



**CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIAL BASE PARA EL DISEÑO POR
TERMOFORMADO DE ALINEADORES POLIMÉRICOS DENTALES**

EOLA DE LA ROSA MARRUGO

ESTEFANÍA MONTOYA GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE SALUD

POSGRADO EN ORTODONCIA Y ORTOPEDIA DENTOFACIAL

MANIZALES

2019

**CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIAL BASE PARA EL DISEÑO POR
TERMOFORMADO DE ALINEADORES POLIMÉRICOS DENTALES**

Proyecto de grado para optar al título de Especialista en Ortodoncia y Ortopedia dentofacial

EOLA DE LA ROSA MARRUGO

ESTEFANÍA MONTOYA GONZÁLEZ

TUTORES DE TESIS:

JUAN PABLO GÓMEZ ARANGO

YENNY MARCELA OROZCO OCAMPO

CÉSAR AUGUSTO ÁLVAREZ VARGAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MANIZALES

FACULTAD DE SALUD

POSGRADO EN ORTODONCIA Y ORTOPEDIA DENTOFACIAL

MANIZALES

2019

RESUMEN

Objetivo: Realizar una descripción comparativa de los polímeros comercialmente más utilizados en la fabricación de alineadores plásticos termoformados con el fin de proporcionar directrices de selección.

Metodología: Se seleccionaron 13 polímeros termoplásticos comercialmente disponibles, con los cuales se realizaron 14 mapas de Ashby conforme a sus propiedades mecánicas. Las propiedades seleccionadas fueron: Capacidad de absorción de agua, espesor inicial, módulo elástico, esfuerzo de fluencia a la tensión, dureza, y cambio de espesor durante el proceso de termoformado.

Resultados: Smart Track, es el material que presenta mayor porcentaje de capacidad de absorción de agua, Copyplast es el que menor porcentaje presenta. Copyplast, Invisacril A y Essix A+, presentaron el mayor cambio en su espesor después del proceso de termoformado, Hardcast fue el que menor cambio sufrió. Bioplast tiene el menor módulo elástico de los polímeros analizados. Biolon y Track A tienen la mayor resistencia a la tensión y son los materiales con menor dureza.

Conclusiones: Los polímeros termoplásticos comercialmente disponibles para fabricar alineadores dentales, presentan gran variabilidad en su comportamiento mecánico el cual es determinante en el desempeño clínico de los mismos, es necesario que el ortodoncista reconozca las diferencias que existen entre las opciones que existen en el mercado y pueda elegir el más adecuado de acuerdo a las necesidades biomecánicas requeridas en su plan de tratamiento

Palabras Claves: Polímero termoplástico, alineador dental, termoformado, mapa de Ashby.

ABSTRACT

Objective: To perform a comparative description of the most commonly used polymers in the manufacturing process of thermoformed plastic aligners in order to provide selection guidelines.

Methodology: 13 thermoplastic polymers which were commercially available were selected, with which 14 maps of Ashby were done according to its mechanical proprieties. The selected proprieties were: Water absorption capacity, Initial elastic modulus thickness, stress creep stress, hardness, and thickness change during the thermoforming process.

Results: Smart Track It is the material that has the highest percentage of water absorption capacity, Copyplast is the one that presents the least percentage. Copyplast, Invisacril A and Essix A+ presented the biggest change in its thickness after the thermoforming process, Hardcast was the one that suffered the least amount of changes. Bioplast has the smallest elastic modulus of the analyzed polymers. Biolon and Track A have the highest tensile strength and are the least hard materials.

Conclusions: The commercially available thermoplastic polymers to fabricate dental aligners present a great variability in their mechanical behavior which is decisive in their clinical performance. It is necessary that the orthodontist recognizes the existing differences among the options that there are in the market and that he can be able to choose the most adequate one according to the biomechanical necessities required in his treatment plan.

Key words: Thermoplastic polymers, Dental aligners, Thermoformed, Ashby map.

TABLA DE CONTENIDO

1	PRESENTACIÓN.....	9
2	ANTECEDENTES.....	11
3	ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	14
4	JUSTIFICACIÓN.....	16
4.1	Tipos de movimientos dentales ortodónticos.....	25
1.2.1	Movimiento de rotación pura	26
1.2.2	Traslación	26
1.2.3	Inclinación	27
4.2	Incompetencia biomecánica de los alineadores	28
4.3	Polímeros termoplásticos.....	30
4.4	Factores que modifican las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos	31
5	DEFINICIÓN DE TERMINOS	35
6	OBJETIVOS.....	36
6.1	Objetivo general.....	36
6.2	Objetivos específicos	36
7	METODOLOGÍA	37
7.1	Hipótesis de investigación	37

7.2	Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 1.....	37
7.3	Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 2.....	39
7.4	Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 3.....	41
8	RESULTADOS.....	43
9	DISCUSIÓN.....	52
10	CONCLUSIONES.....	58
11	RECOMENDACIONES	59
12	BIBLIOGRAFÍA.....	60

LISTA DE TABLAS

Figura 1 Arcos y brackets estéticos	19
Figura 2 Tratamiento con alineadores dentales.....	20
Figura 3 Alineadores dentales. Placas transparentes que se fabrican según la anatomía dental de cada paciente	21
Figura 4 Clinkcheck®. Programa que permite visualizar modificaciones en tiempo real. ..	22
Figura 5 Proceso de termoformado.	23
Figura 6 Movimiento dental ortodontico.....	26
Figura 7 Rotación de un incisivo central superior.....	26
Figura 8 Movimiento en cuerpo o de traslación.....	27
Figura 9 Movimiento dental controlado (movimiento de corona)	28
Figura 10 Movimiento dental no controlado	28
Figura 11 Diagrama de Ashby. Es un mapa donde dos propiedades mecánicas, físicas, etc., son comparadas en función de diferentes materiales.....	40
Figura 12 Comportamiento de espesor vs módulo elástico.....	43
Figura 13 Comportamiento de cambios de espesor vs módulo de elasticidad	44
Figura 14 Comportamiento de esfuerzo de fluencia a la tensión vs módulo elástico	44
Figura 15 Comportamiento de absorción de agua vs módulo de elasticidad	45
Figura 16 Comportamiento de módulo de elasticidad vs dureza.....	45

Figura 17 Comportamiento de espesor vs dureza.....	46
Figura 18 Comportamiento de cambios de espesor vs dureza.....	46
Figura 19 Comportamiento de esfuerzo de fluencia a la tensión vs dureza	47
Figura 20 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs dureza	47
Figura 21 Comportamiento de espesor vs cambio de espesor.....	48
Figura 22 Comportamiento de espesor vs esfuerzo de fluencia a la tensión.....	48
Figura 23 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs espesor.....	49
Figura 24 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs cambio de espesor.	49
Figura 25 Comportamiento de cambios de espesor vs esfuerzo de fluencia a la tensión.....	50
Figura 26 Comportamiento de absorción de agua vs esfuerzo de fluencia a la tensión.	50
Figura 27 Modificaciones del espesor con el proceso de termoformado	54

1 PRESENTACIÓN

Los alineadores son dispositivos removibles utilizados en pacientes de forma secuencial con el fin de corregir maloclusiones y malposiciones dentales. La ortodoncia con aparatología removable, *alineadores*, permite planificar la secuencia del movimiento dental, desde la posición inicial hasta la posición final mediante el uso de imágenes gráficas computarizadas que representan los modelos dentales de los pacientes.

El pionero en usar aditamentos para realizar movimientos dentales, sin el uso de aparatología fija fue Kesling en 1945, en su método, utilizó dispositivos removibles flexibles, *posicionadores*, para lograr pequeños movimientos dentales, luego de culminar el tratamiento, con aparatología ortodóntica fija. Desde 1999 Align Technology® ha desarrollado la visión del Kesling y se ha basado en los principios de Nahoum, Raintree Essix, MacNamara, Ponitz, Sheridan y Truax, quienes crearon un método práctico, para realizar tratamientos de ortodoncia, el cual consiste en la fabricación de dispositivos personalizados, que se caracterizan por ser transparentes, removibles y diseñados mediante tecnología CAD-CAM, con el fin de generar movimientos dentales programados para la corrección de maloclusiones.

Al Compararlos con los dispositivos fijos tradicionales, los alineadores dentales presentan ciertas características y beneficios llamativos para los pacientes y el ortodoncista como: son altamente estéticos por la translucidez del material, los alineadores son diseñados a medida para cada paciente en particular, lo que permite un tratamiento completamente personalizado, facilitan la realización de una adecuada higiene oral, disminuyendo el riesgo de desarrollo de caries dental y gingivitis, asociada a placa bacteriana, son fáciles de usar y al ser removibles son muy cómodos y tiene mayor aceptación por parte del paciente. El Ortodoncista puede programar pequeños rangos de movimiento en cada etapa del tratamiento, con lo cual se obtiene un mayor control del dolor que siente el paciente. Así mismo, el uso de alineadores dentales presenta ciertas desventajas e inconvenientes como: para obtener los resultados esperados con el tratamiento, se requiere el uso estricto y riguroso de las placas por parte del paciente, se necesita mayor cantidad de tiempo por parte

del profesional para la planeación del tratamiento y se han reportado algunas dificultades e incompetencias mecánicas de los alineadores, cuando se requiere solucionar casos complicados, como apiñamientos severos, mordidas profundas, rotación de dientes redondos y correcciones anteroposteriores severas.

