujo de trabajo digital actual, con distintas resinas, grosores, orientaciones y tecnologías, permite una impresión directa viable, alcanzando generalmente una precisión aceptable de hasta 0,25mm. Además, la impresión a 45° se destacó por su eficiencia en tiempo, coste y consumo de resina. Por último, los alineadores impresos en 3D con resina fotopolimerizable mostraron mayor rigidez, menor deformación y mejor rendimiento que los termoformados.</p>
<p><i>3D-printed clear aligners: An emerging alternative to the conventional thermoformed aligners? – A systematic review</i>(26)</p>	<p>Los datos se recogieron de artículos científicos relacionados con las propiedades de los alineadores impresos en 3D y artículos comparativos de referencia cruzada</p>	<p>Se evaluaron las diferencias entre los alineadores impresos en 3D y los termoformados, comparando sus propiedades mecánicas y químicas, proceso de</p>	<p>Ambos tipos de alineadores presentan propiedades mecánicas favorables; sin embargo, el alineador de impresión directa (DPA) destacó por ofrecer ventajas adicionales como la memoria de forma y una mayor</p>	<p>Se concluye que los DPA sirvan como alternativa a los alineadores termoformados en un futuro próximo, teniendo en cuenta la innovación de sus propiedades. Sin embargo aún es necesario continuar realizando estudios experimentales con mayor calidad de evidencia y con énfasis en</p>

<p>Tipo de estudio: revisión sistemática Año: 2025</p>	<p>relacionados con las propiedades de los alineadores termoformados. Las fuentes evaluadas para recuperar los artículos fueron las bases de datos científicas Scopus y PubMed.</p>	<p>fabricación, exactitud, precisión y efecto sobre la sostenibilidad. Todo esto con la finalidad de determinar si la impresión 3D es más eficiente que el termoformado.</p>	<p>flexibilidad en el diseño. Además, aplicó fuerzas de manera más constante en comparación con el alineador termoformado (TFA). Aunque el DPA demostró una mayor exactitud, fidelidad y precisión que el TFA, también presentó variaciones de grosor respecto al archivo STL original, al igual que ocurre en el proceso de termoformado. No obstante, aún existe escasa investigación sobre la sostenibilidad y biocompatibilidad de los alineadores fabricados mediante impresión directa.</p>	<p>la aleatorización para confirmar los hallazgos de los estudios de laboratorios actuales y abordar limitaciones importantes antes de ser lanzados a un mercado más amplio.</p>
<p><i>Biocompatibility of variable thicknesses of a novel directly printed aligner in orthodontics</i> (27) Tipo de estudio: ensayo Año: 2025</p>	<p>Se imprimieron numerosas muestras elaboradas con resina Tera Harz TA-28 con ayuda de la impresora 3D Asiga MAX. Con duraciones de curado de 20, 30 y 60 minutos. El ensayo AlamarBlue fue empleado para evaluar la citotoxicidad en fibroblastos gingivales humanos.</p>	<p>A partir de este estudio se comprueba si las modificaciones de diseño que aumentan el espesor de la capa del alineador precisan mayores tiempos de curado UV para asegurar su seguridad y biocompatibilidad.</p>	<p>Se demostró que la viabilidad celular disminuyó al aumentar el grosor de la muestra bajo el curado UV de 20 minutos indicado por el fabricante. Por lo que, extender el tiempo de curado no mejoró la viabilidad celular. Sin embargo esta no disminuyó más de un 30%, cumpliendo en todo momento los estándares EN ISO 10993-5 para la no citotoxicidad.</p>	<p>Podemos afirmar que el protocolo estándar de curado UV indicado por los fabricantes de 20 minutos garantiza la biocompatibilidad y la seguridad del paciente de Tera-Harz TA-28 para espesores de hasta 6mm.</p>

<p><i>The new additive era of orthodontics: 3D-printed aligners and shape memory polymers - the latest trend - and their environmental implications</i> (24)</p> <p>Tipo de estudio: revisión narrativa</p> <p>Año: 2024</p>	<p>Este artículo se encargó de recopilar, analizar y sintetizar literatura reciente comprendida entre 2017 y 2023 sobre la impresión directa de alineadores 3D y el uso de polímeros con memoria de forma (SMP).</p>	<p>Análisis de los materiales usados para el DPA, ventajas que estos suponen, procesos de fabricación, propiedades físicas y mecánicas de estos, citotoxicidad y preocupaciones medioambientales que estos suponen.</p>	<p>Los alineadores impresos directamente en 3D muestran mejor ajuste y estabilidad mecánica tras el uso intraoral en comparación con los termoformados, que pierden propiedades con el tiempo. Aplican fuerzas más consistentes y dentro del rango clínicamente recomendado, permiten personalizar el grosor para movimientos específicos y presentan un espesor más uniforme. Sin embargo, su resistencia a la deformación es menor y su superficie es más rugosa, lo que puede afectar la comodidad y la higiene. Las propiedades varían según la impresora utilizada y, aunque la citotoxicidad parece baja, aún se requieren estudios que confirmen su biocompatibilidad.</p>	<p>Con el desarrollo de nuevos materiales y el aumento del coste de los alineadores, los DPA en consulta han ganado interés. Esta tecnología puede hacer el tratamiento más eficiente, rápido y cómodo. La revisión analiza materiales, procesos y propiedades clave de los alineadores impresos, destacando su potencial clínico, especialmente con materiales con memoria de forma (SMP). Aunque prometedores, su biocompatibilidad y eficiencia clínica aún deben ser evaluadas frente a los TFA. Además, aún debemos seguir en la búsqueda de materiales más sostenibles y biodegradables.</p>
<p><i>Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies</i>(28)</p>	<p>Los autores se centraron en publicaciones sobre impresión directa de alineadores transparentes entre 2017 y 2023.</p>	<p>Esta revisión tiene como objetivo explicar los procesos, beneficios y desafíos del desarrollo de alineadores impresos en</p>	<p>Se concluye que esta tecnología puede reducir costos, mejorar la personalización, y acelerar la producción frente a métodos termoformados. Además, se</p>	<p>Los alineadores transparentes se han convertido en una herramienta muy relevante dentro del sector ortodóncico. La fabricación ha evolucionado hasta la impresión 3D, lo que permite crear diseños más</p>

