

# Alineadores ortodónticos y la necesidad de valorar su impacto ambiental

Javier Iván Martínez-Hernández<sup>1</sup>, Adolfo González Acosta<sup>1</sup>, Kenia Ivet Bravo-Molinar<sup>1</sup>, Perla Rocío Ruiz Chávez<sup>1,2</sup>, Alejandra Reneé Chacón Hernández<sup>1,2</sup>, Carlos Esteban Villegas-Mercado<sup>1</sup>, Sandra Aidé Santana-Delgado<sup>1</sup>, Emilio Maguregui-Salazar<sup>1</sup>, Carla Andrea Paredes-Díaz<sup>1</sup> y Mercedes Bermúdez-Cortés<sup>1,\*</sup>

Facultad de Odontología<sup>1</sup>, Maestría en Estomatología- Facultad de Odontología<sup>2</sup>,  
Universidad Autónoma de Chihuahua  
Chihuahua, Chih.; México

\*Autora de correspondencia: mbermudez@uach.mx

**Abstract**— Orthodontic aligners (AO) stand out as an aesthetic and comfortable alternative in orthodontics. However, they also raise concerns about their environmental impact due to the production of plastic waste. Therefore, the purpose of this study is to analyze what AO are, their effect on oral health, and the environmental impact caused by single-use plastic production. Although aligners minimize the impact on the oral microbiome, their increased use has become an environmental concern, and their production generates non-reusable waste. Exploring sustainable alternatives and promoting waste management is suggested to mitigate their environmental impact and ensure long-term sustainability.

**Keywords**— Orthodontic aligners, Clear aligners, Plastic, Environment, Orthodontics.

**Resumen**— Los alineadores ortodónticos [AO] destacan como una alternativa estética y cómoda en ortodoncia, pero también plantea preocupaciones sobre su impacto ambiental debido a la producción de residuos plásticos. Por lo tanto, la finalidad de este trabajo es analizar qué son los AO, su efecto sobre la salud oral y el impacto que causan en el medio ambiente por la producción de plásticos de un solo uso. Aunque los alineadores minimizan el impacto en el microbioma oral, el aumento en su uso se ha convertido en una preocupación ambiental y su producción genera residuos no reutilizables. Se sugiere explorar alternativas sostenibles e incentivar en la gestión de residuos para mitigar su impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

**Palabras clave**— Alineadores ortodónticos, Alineadores transparentes, Plástico, Medio ambiente, Ortodoncia.

## I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento ortodóntico fijo es el método más común para interceptar, corregir o incluso prevenir el desarrollo de maloclusiones; sin embargo, la higiene bucal es más difícil debido al acceso al cepillado de todas las superficies, lo que representa un desafío para contrarrestar el potencial cariogénico de las bacterias que forman parte de la microbiota en la cavidad oral y también para preservar la salud de los tejidos periodontales [1]. Se han informado efectos de los aparatos ortodónticos en la inflamación gingival con acumulación de biopelícula [2]. Estudios previos encontraron durante el tratamiento ortodóntico diversos tipos de bacterias asociadas con el desarrollo de enfermedad periodontal como son *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus* spp., *Porphyromonas gingivalis*, *Tannerella forsythia*, *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* y *Fusobacterium nucleatum* [3-6] concluyendo que la intervención de aparatos fijos convencionales, de autoligado e incluso removibles tienen una influencia significativa en el tratamiento ortodóntico y en la salud oral [7]. Es por esto que han surgido estrategias terapéuticas que prometen disminuir el riesgo cariogénico y periodontal del tratamiento ortodóntico, un ejemplo claro son los alineadores transparente, también llamados alineadores ortodónticos [AO], ya que, en la última década, han sido impulsados por la demanda de pacientes que buscan tratamientos menos invasivos y más cómodos, cambiando la forma en que se aborda la maloclusión [8].

Los AO son una modalidad de tratamiento popular para corregir maloclusiones y mejorar la estética oral [9]. Los AO son una técnica reciente utilizada en ortodoncia [10, 11]. Son polímeros de resina transparente fabricados a la medida exacta del arco dental de cada paciente y consisten en el uso secuencial de guardas poliméricas en las diferentes etapas del tratamiento [12]. Los AO aplican fuerzas suaves y controladas a los dientes, que los mueven gradualmente a la posición deseada mediante varias guardas de plástico derivadas de un software de planificación virtual y modelos dentales impresos en 3D, o generados directamente por impresión 3D, sin necesidad de modelos físicos [13]. El material más utilizado para los alineadores es una forma patentada de plástico de poliuretano conocida como resina a base de poliuretano [14].