Los alineadores dentales, presentan problemas relacionados con el comportamiento mecánico ya que, los materiales termoplásticos con los cuales están hechos, son viscoelásticos, es decir, que tienen propiedades intermedias entre los materiales fluidos y los elásticos, tales como: capacidad de absorción de agua, también conocida como *propiedad higroscópica*, relajación de esfuerzo, *stress relaxation*, fluencia lenta, *creep*, módulo de elasticidad, *módulo de Young*,

2 ANTECEDENTES

En el 2006 Ryokawa H. et al. (1) se evaluaron las propiedades mecánicas de ocho materiales termoplásticos: EVA de 1 mm de espesor (Bioplast, *Copolímero de etilenoacetato de vinilo*), PE de 1 mm de espesor (Copyplast, *polietileno*), PETG de 1 mm de espesor (Duran, *Tereftalato de glicol de polietileno*), PP de 0,8 mm de espesor (Hardcast, *polipropileno*), PC de 0,75 mm de espesor (Imprelon" S, *policarbonato*), A+ de 0,040 in de espesor (Essix A +, *copoliéster*), C + de 0,040 in de espesor (Essix C +, *Polipropileno/copolímero de etileno (>95%), estabilizadores (<5%)*) y PUR de 0,030 in de espesor (Invisalign, *poliuretano a partir de diisocianato de metileno difenilo y 1,6-hexanodiol, Aditivos*). Se realizaron pruebas de absorción de agua durante dos semanas, pruebas de tensión a temperatura ambiente (23°C) y en un ambiente intraoral (37°C), pruebas de cambio de espesor con termoformado y absorción de agua. Se encontró que los polímeros tienen módulos de elasticidad e índices de absorción de agua altos, el cambio de temperatura ambiente a intraoral tiene poca influencia sobre las propiedades mecánicas de los mismos, por otra parte, los cambios que se generan por la absorción de agua, *propiedad higroscópica*, son altos e influyen directamente sobre las propiedades mecánicas de los polímeros, se observó, además, que los materiales opacos tenían módulos de elasticidad y tasas de absorción más bajos (1).

Nahoisa K et al. realizaron un estudio en el 2013, cuyo objetivo fue medir las fuerzas generadas por los aparatos termoplásticos hechos de tres materiales diferentes, e investigar los efectos de las propiedades mecánicas de los mismos, el espesor del material y la cantidad de activación en las fuerzas ortodónticas. Se empleó un sistema fabricado a medida, con un sensor de fuerza, para obtener las mediciones de manera *in vitro*, suministrada por los aparatos termoplásticos, para la activación de 0,5 mm y 1,0 mm para el movimiento de los dientes. Los tres termoplásticos fueron: Duran (Scheu Dental), Erkodur (Erkodent Erich Kopp GmbH) y Hardcast (Scheu Dental). Se encontró que los aparatos con activación de 1,0 mm produjeron una fuerza significativamente menor, que aquellos con la activación de 0,5 mm, a excepción de los aparatos Hardcast de 0,4 mm de espesor, observándose una estrecha correlación entre las propiedades mecánicas de los materiales y

la fuerza producida por los mismos. Se concluyó, que las fuerzas de ortodoncia suministradas por los aparatos termoplásticos, dependen del material, del espesor y la cantidad de activación, en donde el módulo elástico y la dureza del material son determinantes a la hora de evaluar la fuerza generada por los mismos; a mayor espesor mayor cantidad de fuerza suministrada y a mayor activación menor cantidad de fuerza generada (2).

Como se mencionó al inicio de éste documento, son pocos los estudios en los cuales se ha evaluado específicamente el comportamiento mecánico de materiales termoplásticos en el área de Ortodoncia, Alexandropoulos et al. en el 2015, realizaron un estudio en el cual caracterizaron las propiedades químicas y mecánicas de tres materiales termoplásticos: Alineador Claro (Scheu- Dental), ACE y A + (Dentsply), e Invisalign® (Tecnología de Alineamiento). Se encontró que Invisalign® usa un material a base de poliuretano, mientras que los otros se basaron en poliéster y tereftalato de polietilenglicol (PETG). Invisalign® mostró valores más altos de dureza, una fragilidad ligeramente mayor y menor resistencia a la fluencia en comparación con los productos basados en PETG; se llegó a la conclusión que los materiales presentan diferencias significativas en su estructura química y en sus propiedades mecánicas, por lo tanto, es posible anticipar comportamientos clínicos diferentes (3).

La necesidad de materiales altamente estéticos para la fabricación de alineadores dentales, motiva la realización de estudios que evalúen éste comportamiento en los polímeros, ya que, aunque los dispositivos de ortodoncia actuales son estéticos, la estabilidad de la translucidez, *transparencia*, que los hace altamente atractivos para los pacientes, apenas se ha informado, aun conociendo que ésta característica en particular, debe ser estable durante el tiempo de uso que recomiende cada casa comercial por etapa, teniendo en cuenta que los alineadores dentales se encuentran expuestos a diferentes líquidos y elementos que pueden modificar su color. Chen-Lu et al. en el 2016 realizaron un estudio cuyo objetivo fue evaluar y comparar la estabilidad del color de tres tipos de alineadores dentales: Invisalign®, Align Technology (poliuretano), Angelalign (polietileno tereftalato glicol), Smartee Denti-Technology), los tres materiales fueron expuestos a agentes de tinción y a

agua destilada *in vitro*. Al finalizar el estudio se encontró que los tres tipos de alineadores dentales mostraron cambios de color leves después de 12 horas de tinción, con la excepción de los alineadores Invisalign teñidos con café. Los alineadores Invisalign® eran más propensos que los de Angelalign y Smartee a la pigmentación, esto se debió probablemente a la diferencia de los materiales con los cuales son fabricados, en donde los de Invisalign®, *PU*, exhibieron valores de cambio de color significativamente mayores que los de los alineadores basados en *PC* y *PETG*. Se encontró, además, que los cambios de color en los tres tipos de polímeros podían explicarse, por las características de la superficie del material, como la rugosidad, lo que puede acelerar el proceso de acúmulo de pigmentos (4)

Como bien se sabe, un alineador debería, idealmente, aplicar una fuerza que sea constante a lo largo de un tiempo determinado. Para ejercer fuerzas seguras pero eficaces, el material adecuado debe ser bastante rígido, con un alto rendimiento elástico, capaz de garantizar que la fuerza se aplique dentro del rango elástico. En otras palabras, su curva de relajación debe ser bastante plana, demostrando su capacidad para ejercer fuerzas constantes y continuas en el tiempo. Lombardo et al. (5) en el 2017 realizaron un estudio, cuyo objetivo fue investigar las propiedades de liberación de estrés, de cuatro materiales termoplásticos usados para hacer alineadores ortodónticos que fueron sometidos a 24 horas consecutivas de deflexión. Los materiales fueron: F22 Aligner Duran Erkoloc-Pro Durasoft, TPU, PET-G, PET-G/TPU, TPU/PC. Se encontró, que todos los materiales probados, presentaron un mayor porcentaje de relajación de tensión durante las primeras 8 horas bajo una carga constante, y de 16 a 24 horas, el porcentaje se estabilizó alrededor de una meseta casi constante.

3 **ÁREA PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

Los alineadores son dispositivos removibles utilizados en pacientes de forma secuencial con el fin de corregir maloclusiones y malposiciones dentales. Esta técnica, permite planificar la secuencia del movimiento dental, desde la posición inicial hasta la posición final, mediante el uso de imágenes gráficas computarizadas, de los modelos dentales de los pacientes. Para construir estos aparatos removibles termoplásticos, es necesario el uso de la tecnología computarizada (Diseño asistido por computadora, *CAD*, fabricación asistida por computadora, *CAM*, estereolitografía y un programa de simulación de movimientos dentales programados denominado Clincheck (2).

La investigación del movimiento dental con alineadores, es en la actualidad limitada. La mayor parte de la literatura, consiste en informes de casos, editoriales o artículos escritos por autores, generalmente sin control de sesgos. Hay pocos reportes basados en la evidencia, para describir el tipo de movimiento dental resultante del tratamiento con alineadores. Barone S. et al (6) afirma en su estudio que los alineadores tienen limitaciones inherentes tales como: baja resistencia, baja contracción, baja resistencia al desgaste, estabilidad dimensional multidependiente, entre otros. Se ha demostrado, además, limitaciones en la configuración del sistema de fuerzas complejas, como movimientos de rotación e inclinación de premolares y caninos, así como el movimiento dental en cuerpo (7). A diferencia de las técnicas ortodónticas tradicionales, la cantidad de fuerza ejercida por los alineadores dentales, depende de las características mecánicas de los materiales con los cuáles son fabricados, por lo tanto, el conocimiento exhaustivo y a profundidad, de las propiedades mecánicas de los polímeros usados, es de vital importancia, para lograr los resultados que se hayan planteado, en el plan de tratamiento inicial de cada paciente en particular (8).