<p>Tipo de estudio: revisión narrativa Año: 2024</p>		<p>3D, además de explorar el futuro de esta tecnología en odontología</p>	<p>destacan avances en materiales, especialmente resinas como TC-85DAC, y el uso de tecnologías como DLP y SLA, aunque persisten desafíos en biocompatibilidad, precisión dimensional y estandarización clínica. La impresión directa representa un cambio prometedor en ortodoncia.</p>	<p>complejos, individualizados y económicos. Los resultados ya son comparables a los tratamientos tradicionales, aunque aspectos como la retención, el diseño de aditamentos o los procesos de fabricación aún necesitan ser investigados. Se espera que la impresión 4D potencie aún más estos avances. Haciendo los tratamientos más eficaces y mejorando la calidad de vida de los pacientes</p>
<p><i>Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities</i> (29) Tipo de estudio: revisión narrativa Año: 2021</p>	<p>Los autores recopilaron información de estudios clínicos y experimentales sobre la impresión directa de alineadores en 3D de literatura científica publicada entre 2015 y 2021.</p>	<p>Demostrar las ventajas de los DPA frente a los TFA así como aspectos que deben ser investigados para llevar esta nueva posibilidad de tratamiento a una realidad en la clínica.</p>	<p>Los DPA ofrecen una mayor precisión al estar fabricados con resina y no pasar por la etapa de termoformado. Mayor resistencia a cargas máximas con desplazamientos menores. Mayor eficacia y reproducibilidad. La impresión directa del alineador nos permite controlar el grosor de este y, por lo tanto, también los vectores de fuerza. No precisan ser recortados ni pulidos.</p>	<p>La literatura demuestra que la tecnología de impresión 3D es un método apropiado para la impresión directa de alineadores. Se busca un material así como un software que esté probado clínicamente para este propósito y es por ello por lo que se fomenta la realización de estudios <i>in vivo</i> e <i>in vitro</i> para probar estas nuevas tecnologías.</p>
<p><i>Three-Dimensional Printing in Dentistry: A Scoping Review of Clinical Applications, Advantages, and</i></p>	<p>Se realizó una búsqueda sistemática en PubMed, Google Scholar y Scopus, cubriendo estudios desde enero de 2006 hasta noviembre de 2024. Las</p>	<p>Explorar la evidencia científica existente respecto a las aplicaciones clínicas, los beneficios y las limitaciones de la</p>	<p>La ortodoncia actualmente utiliza las impresiones 3D para modelos de diagnóstico, moldes de alineadores dentales, protectores bucales y DPA, aumentando la precisión</p>	<p>Aún es necesario explorar la resistencia y las propiedades biomecánicas de los DPA a largo plazo aunque ya sabemos que la impresión 3D ofrece modelos precisos e individualizados con cada paciente.</p>

<p><i>Current Limitations</i> (30) Tipo de estudio: revisión narrativa Año: 2025</p>	<p>términos clave incluyeron “aplicaciones”, “propiedades materiales” y “desafíos tecnológicos en prótesis, ortodoncia y endodoncia”.</p>	<p>impresión 3D en tratamientos de ortodoncia, prostodoncia y endodoncia.</p>	<p>del tratamiento así como la comodidad del paciente. Aspectos como la durabilidad del material han de ser investigados. En cuanto a impresoras 3D en el ámbito de la ortodoncia destacan la SLA y DLP (procesamiento digital de luz) siendo el primero el que produce alineadores más precisos sobre todo en las superficies oclusales y proximales de los dientes.</p>	<p>También es limitada la investigación sobre su impacto ambiental y en los resultados de los tratamientos. La investigación actual se basa en estudios en laboratorio, por lo que se demandan ensayos clínicos a gran escala sobre pacientes.</p>
<p><i>Unlocking the biological insights of 3D printed aligners: A look at current findings</i> (31) Tipo de estudio: revisión narrativa Año: 2024</p>	<p>Los autores realizaron una búsqueda en bases de datos científicas para identificar estudios que investigasen las respuestas celulares y moleculares al uso de estos alineadores.</p>	<p>Comprobar qué aspectos son necesarios investigar para conseguir la viabilidad de los DPA en la consulta.</p>	<p>Los DPA ofrecen una mayor eficiencia de movimientos de los dientes (debido a las zonas o puntos de presión individualizados), y un mejor ajuste y precisión que los TFA. Las fuerzas ejercidas por los DPA (debido a su flexibilidad) son más consistentes, controladas y biológicamente compatibles con el movimiento dental de ortodoncia. Además de no presentar cambios notables en sus propiedades tras una semana de uso intraoral ni a temperaturas más altas. Su uso seguro depende del cumplimiento estricto de las</p>	<p>Gracias a los avances tecnológicos en biomateriales, diseño digital y tecnologías de fabricación es posible fabricar DPA en el consultorio. Los nuevos DPA hechos de resina de Graphy (Tera Harz TC-85) son los únicos aprobados actualmente. Se necesita investigación adicional sobre un protocolo de producción estandarizado para permitir un uso biológicamente seguro en todos los casos.</p>

			instrucciones concretadas por los fabricantes. Alteraciones en la producción como la disminución del tiempo de curado posterior o la producción múltiple, pueden provocar resultados no deseados. Son necesarias más investigaciones para garantizar su uso seguro.	
<p><i>Comparison of stress relaxation properties between 3-dimensional printed and thermoformed aligners: A pilot study of in vitro simulation of two consecutive 8-hours force application (32)</i></p> <p>Tipo de estudio: estudio piloto</p> <p>Año: 2024</p>	<p>Se realizó una prueba aplicando una carga constante preestablecida, sometiendo cada muestra a una desviación de 0,5mm mientras estaba sumergida en agua por 8 horas consecutivas a 37°C. Las muestras fueron tomadas en rangos de 1 segundo y la misma prueba fue realizada dos veces en la misma muestra.</p>	<p>Examinar la disminución de estrés en alineadores impresos en 3D, Tera Harz TC-85 (Sur Corea) y Noxi (Suecia e Italia), en comparación con los alineadores termoformados Zendura FLX (EEUU) y Duran (Alemania).</p>	<p>Se registraron 28.800 mediciones para cada alineador. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,001$) para todos los materiales y se consideraron todos los períodos de tiempo.</p>	<p>Todos los materiales evaluados presentaron una notable disminución de tensión durante las 8 horas de carga continua, aunque se detectaron diferencias significativas entre ellos. El alineador fabricado con poliamida (Noxi) destacó por generar los niveles de resistencia más elevados en ambas pruebas, lo cual corroboró con sus bajos niveles de desintegración por estrés, que se situaron entre el 23% y el 32%.</p>
<p><i>Accuracy of orthodontic movements with 3D printed aligners: A prospective observational pilot study (33)</i></p> <p>Tipo de estudio: estudio piloto</p>	<p>17 pacientes (ocho hombres y nueve mujeres) con una edad media de 27,67 años y con rotaciones dentales de <301 y espacios de <5mm</p>	<p>Describir la precisión del movimiento de los dientes al utilizar DPA fabricados con resina Tera Harz TC-85DAC.</p>	<p>No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los movimientos generales de torque, inclinación (<i>tipping</i>) y rotación planificados y los reales. Teniendo en cuenta el flujo de trabajo desde la</p>	<p>Se concluye que los alineadores impresos en 3D se pueden imprimir con éxito internamente y utilizar para casos ligeramente desalineados, con una precisión comparable del movimiento de los dientes a la de otros alineadores fabricados de forma convencional.</p>