Los materiales de los AO transparentes cuentan con diversas propiedades las cuales se consideran como ideales para el tratamiento ortodóntico: Adaptabilidad, estabilidad dimensional, transparencia [deben dejar pasar un 80% de la luz visible], estabilidad del color, resistencia al estrés, durabilidad, superficie resistente y biocompatibilidad [14]. Sin embargo, debido a su creciente popularidad y a que los pacientes requieren cambiar de AO semanalmente o determinados días, es necesario considerar el daño que estos están creando en el ambiente ya que los materiales utilizados en su manufactura tienen un nivel muy alto de la resistencia al deterioro [15].

En la actualidad, el mundo está atravesando lo que se conoce como la "Era del Plástico" [16]. En la vida contemporánea, resulta difícil encontrar un artículo de uso común que no esté hecho de plástico, como consecuencia, la producción y el consumo de plástico han aumentado de manera exponencial, convirtiéndose en una de las principales preocupaciones en el manejo de residuos lo que ha llevado a los microplásticos [MP] a convertirse en una nueva fuente de contaminación peligrosa para la salud [17]. Impulsado por el estilo de vida moderno y acelerado posterior a la Segunda Guerra Mundial, ahora es imposible pasar un día sin usar algún tipo de plástico. El brote de COVID-19 amplió aún más el uso del plástico para la "sanitización y seguridad" además del alto volumen de desechos plásticos usados por su conveniencia, bajo costo, durabilidad, irrompibilidad, resistencia al calor y ligereza [18]. Se han llevado a cabo gran cantidad de investigaciones sobre la influencia de los MP en el entorno marino hasta el suelo, las aguas subterráneas, el aire y la cadena alimentaria [19], esto lleva a preguntarnos cuál es el papel del ortodoncista y como su práctica afecta a estos problemas. Por lo tanto, la finalidad de este trabajo es revisar qué son los AO, los materiales con que son fabricados, el efecto que estos dispositivos tienen en la salud oral y el impacto que pueden tener en el medio ambiente por la producción de plásticos de un solo uso que deben ser cambiados constantemente durante un tratamiento ortodóntico.

## II. ALINEADORES ORTODÓNTICOS

### A. Evolución histórica de los alineadores ortodónticos.

La evolución de los aparatos fijos a los AO representa variaciones y mejoras incrementales en los últimos 100 años comenzando con el sistema de brackets y alambres y llegando ahora a los polímeros utilizados como aparatos [Tabla 1], [2, 20].

Hola

Tabla 1. Historia de los alineadores ortodónticos

Año	Acontecimiento
1945	Los inicios de los alineadores transparentes, cuando Kesling propuso un aparato claro para posicionar los dientes mediante vacío, destinado a desencadenar movimientos dentales menores que requerían el reposicionamiento manual de los dientes en cera. Se fabricaba un retenedor claro mediante vacío para cada movimiento dental en una serie de etapas hasta que los dientes quedaban alineados [14, 21, 22].
1964	Nahoum informó varios casos de tratamiento de maloclusiones utilizando láminas plásticas y modelos de yeso con dientes reposicionados [14, 23].
1971	Ponitz creó un retenedor invisible usando polimetilmetacrilato, conocido como Biocryl [14, 24].
1985	McNamara tomó la idea de Ponitz, considerando que el retenedor invisible podría ser usado en el final del tratamiento de ortodoncia o bien de manera transicional durante el tratamiento [14].
1993	Sheridan modificó la técnica, incluyendo la reducción interproximal y creó el aparato Essix; sin embargo, la fabricación del aparato era un proceso complicado que requería la toma de impresiones en cada cita [14, 25].
1997	La aplicación de gráficos de imagen computarizada en 3D al campo de la ortodoncia llevó a la creación del primer sistema de alineadores claros personalizados producido en masa en el mundo. Son alineadores de poliuretano extraíbles lanzados por Align Technology (Santa Clara, CA, Estados Unidos) [11, 26].

Recientemente generaciones jóvenes de ortodontistas consideran que el uso de los AO pueden ser la mejor técnica como tratamiento de las maloclusiones [11]. Hoy en día, los alineadores transparentes están fabricados con diferentes polímeros que están expuestos al entorno intraoral del medio ambiente, que comprende diferentes sustancias, incluyendo agua, electrolitos, enzimas y bacterias, entre otros componentes [27]. Además, los cambios en la acidez en la saliva requieren un polímero resistente a la corrosión química y con estabilidad térmica, sin cambio en volumen y rendimiento mecánico, para resistir las fuerzas oclusales, evitando fracturas o deformaciones al mismo tiempo que mantiene elasticidad y baja dureza [11].