Los alineadores dentales, presentan problemas relacionados con el comportamiento mecánico ya que, los materiales termoplásticos con los cuales están hechos, son viscoelásticos, es decir, que tienen propiedades intermedias entre los materiales fluidos y los elásticos, tales como: capacidad de absorción de agua, también conocida como

propiedad higroscópica, generada porque el agua reacciona químicamente con la cadena principal del polímero, a través de un proceso llamado hidrólisis. Debido a la absorción de agua, se producen varios cambios físico-químicos en el material, lo que hace que las propiedades mecánicas del polímero se degraden irreversiblemente (8); relajación de esfuerzo, *stress relaxation*, que es la reducción del esfuerzo que sufren los alineadores termoplásticos, inducida por la deformación inicial que tiende a causar el deterioro de las propiedades mecánicas de éstos con el tiempo (9); fluencia lenta, *creep*, se conoce con éste termino la deflexión que sufre un material viscoelástico, al ser sometido a una carga constante, la cual puede variar considerablemente con el tiempo, incluso cuando se introducen por primera vez en los dientes y antes de lograr cualquier movimiento dental (5); módulo de elasticidad, *módulo de Young*, proporción entre tensión y deformación, a menor modulo elástico más flexible es el material y viceversa (10).

El propósito de este trabajo, responde a la necesidad de determinar las características mecánicas de los polímeros termoplásticos comercialmente más usados para la fabricación de alineadores dentales, además, se compararán dichos resultados entre los mismos materiales, con el fin de identificar las diferencias mecánicas que presentan entre éstos, ya que en la actualidad no se conocen con claridad.

Lo anterior es pertinente para el tratamiento ortodóntico, ya que, con la información obtenida, se podrá seleccionar el polímero que más se ajuste y responda a las necesidades mecánicas de cada tratamiento en particular. Permitirá, además, planear estrategias que contrarresten los resultados indeseados, garantizando así mayores tasas de éxito en los tratamientos de ortodoncia.

4 JUSTIFICACIÓN

La información que se genere en este proyecto permitirá, mejorar los resultados del tratamiento ortodóntico con alineadores dentales, al caracterizar los materiales más usados para la fabricación de estos, para conocer las propiedades mecánicas y poder utilizar el polímero adecuado, según las necesidades del paciente (expansión, distalización, pérdida de anclaje, entre otras).

El uso de materiales termoplásticos, para fabricar dispositivos para el movimiento dental ortodóntico, requiere una comprensión suficiente de las características del material, ya que en muchos casos, éstos aparatos deben modificarse, requieren el uso de elementos auxiliares o etapas adicionales (*refinamiento* (2)), para cumplir los objetivos del tratamiento, lo cual demuestra que la eficacia de los movimientos con aparatología termoplástica, es menor, que con aparatología ortodóntica fija; por lo anterior, es de suma importancia que se tenga claridad y comprensión suficiente de las características de éstos materiales ya que, a diferencia de la aparatología fija, en la removible, *alineadores dentales*, la fuerza ortodóntica ejercida por los aparatos termoplásticos, depende de las propiedades mecánicas del material con el cual son fabricados. En la actualidad, el poliéster, *PE*, el poliuretano, *PU*, y el polipropileno, *PP*, son los materiales termoplásticos más utilizados, para fabricar aparatos de ortodoncia transparentes debido a sus propiedades mecánicas. Sin embargo, la mezcla de polímeros ha sido aceptada, como un método eficiente y económico de diversificación de propiedades de polímeros (11).

Conocer las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos, con los cuáles son fabricados los alineadores dentales, es de gran importancia para un Ortodoncista, ya que con esta información es posible ampliar o limitar el uso de los mismos, en diferentes áreas clínicas. Poco se sabe actualmente sobre las fuerzas ortodónticas y las propiedades mecánicas de éstos. Un estudio realizado por Kwon et al. en el 2006, investigó *in vitro* las propiedades de suministro de fuerza y energía, *resiliencia*, de tres materiales termoplásticos usados para la fabricación de alineadores dentales: Essix A+ (polietileno), essix ACE (polietileno) y essix C+ (polipropileno) de diferentes espesores, se determinaron los

cambios en las propiedades de suministro de fuerza después del termoformado y del ciclo de carga repetido utilizando una prueba de flexión de tres puntos y la medición de la dureza Vickers; además, se planteó la hipótesis, de que las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos, afectan las fuerzas ortodónticas. Finalmente, se encontró que después del termoformado, la cantidad de fuerza entregada por los termoplásticos disminuyó, ya que, entre otras, el espesor del material fue determinante, el cual se redujo después del procedimiento. Se encontró por ejemplo, que la placa A+ de 0,71 mm de espesor, después del termoformado pasó a medir 0,66 mm, de igual manera, sucedió con los demás materiales; es importante destacar, que en éste estudio, no se tuvieron en cuenta, los cambios que se generan en las propiedades mecánicas de éstos materiales, en un entorno intraoral, ya que al ser materiales altamente viscoelásticos, la temperatura y la humedad influyen directamente sobre los mismos (12).

Esta investigación, busca suplir las necesidades de información detallada, de los materiales que se emplean con mayor regularidad para la fabricación de alineadores dentales, tanto en sus características, como en el comportamiento biomecánico producto de su composición. Ésta información es novedosa, porque después de revisar la literatura con una estrategia de búsqueda sistemática (ver anexo 1) no se encontró suficiente información a nivel nacional o internacional.

La caracterización de las propiedades biomecánicas de los polímeros comercialmente más usados para la fabricación de alineadores dentales, se considera relevante, por el aporte de un conocimiento, que no tiene suficiente sustentación con evidencia científica. Este proyecto es factible porque se trabajará con la herramienta Excel®, con licencia de uso en la Universidad Autónoma de Manizales, para la elaboración de las tablas base a ser comparadas, y el uso de la herramienta Matlab® con licencia de uso en la Universidad Autónoma de Manizales, para la elaboración de las gráficas conocidas como diagramas de Ashby y opcional el uso de la herramienta CES EduPack/ Granta Design®, no se cuenta con esta licencia en la Universidad Autónoma de Manizales, pero existe la posibilidad de usar un registro libre por treinta días; Además, la investigación cumple con los objetivos de la “Línea de Ortodoncia” del Grupo de Investigación en Salud Oral (INSAO) de la UAM,

que estudia las diferentes opciones de terapéutica que se adapten mejor al medio regional y nacional, en este caso el estudio de los materiales que se usan en el tratamiento ortodóntico con alineadores dentales.

REFERENTE TEÓRICO

En la actualidad se han desarrollado diferentes tipos de brackets y arcos estéticos para los tratamientos de ortodoncia con el fin de brindar una mejor apariencia al paciente, como se observa en la figura 1

Figura 1 Arcos y brackets estéticos



Fuente: http://www.dentanet.dk/sites/default/files/styles/course/public/010_0.jpg?itok=s1X_U2sT

En la ortodoncia convencional con aparatología fija, se inserta en el bracket un arco, *alambre*, el cual al deformarse por la malposición dental, ejerce una fuerza sobre el diente, con el tiempo, éste se mueve, a medida que el arco recupera su forma original, disminuyéndose la fuerza ejercida sobre el diente, por lo tanto, la fuerza es proporcional a la deformación del arco. Debido a lo anterior, es posible predecir con facilidad el movimiento que se genera en los dientes (9). Por otra parte, el movimiento dental generado por alineadores, se da por un "desajuste" intencional y predeterminado entre el alineador y el diente, en cada etapa del tratamiento; El alineador, que corresponde a la nueva posición deseada del diente, se coloca en el arco dental, produciendo en cada desajuste un sistema de fuerzas que se transmite directamente al diente, generando una cadena de eventos mecánico-biológicos, que da como resultado, una nueva posición de los dientes (13).

Actualmente, existen múltiples casas comerciales que fabrican alineadores dentales con materiales termoplásticos transparentes (figura 2) como Invisalign®, ClearSmile®, CA® Clear Aligner entre otras. La ortodoncia con aparatología removible, *alineadores*, permite planificar la secuencia del movimiento dental, desde la posición inicial hasta la posición final mediante el uso de imágenes gráficas computarizadas que representan los modelos

dentales de los pacientes. Para realizar estos aparatos removibles, fabricados con materiales termoplásticos, es necesario utilizar tecnología CAD-CAM (2, 14).

Figura 2 Tratamiento con alineadores dentales.