<p>Año: 2024</p>			<p>importación de los escaneos intraorales hasta que los alineadores se produjesen completamente y estuviesen listos para ser entregados a los pacientes, el tiempo de demora ha sido de 35min para los DPA y de 100 min para os TFA.</p>	
<p><i>Comparison of mechanical properties of 3-dimensional printed and thermoformed orthodontic aligners</i> (32) Tipo de estudio: estudio experimental <i>in vitro</i> Año: 2023</p>	<p>Se utilizaron muestras a partir de 2 materiales de termoformado EX30 y LD30 (Align Technology Inc., San José, California), así como 2 resinas de impresión 3D directa Material X (Envisiontec, Inc; Dearborn, Mich) y OD-Clear TF (3Dresyns, Barcelona, España).</p>	<p>Examinar las propiedades mecánicas de los TFA del mercado y los DPA bajo condiciones <i>in vitro</i> y en un entorno oral simulado.</p>	<p>Hubo diferencias notables en el módulo elástico, la resistencia a la tracción y la relajación a la tensión entre las muestras analizadas.</p>	<p>La humedad altera los TFA y DPA a diferentes velocidades. Los niveles de tensión residual de los DPA fueron notablemente más bajos. Los DPA aumentan su grosor tras la impresión. Lavar los DPA en alcohol puede afectar negativamente sus propiedades mecánicas.</p>
<p><i>Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners</i> (34) Tipo de estudio: estudio experimental <i>in vitro</i> Año: 2020</p>	<p>Se imprimieron alineadores con 3 espesores diferentes (0,5mm, 0,75mm y 1mm) con 2 resinas diferentes LT dental y gris V4 a través de estereolitografía.</p>	<p>Investigar las consecuencias del grosor del alineador diseñado digitalmente.</p>	<p>Los datos que revela el software de metrología indican que los DPA eran más gruesos en general que el archivo de diseño correspondiente, siendo Dental LT los que mayor desviación presentaban.</p>	<p>Al ser impresos los alineadores en 3D se permite crear diferentes grosores. Aparecen espesores de pared aumentados a los diseñados, pudiendo afectar esto a su utilidad clínica.</p>
<p><i>Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D</i></p>	<p>Denticiones de diferentes pacientes fueron escaneadas para diseñar modelos dentales e</p>	<p>Comparar la precisión geométrica así como las propiedades mecánicas de compresión entre los</p>	<p>Los DPA mostraron mayor precisión geométrica, con una diferencia media en altura dental del 2,55% frente al</p>	<p>Los alineadores impresos en 3D muestran mayor resistencia a la compresión, mayor precisión y</p>

<p><i>printed clear dental aligners</i> (35) Tipo de estudio: estudio experimental <i>in vitro</i> Año: 2019</p>	<p>imprimirlos en 3D para fabricar los TFA Duran. Para el mismo modelo se diseñaron alineadores dentales y se imprimieron utilizando resina Dental LT (en impresora 3D Formlabs). Cinco observadores midieron la altura dental y se aplicó una carga de 1000N para evaluar la deformación y el comportamiento mecánico de ambos alineadores</p>	<p>TFA Duran y los DPA a base de resina Dental LT.</p>	<p>4,41% de los TFA. Ambos tipos presentaron baja variabilidad entre observadores (0,03-0,09mm). En pruebas de carga, los alineadores 3D resistieron hasta 662N con deformación elástica, mientras que los TFA solo alcanzaron 105N y se deformaron plásticamente de forma irreversible.</p>	<p>menores costos de procesamiento que los termoformados.</p>
<p><i>Mechanical behavior of 3D printed vs thermoformed clear dental aligner materials under non-linear compressive loading</i> (36) Tipo de estudio: estudio experimental <i>in vitro</i> Año: 2020</p>	<p>Se utilizó el software GeoMagic Design X para diseñar los alineadores que posteriormente se sometieron a un análisis de la distribución de estrés en molares, incisivos y caninos.</p>	<p>Investigar la diferencia entre los materiales Scheu-Dental Duran y Durasoft para la creación de TFA y Dental LT para la de DPA.</p>	<p>Se descubrió que la tensión máxima (equivalente a la fuerza de mordida humana de hasta 600N, en todas las secciones, de una forma no lineal) varía del 0,2 al 7,7% en el caso de la resina Dental LT.</p>	<p>La resina Dental LT es un material alternativo ideal para ser impreso en 3D, resistente a fuerzas mecánicas, más preciso, biocompatible y con un procesamiento más rápido. Materiales como Duran y Durasoft implican mayor tiempo de procesamiento.</p>
<p><i>Clinically Relevant Properties of 3D Printable Materials for Intraoral Use in</i></p>	<p>Se utilizaron bases de datos como MEDLINE/PubMed, Scopus y Cochrane</p>	<p>Analizar la evidencia disponible sobre los materiales imprimibles en 3D y las técnicas</p>	<p>Esta revisión se centró en alineadores y retenedores impresos en 3D, analizando su ajuste geométrico, resistencia</p>	<p>La evidencia actual sobre la aplicación de impresión 3D en ortodoncia es limitada, heterogénea y poco transferible a la práctica clínica debido</p>

<p><i>Orthodontics: A Critical Review of the Literature</i> (37)</p> <p>Tipo de estudio: revisión narrativa</p> <p>Año: 2023</p>	<p>Library. Un total de 47 artículos fueron utilizados.</p>	<p>utilizadas para la fabricación de aparatos de ortodoncia, centrándose en las propiedades de los materiales clínicamente relevantes.</p>	<p>mecánica y biocompatibilidad. Se encontró que la precisión dimensional depende del tipo de tecnología de impresión, orientación y tratamiento post-impresión, aunque los protocolos utilizados fueron muy variados y carecen de estandarización. Las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, dureza y relajación por estrés se evaluaron, pero sin seguir criterios uniformes. En cuanto a biocompatibilidad, los ensayos se realizaron principalmente con lixiviados en agua y a temperatura constante, sin simular condiciones orales reales como variaciones de pH o fuerzas masticatorias. La dimensión estética apenas fue explorada.</p>	<p>a la falta de protocolos normalizados. Para avanzar hacia un uso seguro y eficaz de dispositivos intraorales impresos en 3D, se requiere el desarrollo de normas internacionales que regulen las pruebas mecánicas, biológicas y estéticas bajo condiciones representativas del entorno bucal. Además, es fundamental realizar estudios clínicos bien diseñados y de seguimiento prolongado que validen los hallazgos experimentales en pacientes reales.</p>
--	---	--	---	--