### *B. Materiales y manufactura moderna*

Se emplean varios materiales termoplásticos, o combinaciones de polímeros, para la fabricación de estos dispositivos; estos incluyen cloruro de polivinilo, poliuretano, tereftalato de polietileno y tereftalato de polietileno glicol [Tabla 2] [28]. Actualmente, el proceso para crear un conjunto de alineadores transparentes comienza con un software de planificación virtual utilizando la impresión inicial de yeso que se escanea posteriormente o un escaneo intraoral directo [8], la posición de los dientes se manipula mediante movimientos secuenciales hacia las posiciones finalmente deseadas, dando como resultado la generación de modelos virtuales con dientes en diferentes posiciones para cada etapa [29], se necesita un modelo físico en 3D para cada alineador individual del conjunto de tratamiento, y se realiza mediante un método aditivo o sustractivo, comúnmente es la impresión en 3D, estereolitografía o inyección de material [28]. La impresión tridimensional con resina es actualmente la técnica principal para la fabricación de modelos de ortodoncia [29]. Luego, la serie correspondiente de alineadores transparentes se termoforma en las copias físicas y finalmente se recorta y pule, dependiendo del tipo de maloclusión, será el número de alineadores sumado al protocolo de cambio y refinamientos por lo que la cantidad de plástico generada por el tratamiento con AO es cada vez más preocupante [28].

Tabla 2. Materiales de los alineadores ortodónticos.

Material	Descripción
Polipropileno	Son plásticos cristalinos, estos tienen mayor área para soportar una fuerza de masticación, este polímero es más fuerte, duro, rígido y menos susceptible a una deformación; tienden a ser más opacos [30, 31].
Policarbonato	Son plásticos amorfos, tienden a ser más translúcidos [30]. Cuentan con baja rigidez, adecuada deformabilidad, biocompatibilidad y estabilidad dimensional. Cuentan con buenas propiedades físicas como la resistencia química, la resistencia a la abrasión y la facilidad de procesamiento [32].
Poliuretanos termoplásticos	Están formados por macromoléculas de peso molecular alto, son series repetitivas de unidades estructurales más pequeñas llamadas meros o monómeros [30, 31]. Son de naturaleza viscoelástica que sufren relajación de esfuerzo, esto es la tendencia del material a disminuir su generación de fuerza bajo una deformación constante, lo que hace que realizar movimientos dentales sea más difícil [30, 31].
Poliuretano de varias capas	Es otro polímero versátil, con muchas propiedades favorables ya que cuenta con excelentes propiedades elastoméricas y mecánicas, resistencia química y de abrasión y propiedades de adhesión [30, 31].
Poliuretano termoplástico aromático de varias capas	Ejerce una fuerza suave y más constante, una acción a largo plazo y una mejor adhesión, lo que facilita su uso en los pacientes. Tiene una mayor consistencia en la aplicación de fuerzas ortodónticas, una mayor elasticidad, estabilidad química y un ajuste de alineador aún más preciso y cómodo [33, 34].
Tereftalato de polietileno-glicol	Muestra una transparencia excelente y mayor resistencia a varios solventes, se puede perforar. Los AO elaborados con este material son duraderos, tienen alta resistencia al impacto y son resistentes a cambios químicos [11].

### C. Efecto de los AO en la salud oral.

Los AO han demostrado tener un impacto relativamente mínimo en el microbioma oral en comparación con otros aparatos ortodónticos; sin embargo, si se han observado cambios en especies como *Porphyromonas gingivalis*, *Prevotella intermedia*, *Tannerella forsythia*, *Actinobacillus actinomycetemcomitans*, *Fusobacterium nucleatum* y *Treponema denticola* [35, 36]. No obstante, la naturaleza removible de los alineadores permite una mejor práctica de higiene bucal, ya que los pacientes pueden limpiar fácilmente tanto sus dientes como los propios alineadores. La capacidad de quitar los alineadores durante las comidas y rutinas de cuidado oral puede contribuir a un impacto menos disruptivo en el microbioma oral en comparación con la presencia continua de aparatos fijos [37, 38]. En contraste, los dispositivos ortodónticos fijos, como los brackets tradicionales, plantean desafíos para la limpieza y pueden llevar a una alteración del microbioma oral debido a la dificultad para mantener una higiene oral óptima.