Fuente: <http://www.tratamientoinvisible.com/wp-content/uploads/2013/03/invisalign>

En 1945, Kesling, fue el pionero en usar aditamentos para realizar movimientos dentales, sin el uso de aparatología fija, en su método, utilizó dispositivos removibles flexibles, *posicionadores*, para lograr pequeños movimientos dentales, luego de culminar el tratamiento, con aparatología ortodóntica fija; éstos posicionadores, se fabricaban en caucho de vulcanita, a partir de modelos en cera de pacientes que requerían detallado adicional, *refinamiento*. Aunque estos dispositivos incorporaban todos los movimientos dentales en un solo aparato, el doctor Kesling notó la posibilidad de lograr movimientos dentales mayores, haciendo pequeñas modificaciones secuenciales en la configuración inicial, a medida que avanzaba el tratamiento (15).

En 1971, Ponitz introdujo los llamados retenedores "invisibles" y afirmó, que usar cera en una placa base para reposicionar los dientes en el modelo de trabajo antes de realizar el retenedor, podía servir para lograr movimientos dentales limitados con los retenedores. En 1993, Sheridan et al. presentaron un retenedor removible, confeccionado a partir de una lámina termoplástica, que se caracterizó por ser estética, confortable y de bajo costo, actualmente conocida como placa Essix®; ésta permite producir movimientos fisiológicos dentales para mejorar la oclusión. Otros autores han sugerido que las placas Essix® moldeadas al vacío, podrían usarse para movimientos menores dentales (16). Existen diferentes tipos de láminas termoplásticas para la fabricación de éstas, se tiene por ejemplo

la de tipo A+ y la de tipo C+ las cuales tienen diferentes recomendaciones de uso, las Placas A+ de 0,30” 100PK y de 0,40” 100PK, por ejemplo, son recomendadas para la fabricación de planos de mordida *Bite Plane* en pacientes con mordida profunda, placas para bruxismo, acepta acrílicos y aglutinantes; por otro lado, la placa C+, es la de elección para retención pos tratamiento de ortodoncia, debido a su alta resistencia y durabilidad, que en el mercado puede ser encontrada en diferentes espesores, desde 0,5 mm hasta 3mm (17).

Con el advenimiento de la era de la informática, desde 1999 Align Technology® ha desarrollado la visión del Kesling y se ha basado en los principios de Nahoum, Raintree Essix, MacNamara, Ponitz, Sheridan y Truax, quienes crearon un método práctico, para realizar tratamientos de ortodoncia, el cual consiste en la fabricación de dispositivos personalizados, que se caracterizan por ser transparentes (figura 3.a), removibles y diseñados mediante tecnología CAD-CAM, con el fin de generar movimientos dentales programados para la corrección de maloclusiones (figura 3.b) (18).

Figura 3 Alineadores dentales. Placas transparentes que se fabrican según la anatomía dental de cada paciente



Fuente: <http://invisalign.mx/wp-content/uploads/2016/10/Invisalign-en-Mexico-DF-Ortodoncia-Invisible-Alineador>

Figura 4 Clinkcheck®. Programa que permite visualizar modificaciones en tiempo real.



Fuente: <http://www.invisalign-g6.com/Content/g6/Images/occlusal-contacts.jpg>

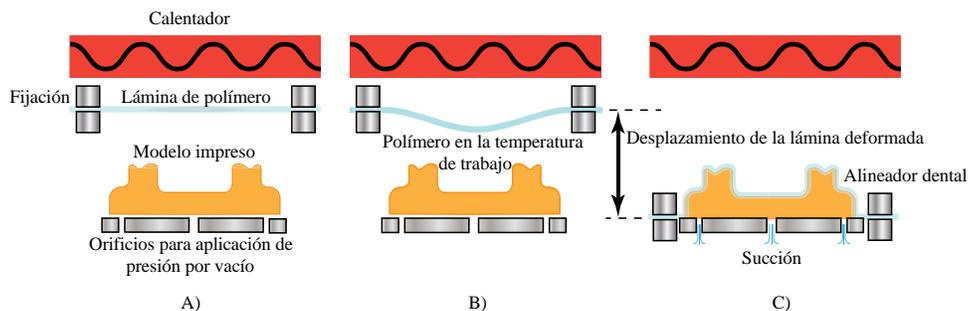
El tratamiento con alineadores, se introdujo inicialmente, para corregir malposiciones dentales menores. En la actualidad, no sólo es posible corregir pequeños detalles de oclusión, sino también casos complejos, que requieren mayores movimientos dentales. Hoy en día, algunas casas comerciales que fabrican sistemas de alineadores dentales, incorporan el uso de accesorios de resina compuesta, *attachments*, los cuales son adheridos en el esmalte dental, como elementos modificadores de la geometría del diente, con el fin de mejorar la eficiencia de los movimientos planeados, permitiendo tener mayor control y aumentando el porcentaje de éxito de movimientos, que sin los *attachments* serían más difíciles de conseguir (19 - 20).

El sistema Invisalign® incorpora tecnología CAD-CAM para proyectar el tratamiento y fabricar varios alineadores personalizados, a partir de una única impresión. Cada alineador está programado para mover un diente o un pequeño grupo de dientes, de 0,25 mm a 0,33 mm cada 14 días, aproximadamente (7).

El proceso de fabricación de los alineadores dentales o placas removibles transparentes, comienza con el escaneo digital *Reverse engineering* RE, de los dientes del paciente, para crear un modelo en tercera dimensión *3D*; esto puede realizarse a partir de un modelo dental en yeso, generado a partir de una impresión de la boca del paciente, utilizando un

sistema de RE sin contacto o directamente en la boca del paciente, utilizando un escáner intraoral. Técnicos especialistas en ortodoncia, planifican cada movimiento individual de los dientes, de acuerdo con el plan de tratamiento prescrito por el ortodontista, *simulación virtual asistida por computadora*; posteriormente, se fabrica un modelo físico en 3D, mediante un sistema *rapid prototyping RP, fabricación del modelo físico*. Finalmente, a partir de éste modelo físico, el alineador de ortodoncia se fabrica mediante un proceso de termoformado al vacío, en el que se extiende una lámina de un polímero termoplástico como el poliuretano, polipropileno, entre otros, sobre cada modelo físico, *fabricación del alineador* (21). El Termoformado, es un término genérico, que engloba varias técnicas de procesamiento, por las cuales se obtienen artículos plásticos a partir de láminas planas de distintos polímeros. Estos procesos, involucran tres etapas fundamentales: (a) calentamiento de láminas de material polimérico hasta la temperatura de procesamiento; (b) deformación de las láminas hacia la superficie de un molde, a menor temperatura, con la forma deseada; y (c) la lámina se retira del área de formado y el exceso de material es removido para obtener la pieza final cuando la lámina se ha enfriado lo suficiente, para mantener la forma del molde. El termoformado, requiere que la lámina del material polimérico sea lo suficientemente flexible para ser moldeada, pero a su vez, debe poseer suficiente estabilidad para mantener la forma obtenida (figura 4) (22).

Figura 5 Proceso de termoformado.



A) Fijación de la lámina de polímero y posicionamiento del modelo impreso. B) Calentamiento para llevar el polímero a la temperatura de trabajo. C) Desplazamiento de la lámina deformada y formación del alineador sobre el modelo por presión de vacío.

Comparado con los dispositivos fijos tradicionales, los alineadores dentales presentan ciertas características y beneficios llamativos para los pacientes como: (18, 23).

- Son altamente estéticos por la translucidez del material
- Son diseñados a medida para cada paciente en particular, lo que permite un tratamiento completamente personalizado
- Facilitan la realización de una adecuada higiene oral, disminuyéndose significativamente el porcentaje de riesgo de desarrollo de caries dental y gingivitis, asociada a placa bacteriana
- Son fáciles de usar
- Al ser removibles son muy cómodos y tiene mayor aceptación por parte del paciente
- Al ser diseñados mediante tecnología CAD/CAM, permiten mejorar la previsibilidad del objetivo del tratamiento y, además, hacen posible previsualizar, analizar y planear detalladamente, las mecánicas necesarias para lograr los objetivos del mismo, lo que hace que ésta técnica, sea más atractiva tanto para el profesional como para el paciente.
- El Ortodoncista puede programar pequeños rangos de movimiento en cada etapa del tratamiento, con lo cual se obtiene un mayor control del dolor que siente el paciente, que con brackets convencionales, ya que con éstos últimos, usualmente no se mide el grado y la cantidad de activación de las diferentes mecánicas usadas.
- Favorecen la reducción de las visitas de emergencias en el consultorio, ya que no generan lesiones en tejidos blandos, permitiendo disminuir el “tiempo sillón” del paciente.

Así mismo, el uso de alineadores dentales presenta ciertas desventajas e inconvenientes como: (2, 24-26).