Tabla 2: Tabla comparativa de los artículos incluidos en la revisión bibliográfica

6. Discusión

6.1. Materiales para alineadores impresos en 3D y procesos de fabricación

La irrupción de la impresión 3D en ortodoncia ha impulsado el desarrollo de materiales específicos para alineadores transparentes, siendo el Tera Harz TC-85 (Graphy) y la resina Dental LT Clear (Formlabs) los más estudiados frente a otros menos presentes en la literatura como Noxi, LuxCreo, Material X o OD-Clear TF. A diferencia de hace unos años, cuando no existían materiales específicos para la impresión directa de alineadores (29), actualmente existen opciones comerciales aprobadas por organismos internacionales como la FDA, la Administración de Alimentos y Medicamentos de Corea, la Comisión Europea y los Estados Unidos (28). Sin embargo, tal y como se recoge en numerosas revisiones, aún se requieren estudios clínicos sólidos para garantizar su eficacia y seguridad en la práctica diaria (25). Esto pone de manifiesto el panorama aún en evolución, donde la innovación tecnológica avanza más rápido que la evidencia clínica.

El material TC-85 destaca por incorporar memoria de forma, una propiedad ausente en los alineadores termoformados tradicionales (TFA) (26,37), que permitiría revertir ciertos cambios mecánicos y prolongar la vida útil del alineador, aportando potencialmente a una ortodoncia más sostenible. Otra propiedad exclusiva de esta resina es la capacidad de girar los dientes hasta 35° hasta su correcto ajuste (24). Sin embargo, otros artículos como el de Bleilöb et al. cuestiona la recomendación del fabricante sobre extender el curado UV más allá de los 20 minutos, especialmente en capas gruesas que superen los 0,7mm, señalando que no siempre mejora las propiedades del material (27). Debemos considerar que, en este ensayo, no se voltearon las muestras después del curado de 20 minutos tal y como sugiere la nueva recomendación. Además, subraya la necesidad de considerar las condiciones intraorales, como la exposición a las enzimas salivales o las variaciones de pH, que pueden reducir la biocompatibilidad celular (27). Además, otros estudios afirman que el comportamiento de esta resina no se ve alterado por el uso intraoral tras una semana de uso (26,31,37). Aunque prometedora, la implementación clínica del TC-85 exige más evidencia sobre su rendimiento a largo plazo (25).

Desde el punto de vista mecánico, los estudios comparativos entre alineadores impresos (DPA) y termoformados (TFA) arrojan resultados dispares. En una evaluación *in vitro* (27,32), el alineador impreso TC-85 mostró una elevada pérdida de resistencia al estrés en comparación con otros alineadores, con una pérdida del 90% en la primera prueba del 100% en la segunda, incluyendo el DPA Noxi, que fue el que mejor mantuvo las fuerzas aplicadas, con porcentajes de 23% a 32%. No obstante, el mismo artículo menciona que en ensayos de carga repetida, los DPA mejoran su fuerza estática y disminuye su relajación por estrés, lo que puede compensar algunas de sus limitaciones iniciales (24). Esta variabilidad resalta la importancia de optimizar los parámetros de diseño, curado y espesor en la fabricación de alineadores impresos.

En cuanto a la biocompatibilidad, Dental LT ha sido ampliamente estudiada y es considerada segura, como material de clase IIa (36), para aplicaciones intraorales, aunque originalmente esté indicada para férulas y no para alineadores (25,35). A pesar de ello, ha demostrado un buen desempeño mecánico y una geometría precisa, superando incluso a materiales termoformados como Duran en varios aspectos (28,36). Sin embargo, su falta de flexibilidad requiere incorporar un desplazamiento adicional de 0,25mm en el diseño digital para lograr un buen

ajuste clínico (25,26). Esto refleja cómo el éxito de los alineadores impresos no solo depende del material, sino también de un diseño y procesamiento adecuados.

Los estudios coinciden en que tanto TC-85 como Dental LT poseen propiedades mecánicas aceptables y buena compatibilidad (26,28), aunque siguen existiendo desafíos como la variabilidad entre lotes, la relajación por estrés o la falta de uniformidad en el grosor de impresión. A pesar de estas limitaciones, el control preciso del espesor que permite la impresión 3D representa una ventaja significativa frente a los TFA, ya que permite personalizar las fuerzas ortodóncicas aplicadas, un factor clave para optimizar los resultados clínicos. Esta capacidad de personalización y eficiencia sugiere que los alineadores impresos pueden ser una alternativa viable, siempre que se respeten protocolos estandarizados de producción.

Por último, aunque la resina Dental LT ha demostrado ser precisa, resistente y compatible con la impresión 3D (37), no ha sido diseñada específicamente para alineadores, lo que limita su potencial clínica frente a materiales como TC-85, concebido exclusivamente con este fin. De forma paralela, otras opciones como LuxCreo o Noxi han sido aprobadas por la FDA (28), pero carecen aún de estudios comparativos suficientes. Esto refuerza la necesidad de seguir investigando para establecer parámetros clínicos y técnicos estandarizados que permitan ampliar el abanico de materiales válidos para impresión directa en ortodoncia.

6.2. Ventajas operativas y clínicas de los alineadores impresos directamente en 3D

Uno de los principales beneficios operativos de los alineadores impresos directamente (DPA) es la significativa reducción en los tiempos de producción. Según el estudio llevado a cabo por Migliorati et al., el tiempo total desde el escaneo intraoral hasta la obtención del alineador final listo para la entrega al paciente fue de aproximadamente 35 minutos con alineadores DPA, frente a los 100 minutos necesarios para producir alineadores termoformados (TFA) (38). Esta diferencia se debe en gran parte a la eliminación de pasos intermedios como la impresión del modelo físico y el termoformado, tal como también se expone en otro artículo (24). Esta optimización del flujo de trabajo representa un avance considerable en la eficiencia clínica, pero puede variar en función de los equipos utilizados, en este caso un software como OnyxCeph®, una impresora 3D Phrozen Sonic XL 4K 2022, una resina compatible como Tera Harz TC-85DAC y una unidad de curado como Tera Harz Cure han sido necesarios.

Además de reducir el tiempo de trabajo, los alineadores impresos directamente ofrecen una ventaja estratégica en términos de autonomía clínica. Su producción puede realizarse íntegramente dentro de la consulta gracias a la combinación de escáneres intraorales, software de diseño CAD/CAM y tecnologías de impresión y curado compatibles (28,38). Esto elimina la necesidad de depender de laboratorios externos y permite al ortodoncista tener un control total sobre la planificación y ejecución del tratamiento. Al eliminar la subcontratación, también se reducen costes derivados de transporte, almacenamiento y márgenes de intermediarios, al tiempo que se evita el riesgo de retrasos en la entrega de los dispositivos (28).