Sin embargo, es importante destacar que el uso de alineadores aún requiere buenas prácticas de higiene oral, como cepillado y uso de hilo dental regular, para prevenir la acumulación de biopelícula ya que una limpieza inadecuada de los alineadores también puede provocar el crecimiento bacteriano y, potencialmente, causar problemas de salud oral [39, 40].

## III. IMPACTO AMBIENTAL

El impacto ambiental de los residuos de los AO se ha convertido en un tema de creciente preocupación en los últimos años [41]. Con el aumento en la popularidad de los AO como opción de tratamiento

ortodóntico en todo el mundo, la cantidad de residuos plásticos generados por estos dispositivos también ha aumentado [11, 42]. Aunque los alineadores tienen varias ventajas y ofrecen una alternativa eficiente a los aparatos fijos, no podemos pasar por alto sus desventajas. Hasta ahora, la desventaja más preocupante, de la cual se sabe poco y existe poca literatura al respecto, es la contaminación ambiental que producen, ya que están formados por hidrocarburos derivados del petróleo y la degradabilidad de estos polímeros es en extremo baja, además, suelen causar daño al medio ambiente al ser quemados [43].

Desde el punto de vista financiero, el tamaño global del mercado de alineadores transparentes se valoró en 5.13 mil millones de dólares en 2023 y se proyecta que crecerá a una tasa de crecimiento anual compuesta del 30.7% desde 2024 hasta 2030, además, la pandemia tuvo un impacto positivo en el mercado a nivel global, y los principales productores de AO se recuperaron con altos ingresos en 2020 en comparación con años anteriores[44].

#### *A. La industria de los AO y su influencia en el medio ambiente.*

Hoy en día, los materiales termoplásticos más utilizados en la fabricación de alineadores por poseer características ideales son el tereftalato de polietileno-glicol modificado, el poliéster, el policarbonato, los poliuretanos termoplásticos, el polipropileno y acetato de etileno y vinilo, ya que estos poseen alta precisión en termoformado tridimensional [45]. Estos materiales termoplásticos son no biodegradables y pueden tardar cientos de años en descomponerse en el medio ambiente, por lo que no deben desecharse en la basura común [46]. Un ejemplo es el tereftalato de polietileno que pertenece a la categoría de plásticos resistentes, puede tardar hasta 1000 años en descomponerse en comparación con una botella de plástico que puede tardar 450 años [47].

La situación actual nos obliga a reflexionar profundamente sobre la importancia de reducir el impacto ambiental que están generando las actividades humanas. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS], definidos por las Naciones Unidas en 2015, están mostrando el camino para lograr una sociedad capaz de ser ambientalmente sostenible. Además, el debate cultural y el activismo ambiental están avanzando aún más en la actualidad: no es suficiente pensar en la "sostenibilidad", donde la sociedad no consume más de lo que puede generar [48].

Por lo tanto, es más esencial que nunca que, para lograr estos objetivos tan importantes para el medio ambiente, la comunidad y las generaciones futuras, todos los sectores de producción se movilicen para innovar los procesos, prácticas y productos que deben utilizarse en sus negocios [49]. Se debe de discutir las actividades de atención estomatológica ya que por razones obvias de higiene, hay desechos no reutilizables a gran escala y el uso de productos químicos que pueden causar daño al medio ambiente [50].

Los AO se han convertido en la opción preferida para muchos ortodoncistas debido a la alta estética y comodidad que ofrecen [51]. Uno de los gigantes en el mercado, Align Technology, estimó 4 millones de casos tratados en 2019 [52]. En el sector económico, el mercado global de alineadores transparentes en 2021 se proyectó en 3.1 mil millones de USD y se estima que para 2027 la cifra aumentará a 11.6 mil millones de USD con un crecimiento anual estimado del 13% [11]. También existen al menos 27 empresas diferentes que fabrican alineadores transparentes y los llamados alineadores en el consultorio [53]. Todos estos acumulan una cantidad considerablemente agravante de productos de desecho causados por la fabricación de AO que impactan directamente en el medio ambiente [54].

Asimismo, la fabricación de los AO implica el uso de otras herramientas, procesos y materiales, que pueden tener un impacto en el medio ambiente entre los que destacan el proceso de fabricación que requiere impresiones en 3D que genera desechos no reutilizables; el termoplástico para hacer el propio AO que no puede ser reciclado; la serie de estudios, análisis y diseño que requieren trabajar con

computadoras. Por esta razón, el impacto ambiental durante la producción de AO al igual que en todas las evaluaciones de sostenibilidad, debe considerarse sobre la base de varios aspectos [55].