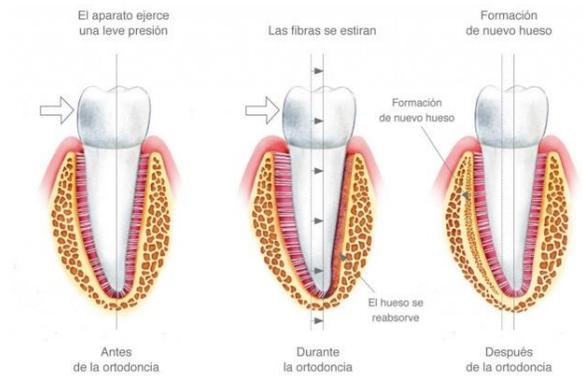
- Para obtener los resultados esperados con el tratamiento, se requiere el uso estricto y riguroso de las placas por parte del paciente, es decir, que sin la colaboración del usuario no es posible la realización exitosa del mismo.

- Se necesita mayor cantidad de tiempo por parte del profesional para la planeación del tratamiento.
- Actualmente es más costoso que un procedimiento con aparatología ortodóntica convencional.
- Se han reportado algunas dificultades e incompetencias mecánicas de los alineadores, cuando se requiere solucionar casos complicados, como apiñamientos severos, mordidas profundas, rotación de dientes redondos y correcciones anteroposteriores severas
- Los ortodoncistas a menudo necesitan refinamiento de casos o uso de elementos auxiliares para el desarrollo de mecánicas más predecibles y seguras dado que la eficacia del tratamiento de los alineadores es significativamente menor que la de los aparatos fijos.

4.1 Tipos de movimientos dentales ortodónticos

La magnitud, la dirección y la duración de las fuerzas ejercidas sobre los dientes durante el tratamiento de ortodoncia, son determinantes en el movimiento dental ortodóntico *OTM* generado (figura 5). La fuerza aplicada a los dientes, puede generar varios tipos de movimiento dental, lo cual va a depender de la ubicación del centro de resistencia *CR* en cada diente y de la dirección en la que se aplica dicha fuerza. Hay que tener en cuenta que el *CR* cambia de un diente a otro en función del tamaño, el número de raíces y la cantidad de raíz dental que está inmersa en el hueso. Esta variabilidad entre los pacientes puede afectar el *OTM*. La edad, el género, la longitud de la raíz, los niveles óseos, la densidad ósea, los medicamentos consumidos por el paciente y ciertas afecciones sistémicas pueden tener efectos inhibitorios, sinérgicos o aditivos sobre el *OTM* (27).

Figura 6 Movimiento dental ortodóntico.

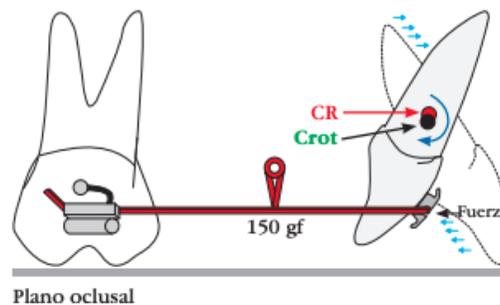


Fuente: <http://www.clinicaortonova.com/wp-content/uploads/2015/06/MOVIMIENTO>

Los dientes pueden moverse en las tres direcciones del espacio, pero básicamente, se tienen las siguientes formas de movimiento: rotación pura, traslación y la combinación de ambos o inclinación.

1.2.1 Movimiento de rotación pura: Movimiento en el cual el centro de rotación y el centro de resistencia se ubican en el mismo punto. La corona se mueve para un lado y la raíz se mueve en sentido contrario (figura 6).

Figura 7 Rotación de un incisivo central superior.

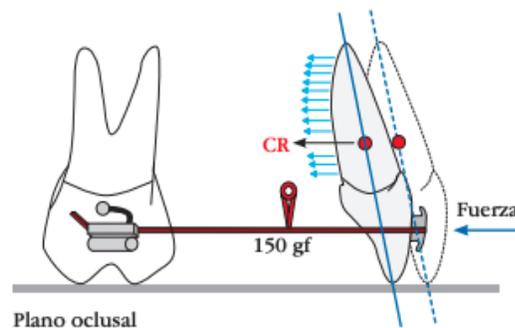


Fuente: (28)

1.2.2 Traslación: Movimiento en masa, *en cuerpo*, el diente se desplaza en su totalidad de manera uniforme, el centro de rotación se sitúa en el infinito (figura 7). Cada punto del

diente se mueve paralelo a la dirección de la fuerza, siguiendo una línea recta. La fuerza se distribuye de manera uniforme por todo el alveolo en el lado de compresión y su correspondiente lado de tensión. Es el movimiento horizontal del diente (con respecto a la apófisis alveolar) en el que la inclinación axial de la raíz no es modificada. Es uno de los movimientos más deseados en ortodoncia, pero también el más difícil de lograr ya que el centro de resistencia es clínicamente inaccesible, por tanto, no se puede conseguir aplicando una fuerza simple, sino que debe usarse un sistema de fuerzas.

Figura 8 Movimiento en cuerpo o de traslación

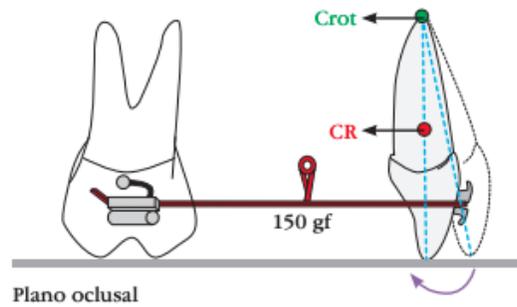


Fuente: (28)

1.2.3 **Inclinación:** Movimiento donde el diente gira alrededor del centro de rotación que se ubica apical a su centro de resistencia, se produce mayor movimiento de la corona dental que de la raíz. Se genera cuando se ejerce una fuerza coronal, probando que ésta se mueva en la dirección de dicha fuerza y la raíz en sentido contrario. De acuerdo a la ubicación del centro de resistencia, la inclinación puede ser: Controlada e Incontrolada

- ✓ **Inclinación controlada:** Es un tipo de movimiento dental muy deseable para el ortodoncista, se obtiene por la aplicación de un momento para *controlar* o mantener en posición el ápice radicular, es decir, el fulcro del movimiento, *centro de rotación*, coincide con el ápice. El estrés en el ápice es mínimo, lo que ayuda a mantener la integridad apical. Éste movimiento se puede realizar tanto en el plano frontal como lateral (figura 8) (28- 29).

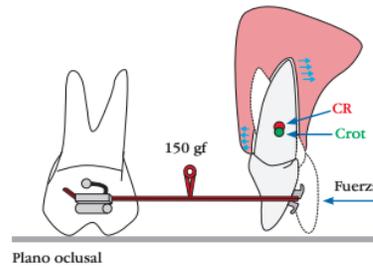
Figura 9 Movimiento dental controlado (movimiento de corona)



Fuente: (28)

- ✓ **Inclinación incontrolada:** En esta inclinación el diente gira alrededor del centro de rotación que se ubica apical a su centro de resistencia. Se produce cuando se aplica una fuerza en la corona dental, que hace que ella se mueva en la dirección de la fuerza y la raíz en sentido contrario y se establecen áreas de presión y tensión, a lo largo de la raíz con las consiguientes reabsorciones y aposiciones óseas (figura 9).

Figura 10 Movimiento dental no controlado



Fuente: (28)

4.2 Incompetencia biomecánica de los alineadores

Como ya se ha mencionado en el documento, con alineadores dentales es difícil generar con éxito ciertos movimientos como los rotacionales, especialmente de caninos y premolares, por lo que en algunas ocasiones es necesario utilizar mecánicas y aditamentos

adicionales para conseguir el movimiento deseado; por lo tanto, la desrotación de dientes cilíndricos se convierte en un desafío biomecánico para el ortodoncista, debido a la *geometría dental*, ya que se produce *deslizamiento* del alineador durante el movimiento desrotacional. Align Technology Inc®, con el fin de contrarrestar lo mencionado anteriormente, recomienda el uso de accesorios en resina cementados en el esmalte, *attachments*, con el fin de modificar la geometría dental, realizar sobre-correcciones de los movimientos y utilizar aditamentos adicionales al retenedor (30).

Sin el uso de *attachments*, los alineadores dentales no pueden lograr el movimiento programado con una predictibilidad del 100%. Aunque los movimientos de inclinación se logran de forma eficaz, especialmente en los molares y premolares (31).

Algunos autores sugieren que los alineadores pueden producir movimientos de inclinación incontrolada en sitios de extracciones dentales, *durante el cierre de espacio*, los escasos resultados durante la retracción de los caninos, sugieren que los dientes con raíces más grandes, pueden tener mayor dificultad para lograr movimientos mesiodistales. En general, se cree, que los alineadores pueden inclinar fácilmente las coronas, pero no pueden inclinar las raíces, debido a la falta de control del movimiento dental. Esta conclusión, se ve reforzada por Drake et al. quienes afirmaron, que el movimiento en cuerpo de un diente no se puede lograr con alineadores (26).