Desde una perspectiva logística, los DPA permiten configurar un entorno clínico más limpio y eficiente. La ausencia de pasos como el recorte y pulido, propios de los alineadores termoformados, minimiza la generación de polvo y residuos, lo que repercute positivamente en la higiene del espacio de trabajo y en la salud personal (24). Asimismo, la posibilidad de

imprimir múltiples alineadores de forma simultánea sin comprometer su calidad final (24) mejora la capacidad productiva, siendo especialmente útil para tratamientos que requieren varios alineadores en diferentes fases.

El uso de DPA también permite acortar los ciclos de tratamiento, ya que la fabricación más rápida facilita el reemplazo frecuente de alineadores sin necesidad de esperar los tiempos propios de los procesos tercerizados (28). Esto se traduce en mayor agilidad en la respuesta clínica ante ajustes en el plan terapéutico y una experiencia más fluida para el paciente. Además, el menor desperdicio de material y la personalización del grosor en zonas específicas del alineador permiten un uso más racional de los recursos (28), lo que también contribuye a la sostenibilidad del tratamiento.

En conjunto, la impresión directa de alineadores representa una revolución operativa en ortodoncia digital: reduce costes, tiempos y dependencia externa, al tiempo que mejora la higiene, eficiencia y control clínico del tratamiento. Estos beneficios refuerzan su potencial como herramienta clave en la práctica ortodóntica moderna.

6.3. Consideraciones biomecánicas y limitaciones clínicas en el uso de los alineadores impresos en 3D

Falta de estandarización en investigación y planificación clínica

La bibliografía revisada destaca una gran heterogeneidad en los protocolos de investigación relacionados con los alineadores impresos en 3D, lo cual refleja la ausencia de estándares universales para evaluar sus propiedades *in vitro* (37). Esta variabilidad complica la comparación directa entre materiales y limita la formulación de recomendaciones clínicas consistentes.

La planificación exitosa de un tratamiento con DPA no solo requiere una evaluación adecuada del paciente, sino también la selección precisa de parámetros como grosor, exactitud, estabilidad, propiedades mecánicas y biocompatibilidad (28). Estos factores se entrelazan y determinan la capacidad del alineador para ejecutar movimientos dentales complejos de forma predecible.

Requisitos biomecánicos y limitaciones de rigidez

Los estudios coinciden en que un alineador ideal debe mostrar rigidez suficiente para ejercer fuerzas controladas, al tiempo que mantenga una elasticidad que permita un ajuste cómodo y efectivo. Sin embargo, si el material es demasiado rígido, la inserción puede dificultarse; si es demasiado flexible, se compromete la eficacia mecánica (24,28). El grosor del alineador generalmente se encuentra entre valores de 0,5mm a 1,5mm como lo indica la literatura (28). Además, los materiales usados en alineadores poseen un módulo elástico mucho menor (40-50 veces más bajo) que los arcos de Ni-Ti, lo que los hace más susceptibles a deformaciones permanentes (24,28).

Relajación de tensión y deformación bajo carga

En condiciones ideales, los alineadores deberían mantener la rigidez dentro del rango elástico con el paso del tiempo para lograr con el rebote, enderezar el diente. No obstante, diversos estudios muestran cómo la relajación de tensión es inevitable, especialmente tras cargas prolongadas (mientras ejercen presión sobre los dientes) (28,32,35). Para minimizar este fenómeno, se requiere que la curva de relajación del material sea plana y constante. En el estudio de Jindal et al. los DPA fabricados con resina Duran resistieron hasta 662N con deformación elástica mientras que los TFA solo alcanzaron 105N deformándose de forma irreversible (35). El proceso de postcurado mejora la resistencia a compresión (hasta un 75%) y reduce la deformación (en un 70%) frente a los TFA, siendo los DPA más resistentes a deformaciones irreversibles (35).

Limitaciones del posprocesamiento y del ambiente intraoral

Las condiciones de fabricación, como el postcurado y el uso de alcohol isopropílico, pueden afectar negativamente tanto la transparencia como las propiedades mecánicas del alineador impreso, especialmente en ambientes húmedos o con alta carga térmica (39). Además, estudios *in vivo* sugieren que algunos DPA como los fabricados con TC-85 mantienen sus propiedades después de una semana de uso, permitiendo incluso la desinfección con agua caliente a 80°C (26,31).

Capacidades mecánicas frente a TFA

En pruebas comparativas, los DPA muestran fuerzas comparables a los TFA (39), aunque algunos alineadores impresos presentan valores inferiores de tensión residual, lo cual puede implicar una menor durabilidad si no se optimiza el material o el diseño (39). Como ocurre en el estudio de Shirey et al. donde los alineadores se someten a niveles de tensión residual del 2% durante 2 horas y los DPA como Material X y OD-Clear TF muestran resultados más bajos en comparación con los TFA (39). Sin embargo, en otros estudios se demuestra que el módulo elástico de los DPA es mayor que el de los termoformados, lo cual podría mejorar su eficacia clínica, aunque afecte el confort del paciente (26,31).

Desafíos en movimientos dentales complejos

Los alineadores, en general, tienen limitaciones para reproducir movimientos como la extrusión o la rotación, ya que su fuerza se aplica principalmente a nivel coronal (28,38). En movimientos como la traslación radicular, es necesario un grosor mayor para generar las fuerzas necesarias, mientras que movimientos como el torque requieren materiales más delgados y flexibles (28). Esto destaca la necesidad de un diseño individualizado del grosor del alineador según el tipo de movimiento buscado.

Precisión de impresión y sobreconstrucción

Aunque varios estudios informan una mayor precisión geométrica de los DPA frente a los TFA (24,28,30,36), también se han reportado errores de sobreconstrucción de hasta 0,2mm respecto al archivo STL (34), lo cual puede comprometer el ajuste y la predictibilidad del movimiento dental. Sin embargo, son otros estudios más recientes los que desmienten esta teoría y afirman

que la diferencia milimétrica de impresión se encuentra en el rango de fallo de 0,25mm, lo mismo que sucede en los procesamientos de TFA (27). Es imprescindible mantener un contacto constante entre el alineador y el diente para garantizar un rendimiento óptimo, ya que cualquier espacio estaría impidiendo la plenitud del potencial mecánico (28). Por otro lado, otros estudios defienden que esta variabilidad puede ser controlada (en función de la tecnología de impresión o el postprocesamiento adecuado) y aprovechada estratégicamente para intensificar fuerzas en zonas específicas sin necesidad de elementos adicionales como aditamentos (por ejemplo la fabricación de aparatos de ortodoncia interceptiva como el Twin-Block u otro tipo de herramientas de avance mandibular) (27).