Para poder considerar completamente el impacto ambiental de los alineadores, el análisis debe comenzar desde la consideración indiscutible de que el impacto ambiental es contextual: el mismo AO no tendrá el mismo impacto ambiental en un país cuyos niveles de reciclaje son altos (por ejemplo, Alemania, con una tasa de reciclaje del 55%) [56] que en un país donde los niveles de reciclaje son bajos o inexistentes. México, por ejemplo, tiene una tasa de reciclaje del 5% (aunque alcanza valores superiores al 50% en el reciclaje de todo el PET consumido en el país) [57]. La misma consideración se aplica al otro aspecto, igualmente importante cuando se habla del impacto ambiental de los AO, la producción de energía. El proceso de estudio y producción del mismo tratamiento tendrá un impacto ambiental menor si se lleva a cabo en un país como Costa Rica, donde la producción de energía renovable alcanza el 98% (principalmente considerando biomasa, energía hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica) [58] o si se lleva a cabo en un país donde la producción de energía depende en gran medida de fuentes no renovables. En una evaluación completa, entonces, algo a considerar es dónde tiene su sede la empresa.

Otro problema grave que también ha ido en progresión es que después de que los pacientes usan los AO, con frecuencia los depositan en la basura regular, creando así un riesgo de infección debido a que se usaron en la cavidad oral. Por lo anterior, los AO se consideran como residuos biomédicos contaminados, haciéndolos poco aptos para el reciclado [14]. Finalmente, la quema de basura de plástico en los incineradores puede causar la liberación de productos químicos y gases peligrosos que dañan gravemente el medio ambiente. Además, que cuando los productos químicos dañinos de la quema, como los bifenilos policlorados y las dioxinas, se liberan a la atmósfera, ponen en peligro a todos los seres vivos [59].

#### *B. Alternativas para la reducción del impacto ambiental por la producción y uso de alineadores*

Es momento de incorporar el enfoque de las 4R en la gestión de los desechos plásticos, que implica la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación [60]. No obstante, aún es necesario explorar la viabilidad de aplicar este principio en el campo de la ortodoncia, en lo que respecta a los AO, al considerarse un desecho biológico por la interacción que tuvo con la saliva y tejidos orales. La tecnología ha permitido el desarrollo de nuevos sistemas de producción, como el sistema CAD-CAM (14), basado en un sistema totalmente informatizado que consta de dos fases. CAD significa "diseño asistido por computadora" y CAM significa "fabricación asistida por computadora" [61], el uso de este sistema requiere una alta cantidad de energía eléctrica que en la mayoría de los casos requiere procesos de combustión de combustibles fósiles (carbón y petróleo) que generan un aumento en la huella de carbono. Por lo tanto, se busca que las tendencias futuras se dirijan hacia el uso de fuentes renovables (agua, viento, sol) que puedan ser utilizadas para la fabricación de AO y se espera que en el futuro las principales empresas de alineadores opten por integrar este tipo de sistemas en su producción [62].

Además, actualmente se están implementando nuevos sistemas de producción en los que no es necesario imprimir modelos 3D [11] y la impresión se realiza directamente sin necesidad de termoformar un material en un modelo generado por impresión digital [63]. Esto reduciría el número de residuos causados por la fabricación de AO [64] y también se presume que este sistema podría presentar la ventaja de ser más preciso porque reduciría los errores generados durante el proceso de termoformado [65].

Por lo tanto, la opción de impresión directa de alineadores transparentes es más atractiva ya que no requiere imprimir modelos 3D para su fabricación, lo que reduce a la mitad los residuos generados durante el proceso [66]. Hasta la fecha, los materiales conocidos para la impresión directa son plástico de acrilonitrilo-butadieno-estireno, materiales de estereolitografía (resinas epoxi), ácido poliláctico,

poliamida (nylon), poliamida rellena de vidrio y policarbonato [65]. Actualmente, Tera Harz TC-85 (Graphy, Seúl, Corea del Sur) es la única empresa que maneja este tipo de fabricación y ha sido aprobada por la Administración de Alimentos y Medicamentos de Corea (KFDA), la Comisión Europea (CE) y la Administración de Alimentos y Medicamentos [67] [68]. Por lo tanto, se espera que en el futuro las empresas de alineadores transparentes se centren en métodos que generen la menor cantidad de residuos posible y opten por la incorporación de polímeros biodegradables para evitar generar un impacto ambiental irreparable.