En la literatura, algunos autores han puesto en duda que los alineadores puedan generar movimientos translacionales; Thorsten Grünheid; Charlene Loh et al. evaluaron la eficacia de la tecnología Invisaling®, para lograr las posiciones dentales planeadas, con respecto al tipo de diente y a la dirección del movimiento, concluyeron que los alineadores son capaces de generar las posiciones dentales previstas, con alta precisión, en casos sin extracciones, sin embargo recomiendan que el ortodoncista tenga en cuenta los siguientes resultados antes de planificar un tratamiento: la expansión del arco maxilar, puede no alcanzarse completamente, los incisivos inferiores tienden a posicionarse más oclusalmente de lo previsto, las desrotaciones de dientes redondeados, pueden no ser corregidas de forma completa y el torque en molares, puede no lograrse del todo (32).

4.3 Polímeros termoplásticos

Los polímeros están constituidos por macromoléculas de peso molecular alto, las cuales son series repetitivas de unidades estructurales más pequeñas, llamadas meros o monómeros. Los polímeros pueden ser de origen natural, sustancias minerales o se pueden crear artificialmente. Estos materiales, se pueden clasificar de diferentes formas, una de ellas es, cómo reaccionan con el ambiente, teniendo en cuenta su comportamiento a los cambios de temperatura, dividiéndolos en termoestables y termoplásticos. Los polímeros termoestables, están compuestos por largas cadenas de moléculas, con fuertes enlaces cruzados entre las cadenas, para formar estructuras de redes tridimensionales, estos materiales generalmente son más resistentes, aunque más frágiles, que los termoplásticos. A los polímeros termoestables, el calor no los funde y son difíciles de reprocesarlos una vez ocurrida la formación de enlaces cruzados. Una vez calentados, reaccionan irreversiblemente, de modo que las aplicaciones posteriores de presión y calor, no los ablanda ni los hace fluir. Los polímeros termoplásticos, se componen de largas cadenas producidas al unir moléculas pequeñas o monómeros y típicamente se comportan de una manera plástica y dúctil. Son los que se ablandan y fluyen, cuando se les aplica presión y calor; se pueden remodelar varias veces. La desventaja de estos materiales es que, a elevadas temperaturas, sufren distorsión. Los polímeros termoplásticos tienen un acabado liso y duro cuando se enfrían (33), están compuestos estructuralmente por polímeros amorfos o parcialmente cristalinos, que permiten que la luz visible pase a través de ellos; son utilizados para la fabricación de los alineadores ortodónticos transparentes (*transparent orthodontic aligners TOAs*) (10).

El polímero termoplástico ideal en ortodoncia debe cumplir con ciertas propiedades, tales como: gran recuperación elástica, baja rigidez, buena conformabilidad, densidad de energía almacenada, bio-compatibilidad y estabilidad a las condiciones ambientales. A pesar de la gran cantidad de productos termoplásticos disponibles en el mercado, ninguno está diseñado específicamente para el movimiento dental ortodóntico; lo que se evidencia, cuando se compara la oferta del mercado con esta lista de propiedades.

El Poliéster, el Poliuretano, Polietileno Tereftalato glicol (PETG) y el Polipropileno son los materiales termoplásticos más utilizados en la fabricación de alineadores dentales en ortodoncia. Entre los cuales, el PET (Tereftalato de Polietileno) es un material termoplástico ampliamente utilizado porque presenta buenas propiedades mecánicas, de fluencia, conformabilidad, cualidades ópticas, resistencia a la fatiga y estabilidad dimensional (8).

4.4 Factores que modifican las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos

A diferencia de las técnicas de ortodoncia convencionales, la calidad de la fuerza ortodóntica ejercida por un alineador, depende de las propiedades mecánicas del material de fabricación. Como los materiales termoplásticos son viscoelásticos, es decir que tienen propiedades intermedias entre los fluidos y los materiales elásticos, la carga puede variar considerablemente con el tiempo, incluso cuando se introducen por primera vez y antes de lograr cualquier movimiento dental. De hecho, bajo cargas constantes, la deflexión de un material viscoelástico, aumenta con el tiempo y la temperatura, fenómeno conocido como fluencia lenta *creep* (5); Albert et al. definen éste fenómeno, como la deformación plástica, gradual y lenta a lo largo del tiempo de los polímeros termoformables (34).

La tensión que sufren los alineadores termoplásticos inducida por la deformación inicial tiende a causar el deterioro de las propiedades mecánicas de éstos; este fenómeno, llamado relajación de esfuerzo (*stress relaxation*) disminuye la capacidad del alineador termoplástico, para mover un diente con el tiempo, por lo tanto, las fuerzas ortodónticas y el movimiento de los dientes, es menos predecible. El efecto temporal de la relajación de esfuerzo de los materiales termoplásticos dentro de la cavidad oral es crucial, no solo para los materiales de cribado (tamizaje), destinados a aplicaciones dentales, sino también para comprender mejor el mecanismo y el proceso de la ortodoncia con alineadores (9). El *stress relaxation*, se relaciona con la deformación cíclica de los alineadores, la magnitud de fuerza generada por los mismos, el espesor, la propiedad higroscópica, el proceso de fabricación y la cantidad de movimiento dental planeado, entre una etapa y otra del tratamiento (2).

Los alineadores termoplásticos, están sujetos a cargas intermitentes, tanto a corto plazo como a largo plazo en cavidad oral. A corto plazo, cuando se insertan sobre los dientes del paciente, el alineador puede sufrir una deformación severa durante el montaje y responder de manera elástica al volver a su forma original después de que se retire la fuerza de carga que causa la deformación. Una vez colocado sobre los dientes del paciente, el aparato se somete a fuerzas de carga a largo plazo, ejercidas de forma intermitente entre las comidas y cuando se usa durante la noche. Aunque es sometido a una carga a largo plazo, el alineador debe ejercer fuerzas ortodónticas continuas y controladas sobre los dientes, para provocar el movimiento dental. Esta carga puede ser modificada por la relajación de esfuerzo, ya que al reducir la carga ejercida por el alineador, una vez insertado en la boca, su efecto dependerá tanto de la magnitud de la carga aplicada, como de las propiedades del material utilizado para hacer el alineador. Por lo tanto, es importante tener un conocimiento profundo del efecto de la carga a largo plazo, en las propiedades mecánicas de los polímeros termoplásticos. Esto ayuda a evaluar, si un material termoplástico en particular, podría cumplir el propósito de un dispositivo de ortodoncia y proporcionar fuerzas ortodónticas ligeras y sostenidas para lograr movimiento dental eficiente. Los materiales termoplásticos son de naturaleza viscoelástica, lo que significa que la fuerza generada por el movimiento programado disminuye en función del tiempo (5, 8).

Debido a la absorción de agua, se producen varios cambios fisicoquímicos en el material, lo que hace que las propiedades mecánicas del polímero se degraden irreversiblemente. El agua puede reaccionar químicamente con la cadena principal del polímero a través de un proceso llamado hidrólisis. Por lo tanto, la humedad en cualquier forma es hostil para los polímeros, ya que a menudo causa un abultamiento y degradación. En un estudio *in vitro* encontró que la absorción de agua indujo cambios dimensionales en numerosos productos comerciales de protectores bucales, que tenían composiciones similares a las de los materiales de ortodoncia con recubrimiento termoplástico. En la boca, los cambios dimensionales debidos a la expansión higroscópica pueden afectar el ajuste de los aparatos fabricados a partir de estos materiales termoplásticos, lo que provoca cambios en las

fuerzas ortodónticas suministradas. Por estas razones, un material termoplástico para aparatos de ortodoncia debe tener una baja absorción de agua (8).

El Módulo de elasticidad del material es otro factor que influye en las propiedades mecánicas de los polímeros. Autores como Naohisa et al. afirman, que la fuerza ortodóntica de los aparatos termoplásticos, tiene una fuerte correlación con la dureza y el módulo elástico de los materiales (2), Ryu JH et al. Sugieren en su estudio, que la fuerza y el módulo de elasticidad de todos los materiales disminuye después del termoformado, y los incrementos en el espesor de los mismos, aumentan la fuerza mientras que el módulo elástico disminuye (10).