Rugosidad superficial y citotoxicidad

Los alineadores impresos tienden a mostrar una mayor rugosidad superficial que los TFA, sobre todo a partir de la primera semana de uso, lo cual podría incrementar la adhesión bacteriana. Esta rugosidad puede estar influenciada por parámetros como la orientación de impresión o el curado UV (24,26,31,39). El aumento de rugosidad puede estar relacionado con la facilidad a la adhesión bacteriana y la formación de una biopelícula, pero debe ser estudiado (26). A pesar de que algunos estudios no hallaron diferencias citotóxicas significativas, es necesario continuar evaluando el efecto de diferentes materiales y protocolos en la biocompatibilidad a largo plazo.

Impresoras y metodologías de impresión

No existe un consenso claro sobre qué tipo de impresora (SLA, DLP, LCD, cDLM) ofrece mejores resultados. Algunos estudios afirman que no hay diferencias estadísticamente significativas en precisión (25) mientras que otros destacan a SLA y PPP como las más exactas (25). SLA ofrece una alta resolución, aunque requiere un mayor postprocesamiento, aumentando el tiempo de producción (30). Por el contrario, DLP cura cada capa de forma simultánea con la luz proyectada, curando así, toda la capa a la vez (30). Aun así, se sigue prefiriendo SLA para tareas con necesidad de mayor detalle (30). Además, la elección entre sistemas cerrados y abiertos implica una disyuntiva entre control y flexibilidad (25). La orientación de impresión influye directamente en la precisión, el tiempo y los costes; el ángulo de 45° se considera el más rentable.

Últimas novedades en materiales

Recientemente, Graphy ha lanzado la resina Tera Harz TA-28, que mejora las propiedades biomecánicas y la biocompatibilidad de su predecesor TC-85, aunque aún requiere mayor validación científica (27). La formulación líquida de estas resinas es citotóxica antes del curado, lo que refuerza la necesidad de un postprocesamiento riguroso.

6.4. Citotoxicidad y estrogenicidad de los alineadores impresos en 3D

La biocompatibilidad es un criterio esencial en la fabricación de alineadores transparentes impresos en 3D, dada su exposición continua al entorno intraoral – dientes, mucosa y saliva – durante aproximadamente 22 horas al día (31). En este contexto, Tera Harz TC-85, Dental LT,

LuxCreo y Noxi han sido aprobadas como dispositivos médicos de clase II (26,28,31,36,38). Se ha demostrado que estos materiales, una vez curados, no presentan citotoxicidad ni estrogenicidad (26,28,31,36,38), aunque su forma líquida sea altamente tóxica, lo que subraya la importancia de un postprocesamiento riguroso para evitar efectos adversos (24).

El protocolo indicado por el fabricante exige etapas como la centrifugación durante 6 min a una velocidad de 500 a 600rpm (24), curado con luz UV en atmósfera de nitrógeno durante 20min para espesores entre 0,5-0,7mm y 25 min para espesores entre 0,8 y 1,5mm, lavado en agua hirviendo y secado (24). Su omisión podría comprometer la seguridad del alineador y, en consecuencia, conllevar responsabilidad legal por parte del ortodoncista (31). Casos clínicos han reportado inflamaciones compatibles con reacciones alérgicas tras el uso de alineadores mal curados (31,38).

Además, aunque no se detectaron efectos tóxicos inmediatos sobre fibroblastos humanos ni evidencia de disrupción endocrina, se identificaron niveles variables del monómero UDMA tras el envejecimiento del alineador (29-96 µg/L), lo que exige precaución adicional (26). La literatura señala también que la citotoxicidad podría mitigarse en el futuro mediante recubrimientos con polímeros naturales biocompatibles, como el quitosano (37).

6.5. Preocupaciones ambientales de los alineadores impresos en 3D

El auge de los alineadores transparentes ha generado una preocupación ambiental creciente debido a la gran cantidad de residuos plásticos no reciclables que se generan. Un solo tratamiento puede implicar la producción de docenas de alineadores de PETG o TPU, materiales derivados del petróleo, que terminan desechándose tras una semana de uso y pueden liberar micro y nanoplasticos con riesgo potencial para el medioambiente y la salud humana (24,31).

Frente a ello, los alineadores impresos directamente en 3D presentan ventajas en términos de sostenibilidad, al requerir menor consumo energético y permitir la reutilización de la resina líquida no curada (26). Aunque faltan estudios experimentales específicos, análisis del ciclo de vida han indicado que esta tecnología puede reducir significativamente la huella ecológica (26).

Ya se han puesto en marcha iniciativas como las de Impress (Europa) y Spotlight Oral Care (EEUU), que fomentan el reciclaje de alineadores usados, canalizándolos a través de organizaciones como TerraCycle (24). Además, se han propuesto vías de investigación para reutilizar materiales como el PET reciclado como filamento de impresión, fomentando así una economía circular (26).

Otra preocupación añadida es la transmisión de infecciones cruzadas, ya que muchos alineadores son desechados en la basura convencional (24). Por ello, la correcta eliminación y el desarrollo de materiales biodegradables o bioactivos deben ser considerados como prioridades en futuras investigaciones.

Por último, los polímeros con memoria de forma (SMP) pueden contribuir significativamente a la sostenibilidad, al reducir el número total de alineadores necesarios en un tratamiento (24).

6.6. Tendencia emergente: Polímeros con memoria de forma (SMP)

Los polímeros con memoria de forma (SMP) constituyen una línea prometedora dentro de la evolución tecnológica de los alineadores transparentes. Estos materiales, también denominados *polímeros activos*, se caracterizan por su capacidad de adoptar una forma temporal y recuperar la original al recibir un estímulo externo, como calor o humedad (24).

Esta propiedad deriva de una doble red polimérica: una estable, que fija la forma permanente, y otra reversible, que permite la deformación temporal. Entre sus cualidades destacan su baja densidad, elevada deformabilidad, estabilidad química y transparencia, todas ideales para aplicaciones ortodónticas (24). Las resinas basadas en poliuretano SMP, al combinar segmentos duros y blandos, ofrecen una resistencia mecánica elevada y buena tenacidad, además de menor susceptibilidad a la pigmentación intraoral.

Estudios recientes han propuesto que un solo alineador fabricado con SMP podría reemplazar hasta tres alineadores tradicionales, lo que reduciría residuos y mejoraría la adherencia al tratamiento (24). Su desarrollo e integración clínica requiere aún investigación adicional, pero su potencial para mejorar la eficiencia, durabilidad y sostenibilidad de la ortodoncia con alineadores es notable.