#### IV. CONCLUSIONES

En conclusión, el avance hacia la utilización de alineadores ortodónticos [AO] ha marcado un hito en la ortodoncia, ofreciendo a los pacientes una opción más estética y cómoda para corregir maloclusiones. Sin embargo, este progreso no está exento de preocupaciones ambientales, ya que la fabricación y disposición de estos dispositivos contribuyen significativamente a la acumulación de residuos plásticos. Es crucial reconocer la necesidad de evaluar y abordar el impacto ambiental de los AO, especialmente en un momento en que el mundo enfrenta desafíos urgentes relacionados con la contaminación plástica y la sostenibilidad ambiental, esto incluye la exploración de métodos de fabricación que reduzcan la generación de residuos y la adopción de prácticas de gestión de residuos. Es esencial fomentar la colaboración entre empresas de ortodoncia, profesionales de la odontología, instituciones educativas y autoridades regulatorias para desarrollar e implementar estrategias que minimicen el impacto ambiental de los AO. Esto podría implicar la incorporación de polímeros biodegradables en la fabricación de dispositivos ortodónticos y la promoción de prácticas de disposición adecuadas.

Además, hasta la fecha, el impacto ambiental de las resinas imprimibles utilizadas para los modelos en 3D generados durante el proceso termoplástico no está bien documentado. Se deben considerar varios puntos, incluido el consumo de energía, los residuos materiales y la contaminación ambiental. Una solución a este problema podría ser incorporar el uso de materiales reciclados en impresoras 3D para aumentar la sostenibilidad de la tecnología de impresión en 3D.

#### REFERENCIAS

- [1] Migliorati, M., et al., Efficacy of professional hygiene and prophylaxis on preventing plaque increase in orthodontic patients with multibracket appliances: a systematic review. *European journal of orthodontics*, 2015. 37(3): p. 297-307.
- [2] Alfuriji, S., et al., The effect of orthodontic therapy on periodontal health: a review of the literature. *International Journal of dentistry*, 2014. 2014.
- [3] Gomes, S.C., et al., Periodontal conditions in subjects following orthodontic therapy. A preliminary study. *The European Journal of Orthodontics*, 2007. 29(5): p. 477-481.
- [4] Socransky, S.S. and A.D. Haffajee, The bacterial etiology of destructive periodontal disease: current concepts. *Journal of periodontology*, 1992. 63: p. 322-331.
- [5] Ghijselings, E., et al., Long-term changes in microbiology and clinical periodontal variables after completion of fixed orthodontic appliances. *Orthodontics & craniofacial research*, 2014. 17(1): p. 49-59.
- [6] Freitas, A.O.A.d., et al., The influence of orthodontic fixed appliances on the oral microbiota: a systematic review. *Dental press journal of orthodontics*, 2014. 19: p. 46-55.
- [7] Lucchese, A., et al., Changes in oral microbiota due to orthodontic appliances: a systematic review. *Journal of oral microbiology*, 2018. 10(1): p. 1476645.