Kohda et al. (2) concluyeron en su estudio, que el grosor de los materiales tiene una influencia altamente significativa en las fuerzas suministradas por los aparatos termoplásticos; así mismo, afirman Han et al. “El grosor del polímero termoplástico, interviene directamente en la fuerza generada por el mismo, el proceso de termoformado específico es otro factor que influye, en la cantidad de fuerza generada por el material” (35). Zhonghua et al. en el 2014 realizaron un estudio, con el objetivo de medir las fuerzas de ortodoncia ejercidas en el incisivo central superior derecho, con el aumento de la distancia del movimiento del diente y el grosor del alineador. Se diseñaron placas con movimientos predeterminados de diferentes magnitudes (0,3mm, 0,6mm, 0,9mm, 1,2mm, 1,5mm, 1,8 mm) y se creó el modelo estereolitográfico (2 veces más grande que el modelo original) con escaneo 3D y tomografía. Estos modelos, se utilizaron para fabricar los alineadores con diferentes grosores (0,8mm, 1,0mm, 1,5mm y 2,0 mm) de los materiales termoplásticos (6 muestras para diversas distancias de movimiento y grosor de los dientes). Las fuerzas de ortodoncia, ejercidas en el incisivo central superior derecho, se midieron con el sistema de medición con sensor de micro esfuerzo. Finalizado el estudio, se llegó a la conclusión, de que las fuerzas de ortodoncia aumentaron, con el incremento de la distancia del movimiento del diente y el grosor del alineador (2, 36). Los alineadores son fabricados en diferentes espesores, entre 0,50 mm y 1,5 mm, lo cual influye directamente sobre las fuerzas suministradas por el los mismos (2).

Como se ha mencionado anteriormente, las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos están influenciadas por factores estructurales, como las estructuras moleculares y cristalinas, y factores ambientales, como la temperatura y la humedad. Por lo tanto, las propiedades mecánicas varían, bajo la influencia de las condiciones de formación y las condiciones de uso. Hiromi et al. consideran que el espesor después del termoformado está influenciado profundamente, por las diferencias entre la temperatura de calentamiento, los puntos de fusión de los plásticos (los puntos de reblandecimiento de los mismos), el tiempo de calentamiento y el peso molecular. En general, se emplean dos tipos de procedimientos de termoformado para éstos materiales, el vacío y la alta presión. Naohisa et al. afirman que los aparatos termoformados de alta presión, entregan fuerzas significativamente mayores, que las producidas por la formación al vacío, debido a un mejor ajuste (2).

Los materiales plásticos transparentes tienen módulos de elasticidad e índices de absorción de agua altos, y el cambio de temperatura de 23°C a 37°C en cavidad oral, tendrá poca influencia en sus propiedades mecánicas. Los cambios intraorales en la dimensión, con la expansión higroscópica, pueden afectar el ajuste de los aparatos fabricados con dichos materiales, lo que da como resultado, cambios en las fuerzas ortodónticas. En contraste, los materiales opacos, tuvieron módulos de elasticidad y tasas de absorción de agua más bajos, y leves cambios en la temperatura de 23°C a 37°C tendrían efectos marcados en sus propiedades mecánicas afirman Hiromi et al. en su estudio (1).

5 DEFINICIÓN DE TERMINOS

Centro de rotación: Punto sobre el cual rota un cuerpo al aplicarle una fuerza. Las fuerzas pasan excéntricas y no paralelas al centro de resistencia. El centro de rotación puede estar cerca, pero nunca coincidirá con el centro de resistencia.

Centro de masa: Es el punto a través del cual se debe aplicar una fuerza, para que un objeto libre se mueva linealmente sin ninguna rotación, es decir, el centro de masa es un “punto de equilibrio” del objeto.

Centro de resistencia: Es el punto a través del cual, debe pasar una fuerza aplicada, para mover un objeto libre en forma lineal, sin rotación alguna; en otras palabras, el centro de resistencia es el *punto de equilibrio* de un objeto; Un diente dentro de su sistema periodontal de sostén, no es un cuerpo libre, pues está restringido por dichos tejidos. El centro de resistencia de un diente es análogo al centro de masa en cuerpos *restringidos*. El centro de resistencia de un diente, depende, de la longitud de la raíz y la morfología, el número de raíces y el nivel del apoyo óseo alveolar.

Fuerza: Se denomina F a cualquier acción física, capaz de modificar el estado de movimiento o de reposo de un cuerpo, es decir, de imprimirle una aceleración modificando su velocidad. Puesto que la F es una cantidad vectorial, tiene magnitud, dirección y se representa por un vector.

Eje longitudinal del diente: línea imaginaria que va desde el borde incisal hasta el ápice, en el caso de dientes anteriores. En dientes posteriores, desde las cúspides de la cara oclusal hasta el ápice de las raíces.

6 OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

Realizar una descripción comparativa de los polímeros comercialmente más utilizados en la fabricación de alineadores plásticos termoformados con el fin de proporcionar directrices de selección.

6.2 Objetivos específicos

- Identificar los polímeros comercialmente más utilizados para la fabricación de alineadores termoformados, haciendo énfasis en las características biomecánicas más importantes de los mismos.
- Realizar un análisis comparativo de los diferentes polímeros, teniendo en cuenta sus diferentes características, en relación con las aplicaciones biomecánicas específicas.
- Formular recomendaciones en el uso de polímeros para fabricación de alineadores plásticos termoformados, teniendo en cuenta las acciones biomecánicas específicas esperadas durante el curso del tratamiento ortodóntico.

7 METODOLOGÍA

La metodología acá descrita se precisa para el cumplimiento de los tres objetivos específicos propuestos, que deberán dar cumplimiento a la siguiente hipótesis de investigación.

7.1 Hipótesis de investigación

Hipótesis nula: Existen condiciones biomecánicas jerárquicas, que clasifiquen por justificación de selección, el uso en ortodoncia de un grupo de estudio de polímeros base usados para el termoformado de alineadores dentales poliméricos.

El rechazo o no de la hipótesis se establece al culminar los objetivos específicos.

7.2 Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 1.

El primer objetivo se enfoca en la identificación de materiales poliméricos usados en la fabricación de los alineadores y en la identificación de las características consideradas como esenciales para el funcionamiento adecuado de los alineadores en el proceso de ortodoncia. Debido a la descripción del objetivo se utilizará la metodología estándar de selección de material y proceso de diseño de elementos sugerida por Norton (37). Los puntos fundamentales de esta metodología y a ser usados para el desarrollo de este objetivo son:

- **Identificación de la necesidad:** Los alineadores son opciones que presentan grandes ventajas a las personas en tratamiento de ortodoncia respecto a los elementos operativos tradicionales, no obstante, su uso se ve restringido a los criterios comerciales de las compañías de fabricación, venta y distribución del polímero base de trabajo, teniendo como resultado poco o ningún conocimiento científico sobre la inferencia del material en la fabricación del alineador por termoformado y sobre los criterios de diseño del alineador necesitado en cada paso del proceso de ortodoncia de acuerdo a la necesidad del paciente, con respecto a sus propiedades biomecánicas.

- **Búsqueda y selección de información:** Debido a la identificación de la necesidad se realiza la búsqueda de los polímeros más usados en el proceso de fabricación de los alineadores a partir de información comercial de distribución; y científica en referentes de investigación cercanos a este y además se hace un tamizado de la información para establecer los de mayor uso por facilidad de consecución a nivel nacional. Adicionalmente se referencia de manera formal cuáles propiedades biomecánicas resultan ser de alto interés para el diseño final del alineador en su fase operativa. Este trabajo se ha adelantado en gran parte dando como resultado la información presentada en la Tabla 1, donde las casillas resaltadas en gris corresponden a los polímeros más populares entre el grupo de análisis. Se resalta que los valores del espesor comercial son precisos de referencia dada por el fabricante mediante proceso de manufactura mientras que los valores de la absorción de humedad, elongación del espesor, el módulo elástico y la resistencia a la fluencia en tensión son valores referenciados como medias poblacionales.

Tabla 1 Valores de los parámetros de comparación para trece marcas de polímeros comerciales usados para la fabricación de alineadores dentales.

Material	Polímero	Traslucidez	Capacidad de absorción de agua [wt%]	Espesor [mm]	Cambio de espesor [mm]	Módulo elástico ⁹ [MPa]
Invisacryl A	CP ¹	Transparente	0,80	0,75 y 1,00	0,20	550
Invisacryl C	PP/E ²	Opaco	0,10	0,75 y 1,00	0,10	450
Essix A+	CP	Transparente	0,80	1,00	0,20	550
Essix C+	PP/E	Opaco	0,10	1,00	0,10	450
Bioplast	EVA ³	Opaco	0,22	0,75 y 1,00	0,10	25
Copyplast	PE ⁴	Opaco	0,03	1,00	0,20	275 – 1 240
Hardcast	PP	Opaco	0,10	0,80	0,05	425
Duran	PETG ⁵	Transparente	0,80	1,00	0,15	500
Imprelon S	PC ⁶	Transparente	0,35	0,75	0,10	60 – 72,4
Smart Track	MDI ⁷	Transparente	1,50	0,75	0,10	48
Zendura	TPU ⁸	Transparente	0,15	0,38 y 0,75	0,05	31 – 62
Track A	PETG	Transparente	0,16	0,50 y 0,80	-	55 - 75
Biolon	PETG	Transparente	0,16	0,75 y 1,00	-	55 -75

Fuente: La información de la tabla se recolectó de la ficha técnica de cada uno de los polímeros de acuerdo al fabricante.