6.7. Limitaciones de cara al futuro de los DPA y del presente trabajo

A pesar de los avances tecnológicos que la impresión directa en 3D ha traído a la ortodoncia, los alineadores impresos directamente (DPA) todavía enfrentan importantes desafíos tanto técnicos como clínicos. Entre las principales limitaciones se encuentra la escasa disponibilidad de materiales aprobados para uso clínico y la falta de software específico optimizado para el diseño y fabricación de alineadores (29). Además, los altos costos iniciales de implementación y los complejos requisitos de posprocesamiento representan barreras significativas para su adopción masiva en la práctica diaria (30).

Actualmente, la mayoría de los estudios disponibles sobre DPA son *in vitro*, lo que evidencia que se trata de una tecnología en fase de desarrollo temprano. Esto impide aún realizar afirmaciones definitivas sobre su eficacia clínica, especialmente en condiciones intraorales reales (32). Así, resulta necesaria la realización de ensayos clínicos bien diseñados que validen la biocompatibilidad, durabilidad, predictibilidad del movimiento dentario y seguridad a largo plazo de los materiales empleados. También es urgente establecer estándares internacionales de prueba que permitan homogeneizar los protocolos de evaluación y hacer comparables los estudios existentes, dado que actualmente la heterogeneidad metodológica impide extraer conclusiones sólidas (37).

En este sentido, estudios recientes han señalado la necesidad de explorar más a fondo aspectos clínicos no cubiertos, como los efectos de los alineadores en movimientos de expansión (38), la evaluación tras deterioro por uso prolongado *in vivo* (32), y la posibilidad de personalizar las fuerzas aplicadas en función de la resistencia individual de la mordida (35). También es relevante estudiar aspectos aún inexplorados, como las propiedades estéticas, la estabilidad dimensional prolongada, la retención, la mejora de aditamentos y la posibilidad de incorporar nuevas técnicas de procesamiento que aumenten la precisión clínica (38).

Los materiales actuales también presentan limitaciones importantes. Aunque el Tera Harz TC-85 de Graphy ha sido aprobado por agencias como la FDA, CE y KFDA, su biocompatibilidad depende estrictamente del cumplimiento del protocolo de postprocesamiento, siendo la resina en estado líquido altamente tóxica (24,27,31). Además, si bien estudios preliminares indican ausencia de efectos estrogénicos o citotóxicos, la mayoría de las pruebas se han realizado por hidrólisis pasiva, sin considerar factores intraorales como el pH, la flora microbiana o la temperatura (37). Asimismo, la detección del monómero UDMA en niveles variables en algunos alineadores impresos en 3D apunta a la necesidad de más estudios sobre la seguridad química de estos dispositivos (26).

Desde el punto de vista medioambiental, si bien la impresión directa puede generar menos residuos que el termoformado, aún no existen estudios experimentales que validen su sostenibilidad real, y los alineadores continúan siendo difíciles de reciclar (26). La acumulación de micro y nanoplásticos en el medioambiente, su potencial efecto neurotóxico y la exposición prolongada en pacientes – especialmente en niños y adolescentes – añaden una dimensión ética y ecológica que debe considerarse en futuros desarrollos (31).

Más allá de los aspectos técnicos y biológicos, se deben considerar también las limitaciones clínicas y prácticas. Al tratarse de un dispositivo removible, el éxito del tratamiento con alineadores depende en gran medida de la cooperación del paciente, que debe usarlo al menos 22 horas al día (16). Una baja adherencia, junto con deficiencias en la higiene oral, falta de asistencia a controles o alteraciones óseas no detectadas, pueden comprometer los resultados (16). A esto se suma el alto coste económico del tratamiento frente a los sistemas tradicionales (16), lo que limita su accesibilidad.

Frente a estas limitaciones, los polímeros con memoria de forma (SMP) representan una alternativa prometedora. Estos materiales permiten la recuperación de forma tras deformación. Una propiedad que podría prolongar el uso de un mismo alineador, disminuir el número de fases en el tratamiento y aumentar la sostenibilidad (24,37). Gracias a su combinación de transparencia, elasticidad y resistencia a manchas, podrían convertirse en materiales ideales para la ortodoncia con alineadores en el futuro (24).

En suma, aunque los alineadores impresos en 3D han demostrado ser una alternativa eficaz frente a los termoformados, la consolidación de su uso depende de superar múltiples barreras científicas, técnicas, clínicas y regulatorias. Este artículo ha identificado importantes vacíos de conocimiento y propone como prioridad futura el desarrollo, de materiales más seguros, sostenibles y clínicamente validados, junto con protocolos estandarizados y estudios clínicos robustos que respalden su eficacia real.

7. Conclusiones

- La impresión directa en 3D supone un cambio tecnológico clave en ortodoncia al permitir fabricar alineadores sin termoformado, optimizando tiempos, costes y control clínico.
- Los alineadores impresos directamente (DPA) ofrecen ventajas significativas frente a los termoformados (TFA), como mayor precisión geométrica, resistencia mecánica, personalización del diseño y reducción de residuos.
- Materiales innovadores como el TC-85 con memoria de forma abren nuevas posibilidades biomecánicas, permitiendo optimizar el número de alineadores necesarios por tratamiento. Los SMP en general se perfilan como una línea de desarrollo prometedora para mejorar la durabilidad, eficiencia y sostenibilidad de los tratamientos.
- Pese a estas ventajas, persisten desafíos importantes en biocompatibilidad, que exigen un estricto cumplimiento del protocolo de postprocesamiento para evitar riesgos tóxicos.
- La evidencia científica actual sigue siendo limitada y se encuentra la mayoría en fase experimental, con predominancia de estudios *in vitro* y falta de ensayos clínicos sólidos que validen su seguridad y eficacia a largo plazo; limitando así la posibilidad de establecer recomendaciones definitivas.
- La implementación clínica de los DPA requiere mejorar estándares de impresión y curado, formación profesional específica y avanzar en el desarrollo de materiales más seguros, bioactivos y sostenibles.