- [8] 8. Tartaglia, G.M., et al., Direct 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Current State and Future Possibilities. *Materials (Basel)*, 2021. 14(7).
- [9] 9. Tamer, İ., E. Öztaş, and G. Marşan, Orthodontic treatment with clear aligners and the scientific reality behind their marketing: a literature review. *Turkish journal of orthodontics*, 2019. 32(4): p. 241.
- [10] 10. Weinstein, T., G. Marano, and R. Aulakh, Five-to-five clear aligner therapy: predictable orthodontic movement for general dentist to achieve minimally invasive dentistry. *BMC oral health*, 2021. 21: p. 1-14.
- [11] 11. Bichu, Y.M., et al., Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioactive Materials*, 2023. 22: p. 384-403.
- [12] 12. Ma, Y. and S. Li, The optimal orthodontic displacement of clear aligner for mild, moderate and severe periodontal conditions: an in vitro study in a periodontally compromised individual using the finite element model. *BMC Oral Health*, 2021. 21: p. 1-8.
- [13] 13. Tartaglia, G.M., et al., Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. *Materials*, 2021. 14(7): p. 1799.
- [14] 14. Gandhi, R. and A. Veerasekaran, An Overview on Environmental Hazards of Clear Aligners.
- [15] 15. Ballesté, A.G., Evaluación del impacto ambiental de los alineadores ortodónticos transparentes: una perspectiva de la huella de carbono. *RCOE*, 2023. 28(3): p. 3.
- [16] 16. Welden, N.A. and A. Lusher, Chapter 9 - Microplastics: from origin to impacts, in *Plastic Waste and Recycling*, T.M. Letcher, Editor. 2020, Academic Press. p. 223-249.
- [17] 17. Cressey, D., Bottles, bags, ropes and toothbrushes: the struggle to track ocean plastics. *Nature*, 2016. 536(7616): p. 263-265.
- [18] 18. Lee, M. and H. Kim, COVID-19 Pandemic and Microplastic Pollution. *Nanomaterials (Basel)*, 2022. 12(5).
- [19] 19. Lee, M., et al., Review on invasion of microplastic in our ecosystem and implications. *Sci Prog*, 2022. 105(4): p. 368504221140766.
- [20] 20. McLaughlin, R.P. and J.C. Bennett, Evolution of treatment mechanics and contemporary appliance design in orthodontics: A 40-year perspective. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2015. 147(6): p. 654-662.
- [21] 21. Kesling, H.D., The philosophy of the tooth positioning appliance. *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, 1945. 31(6): p. 297-304.
- [22] 22. Remensnyder, O., A gum-massaging appliance in the treatment of pyorrhea. 1926: Philadelphia:: SS White Dental Manufacturing Company.
- [23] 23. Nahoum, H.I., The vacuum formed dental contour appliance. *NY State Dent J*, 1964. 9: p. 385-390.
- [24] 24. Ponitz, R.J., Invisible retainers. *American journal of orthodontics*, 1971. 59(3): p. 266-272.
- [25] 25. Sheridan, J.J., R. McMinn, and W. LeDoux, Essix thermosealed appliances: various orthodontic uses. *Journal of clinical orthodontics: JCO*, 1995. 29(2): p. 108-113.
- [26] 26. Nakano, H., et al., Development of biocompatible resins for 3D printing of direct aligners. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2019. 32(2): p. 209-216.
- [27] 27. Nanda, R., et al., *Principles and Biomechanics of Aligner Treatment-E-Book*. 2021: Elsevier Health Sciences.
- [28] 28. Hartshorne, J. and M.B. Wertheimer, Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature. *AJO-DO Clinical Companion*, 2022. 2(4): p. 311-324.



- [29] 29. Bichu, Y.M., et al., Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioact Mater*, 2023. 22: p. 384-403.
- [30] 30. Solarte Pazos, L.M. and H. Morales Pinilla, Efecto de la termoformación sobre el espesor y la relajación de esfuerzos en alineadores plásticos fabricados con pet-g. 2022.
- [31] 31. De la Rosa Marrugo, E.J. and E. Montoya González, Criterios de selección de material base para el diseño por termoformado de alineadores poliméricos dentales. 2019.
- [32] 32. Vidal Bernárdez, M.L., Eficacia y predictibilidad de la expansión maxilar y mandibular con el sistema invisaling®. *Material SmartTrack®*. 2022.
- [33] 33. Zhang, N., et al., Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics. *Dental materials journal*, 2011. 30(6): p. 954-959.
- [34] 34. Frick, A. and A. Rochman, Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC). *Polymer testing*, 2004. 23(4): p. 413-417.
- [35] 35. Wu, Y., L. Cao, and J. Cong, The periodontal status of removable appliances vs fixed appliances: A comparative meta-analysis. *Medicine*, 2020. 99(50).
- [36] 36. Eroglu, A.K., Z.M. Baka, and U. Arslan, Comparative evaluation of salivary microbial levels and periodontal status of patients wearing fixed and removable orthodontic retainers. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2019. 156(2): p. 186-192.
- [37] 37. Contaldo, M., et al., The oral microbiota changes in orthodontic patients and effects on oral health: An overview. *Journal of clinical medicine*, 2021. 10(4): p. 780.
- [38] 38. Živković-Sandić, M., et al., Changes in subgingival microflora after placement and removal of fixed orthodontic appliances. *Srpski arhiv za celokupno lekarstvo*, 2014. 142(5-6): p. 301-305.
- [39] 39. Caccianiga, P., et al. Efficacy of Home Oral-Hygiene Protocols during Orthodontic Treatment with Multibrackets and Clear Aligners: Microbiological Analysis with Phase-Contrast Microscope. in *Healthcare*. 2022. MDPI.
- [40] 40. Chhibber, A., et al., Which orthodontic appliance is best for oral hygiene? A randomized clinical trial. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2018. 153(2): p. 175-183.
- [41] 41. Peter, E., J. Monisha, and S.A. George, Are clear aligners environment friendly? *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2022. 161(5): p. 619-620.
- [42] 42. Haouili, N., et al., Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2020. 158(3): p. 420-425.
- [43] 43. Cangemi, J.M., A.d. Santos, and N. Claro, Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. *Química Nova na Escola*, 2009. 31(3): p. 159-164.
- [44] 44. research, G.V., GVR Report cover Clear Aligners Market Size, Share & Trends Report
- [45] Clear Aligners Market Size, Share & Trends Analysis Report By Age (Adults, Teens), By Material, By End-use (Hospitals, Standalone Practices), By Distribution Channel, And Regional Forecasts, 2024 - 2030, in *Market Analysis Report* Grand View research. 2024: California, USA. p. 100.
- [46] 45. Pineda Guerra, J.F., H. Marin Palacio, and N.J. Echeverri Echeverri, Alineadores una opción en ortodoncia estética, revisión de literatura. 2021.
- [47] 46. Gupta, S., et al., Aligners-Their Properties and Disposal. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 2022: p. 186-188.

- [48] 47. Horvath, T., et al., The mechanical properties of polyethylene-terephthalate (PET) and polylactic-acid (PDLLA and PLLA), the influence of material structure on forming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. 426(1): p. 012018.
- [49] 48. Fonseca, L.M., J.P. Domingues, and A.M. Dima Mapping the Sustainable Development Goals Relationships. *Sustainability*, 2020. 12, DOI: 10.3390/su12083359.
- [50] 49. Gibbons, L.V. Regenerative—The New Sustainable? *Sustainability*, 2020. 12, DOI: 10.3390/su12135483.
- [51] 50. Hiltz, M., The environmental impact of dentistry. *J Can Dent Assoc*, 2007. 73(1): p. 59-62.
- [52] 51. Jiang, Q., et al., Periodontal health during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances: A meta-analysis. *J Am Dent Assoc*, 2018. 149(8): p. 712-720.e12.
- [53] 52. Tamer, İ., E. Öztaş, and G. Marşan, Orthodontic Treatment with Clear Aligners and The Scientific Reality Behind Their Marketing: A Literature Review. *Turk J Orthod*, 2019. 32(4): p. 241-246.
- [54] 53. Peter, E., M. J., and S. Ani George, Are clear aligners environment friendly? *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2022. 161(5): p. 619-620.
- [55] 54. Weir, T., Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J*, 2017. 62 Suppl 1: p. 58-62.
- [56] 55. Halog, A. and Y. Manik Advancing Integrated Systems Modelling Framework for Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability*, 2011. 3, 469-499 DOI: 10.3390/su3020469.
- [57] 56. Montag, L. Roadmap to a Circular Economy by 2030: A Comparative Review of Circular Business Model Visions in Germany and Japan. *Sustainability*, 2023. 15, DOI: 10.3390/su15065374.
- [58] 57. Magar, V., et al. Wind Energy and the Energy Transition: Challenges and Opportunities for Mexico. *Sustainability*, 2023. 15, DOI: 10.3390/su15065496.
- [59] 58. Kroposki, B., et al., Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2017. 15(2): p. 61-73.
- [60] 59. Joseph, B., et al., Recycling of medical plastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021. 4(3): p. 199-208.
- [61] 60. Sadi, M.A., et al., Reduce, Reuse, Recycle and Recovery in Sustainable Construction Waste Management. *Advanced Materials Research*, 2012. 446-449: p. 937-944.
- [62] 61. Suganna, M., et al., Contemporary Evidence of CAD-CAM in Dentistry: A Systematic Review. *Cureus*, 2022. 14(11): p. e31687.
- [63] 62. Hillerbrand, R. Why Affordable Clean Energy Is Not Enough. A Capability Perspective on the Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 2018. 10, DOI: 10.3390/su10072485.
- [64] 63. Espíndola, C. and J.O. Valderrama, Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas. *Información tecnológica*, 2012. 23: p. 163-176.
- [65] 64. Nasef, A.A., A.R. El-Beialy, and Y.A. Mostafa, Virtual techniques for designing and fabricating a retainer. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2014. 146(3): p. 394-398.
- [66] 65. Jindal, P., et al., Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2019. 156(5): p. 694-701.
- [67] 66. Peeters, B., N. Kiratli, and J. Semeijn, A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 241: p. 118313.

- [68] 67. Carreira, A.C., et al., Bone Morphogenetic Proteins: Facts, Challenges, and Future Perspectives. *Journal of Dental Research*, 2014. 93(4): p. 335-345.
- [69] 68. Lee, S.Y., et al., Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Scientific Reports*, 2022. 12(1): p. 6246.