8. Referencias bibliográficas

1. Proffit WR, Fields HWJ, Sarver DM. Ortodoncia Contemporánea. 4ª ed. Barcelona: Elsevier España; 2008.
2. García González LR, González Bertot N. Personalidades de la ortodoncia en el mundo. *Rev Inf Cient* 2011;70(2).
3. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J* 2017 -03;62 Suppl 1:58–62.
4. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Periodontal health during clear aligners treatment: a systematic review. *Eur J Orthod* 2015 Oct 1;37(5):539–543.
5. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. *Angle Orthod* 2015 Sep 1;85(5):881–889.
6. Guerra P, Marin H, Echeverri N. Alineadores una opción en Ortodoncia Estética, revisión de literatura. 2021-01-31 .
7. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J Orthod Oral Surg* 1945 Jan 1;31(6):297–304.
8. Kesling HD. Coordinating the predetermined pattern and tooth positioner with conventional treatment. *Am J Orthod* 1946;32:285–293.
9. Garcia Rodriguez IM. Comparación dimensional de prototipo de alineador impreso 3D de una imagen tomográfica versus alineador termoformado. 2020 June 22.
10. d'Apuzzo F, Perillo L, Carrico CK, Castroflorio T, Grassia V, Lindauer SJ, et al. Clear aligner treatment: different perspectives between orthodontists and general dentists. *Prog Orthod* 2019 -03-11;20(1):10.
11. Hennessy J, Al-Awadhi EA. Clear aligners generations and orthodontic tooth movement. *J Orthod* 2016 -03;43(1):68–76.
12. Ponitz RJ. Invisible retainers. *Am J Orthod* 1971 -03;59(3):266–272.
13. Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod* 1993 -01;27(1):37–45.
14. Farishta S. Patient's Perceptions Regarding Orthodontic Needs and Satisfactory Level with the Procedure. *J Int Oral Health* 2015 -09;7(9):79–82.
15. Domingo-Jiménez T, González-Olmo MJ, Nieto-Moraleda C, Pérez-Chicharro M, Romero-Maroto M. Colourimetric changes experienced in three types of aligners according to the L'Eclairage Commission. *Eur J Orthod* 2024 Oct 1;46(5).

16. Prasanna-Kumar S, Shah D, Shah N, Shah S, inventors. Real 3d Polymers Group LLC, assignee. Direct 3D-printed orthodontic aligners with torque, rotation, and full control anchors. US patent US10179035B2. 2019 January 15.
17. Gracco A, Mazzoli A, Favoni O, Conti C, Ferraris P, Tosi G, et al. Short-term chemical and physical changes in Invisalign appliances. *Aust Orthod J* 2009 May 1;25(1):34–40.
18. Moshiri M, Eckhart JE, McShane P, German DS. Consequences of poor oral hygiene during aligner therapy. *J Clin Orthod* 2013 Aug;47(8):494–498.
19. Tsomos G, Ludwig B, Grossen J, Pazera P, Gkantidis N. Objective assessment of patient compliance with removable orthodontic appliances: a cross-sectional cohort study. *Angle Orthod* 2014;84(1):56–61.
20. Lombardo L, Martini M, Cervinara F, Spedicato GA, Oliverio T, Siciliani G. Comparative SEM analysis of nine F22 aligner cleaning strategies. *Prog Orthod* 2017 Sep 11;18(1):26.
21. Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G. Optical properties of orthodontic aligners--spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog Orthod* 2015;16:41.
22. Morton J, Derakhshan M, Kaza S, Li C. Design of the Invisalign system performance. *Semin Orthod* 2017 Mar 01;23(1):3–11.
23. Chang DM, Chen DCH, Chang DC, Lin DJ, Chang DCH, Roberts DWE. Introduction to Invisalign Smart Technology: Attachments Design, and Recall-Checks. *J Digit Orthod* 2019;54(80-95):14.
24. Alkhamees A. The new additive era of orthodontics: 3D-printed aligners and shape memory polymers-the latest trend-and their environmental implications. *J Orthod Sci* 2024 Nov 1;13(1):55.
25. Boo HS, Sivarajan S, Nor zahidah Mohd Tahir N, Bahar AD. Accuracy of three-dimensionally printed retainers and aligners. *J Orofac Orthop* 2025 February 19.
26. Torkomian T, de la Iglesia F, Puigdollers A. 3D-printed clear aligners: An emerging alternative to the conventional thermoformed aligners? – A systematic review. *J Dent* 2025 Apr 1;155:105616.
27. Bleilöb M, Welte-Jzyk C, Knode V, Ludwig B, Erbe C. Biocompatibility of variable thicknesses of a novel directly printed aligner in orthodontics. *Sci Rep* 2025 Jan 25;15(1):3279–8.
28. Narongdej P, Hassanpour M, Alterman N, Rawlins-Buchanan F, Barjasteh E. Advancements in Clear Aligner Fabrication: A Comprehensive Review of Direct-3D Printing Technologies. *Polymers (Basel)* 2024 -01-29;16(3):371.

29. Tartaglia GM, Mapelli A, Maspero C, Santaniello T, Serafin M, Farronato M, et al. Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities. *Materials (Basel)* 2021 -04-05;14(7):1799.
30. Jun M, Kim J, Ku H. Three-Dimensional Printing in Dentistry: A Scoping Review of Clinical Applications, Advantages, and Current Limitations. *Oral* 2025;5(2):24.
31. Erbe C, Ludwig B, Bleilöb M. Unlocking the biological insights of 3D printed aligners: A look at current findings. *Seminars in Orthodontics* 2025 -02-01;31(1):139–143.
32. Cremonini F, Bruccheri L, Pepe F, Palone M, Lombardo L. Comparison of stress relaxation properties between 3-dimensional printed and thermoformed orthodontic aligners: A pilot study of in vitro simulation of two consecutive 8-hours force application. *APOS-Trends Orthod* 2024 -11-19;14(4):225–234.
33. Rajagopalan A, Verma S, Kumar V, Verma RK, Singh SP. Accuracy of 3D Printing in Orthodontics: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Indian Orthod Soc* 2024 July 1;58(3):218–235.
34. Edelmann A, English JD, Chen SJ, Kasper FK. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2020;158(5):e91–e98.
35. Jindal P, Juneja M, Siena FL, Bajaj D, Breedon P. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2019;156(5):694–701.
36. Jindal P, Worcester F, Siena FL, Forbes C, Juneja M, Breedon P. Mechanical behaviour of 3D printed vs thermoformed clear dental aligner materials under non-linear compressive loading using FEM. *J Mech Behav Biomed Mater* 2020 -12;112:104045.
37. Goracci C, Juloski J, D'Amico C, Balestra D, Volpe A, Juloski J, et al. Clinically Relevant Properties of 3D Printable Materials for Intraoral Use in Orthodontics: A Critical Review of the Literature. *Materials (Basel)* 2023 -03-08;16(6):2166.
38. Migliorati M, Drago S, Castroflorio T, Pesce P, Battista G, Campobasso A, et al. Accuracy of orthodontic movements with 3D printed aligners: A prospective observational pilot study. *Korean J Orthod* 2024 May 25;54(3):160–170.
39. Shirey N, Mendonca G, Groth C, Kim-Berman H. Comparison of mechanical properties of 3-dimensional printed and thermoformed orthodontic aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2023 May 1;163(5):720–728.