¹Copoliéster, ²Polipropileno/Etileno, ³Etilvinilacetato, ⁴Polietileno, ⁵Teraftalato de polietileno glicol, ⁶Policarbonato, ⁷Diisocianato de difenilmetano, ⁸Poliuretano termoplástico. ⁹Los valores son considerados como medias poblacionales de acuerdo a datos del fabricante. Algunos están dados en rangos.

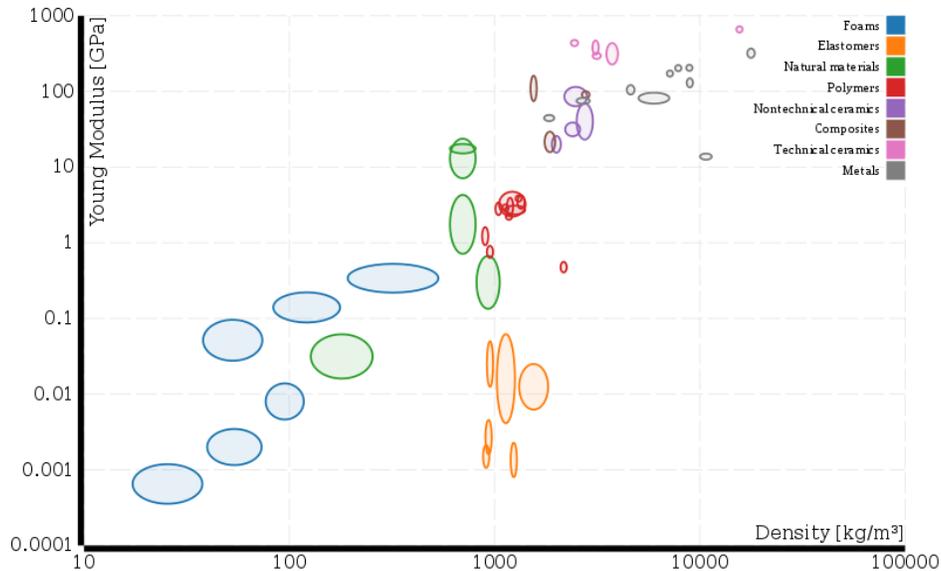
Verificación de cumplimiento del objetivo específico 1.

Puesto que este objetivo está relacionado con búsqueda y selección adecuada de información, la verificación de cumplimiento se referirá de manera unívoca a la constatación de existencia de la información en reporte escrito, debidamente explicada y con referencia precisa de fuentes.

7.3 Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 2.

El segundo objetivo se basa en la comparación de polímeros de acuerdo a las propiedades mecánicas establecidas para ellos, que se listaron en la Tabla 1. De manera concreta la organización se puede dar de la manera ${}^{13}C_6 = 1,716$ combinaciones, dados 13 materiales base y 6 propiedades biomecánicas, donde \overline{C} es el símbolo de la operación combinatoria. La comparación se realizará usando gráficas cartesianas conocidas como diagramas de Ashby, donde dos propiedades se comparan en función del tipo de material. Un diagrama de Ashby, ilustrado como ejemplo, se muestra en la Fig. 1, donde se compara el módulo de Young vs. la densidad para 50 materiales específicos, permitiendo identificar el material o grupo de materiales que cumplan con lineamientos específicos en las propiedades asociadas a la gráfica. Por ejemplo, en la Fig. 1, se observa que los elastómeros, (“elastomers” en la gráfica) presentan un módulo de Young bajo (entre 0,001 GPa y 0,1 GPa) para valores de densidad cercanos a 1 000 kg/m³, mientras que los polímeros (“Polymers”, en la gráfica) tienen valores del módulo de Young más altos (entre 0,5 GPa y 9 GPa) para los mismos valores de densidad. Esto indica que para una aplicación determinada donde la rigidez del elemento a ser diseñado sea crucial, los polímeros tienen mejores prestaciones que los elastómeros para materiales con la misma densidad.

Figura 11 Diagrama de Ashby. Es un mapa donde dos propiedades mecánicas, físicas, etc., son comparadas en función de diferentes materiales



Fuente: : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Young_vs_density-loglog.svg, disponible para reutilización

Planeación metodológica para el desarrollo del objetivo específico 2.

Se realizarán diagramas de Ashby que relacionen las propiedades de la Tabla 1 en función de los polímeros identificados. Como unidad fundamental de estudio se establece el tipo de polímero, e incluso el nombre comercial. La elaboración de las gráficas de relación de las propiedades fundamentales se realizará usando la siguiente estrategia:

- Uso de la herramienta Excel®, con licencia de uso en la Universidad Autónoma de Manizales, para la elaboración de las tablas base a ser comparadas.
- Uso de la herramienta Matlab®, con licencia de uso en la Universidad Autónoma de Manizales, para la elaboración de las gráficas conocidas como diagramas de Ashby. Cabe anotar que en los mapas de Ashby se establecieron tres tipos de elementos geométricos para describir el dominio del material: i) puntos, si sólo se tienen datos de media poblacional de las dos propiedades a ser comparadas, ii) segmentos rectilíneos, si al menos una de las dos propiedades comparadas tiene un rango de

valores en lugar de un valor puntual de media poblacional, iii) paralelogramos si las dos propiedades comparadas tienen rangos de valores en lugar de un valor puntual de media poblacional. La traslucidez no fue incluida en los mapas debido a que sus valores de respuesta son cualitativos y no cuantitativos.

- **Opcional:** Uso de la herramienta CES EduPack | Granta Design ®, no se cuenta con esta licencia en la Universidad Autónoma de Manizales, pero existe la posibilidad de usar un registro libre por treinta días. Esta herramienta permite de manera eficiente realizar los diagramas de Ashby asociados a una gran librería con materiales; y sus propiedades mecánicas con valores medios poblacionales y desviaciones estándar.

Verificación de cumplimiento del objetivo específico 2.

La verificación de cumplimiento se referirá de manera unívoca a la constatación de existencia de la información: diagramas de Ashby, en reporte escrito, debidamente explicada y con referencia precisa de fuentes.

7.4 Pasos metodológicos para el cumplimiento del objetivo 3.

El tercer objetivo específico resulta crucial para el rechazo o no de la hipótesis de prueba planteada. El objetivo se establece a partir de la identificación, análisis y discusión de los resultados obtenidos en el objetivo específico 2. De acuerdo a las condiciones planteadas para el diseño del alineador, se generarán recomendaciones de selección. Los criterios base serán:

- Precisión dimensional del espesor.
- Capacidad de absorción de humedad.
- Rigidez y resistencia a la fluencia.
- Traslucidez.

- Dureza.

Siendo los primeros tres criterios, aquellos de mayor relevancia para guiar la selección. Cabe anotar que es posible rechazar la hipótesis nula y generar una hipótesis alterna donde no existan criterios de jerarquización de selección entre los materiales escogidos. No obstante, este hecho no imposibilita el establecimiento de nuevos criterios como lo son: la facilidad de consecución de polímero base o su costo económico.

Verificación de cumplimiento del objetivo específico 3.

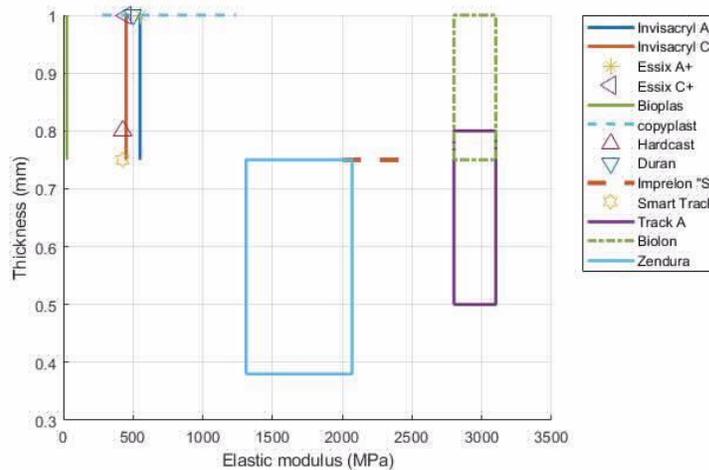
La verificación de cumplimiento se referirá de manera unívoca a la constatación de existencia de una lista de recomendaciones elaborada de manera formal para seleccionar el diseño del alineador dental polimérico. Esta lista se elaborará sin importar si la hipótesis nula es rechazada o no rechazada de acuerdo con lo establecido en el párrafo inmediatamente anterior. La lista de recomendaciones deberá estar en reporte escrito, debidamente explicada y con referencia precisa de fuentes.

8 RESULTADOS

Los resultados de éste estudio, proporcionan criterios para seleccionar los polímeros termoplásticos que, biomecánicamente poseen mejor comportamiento según las necesidades particulares de cada paciente; permitiendo la individualización de los tratamientos y así, la consecución de resultados eficaces.

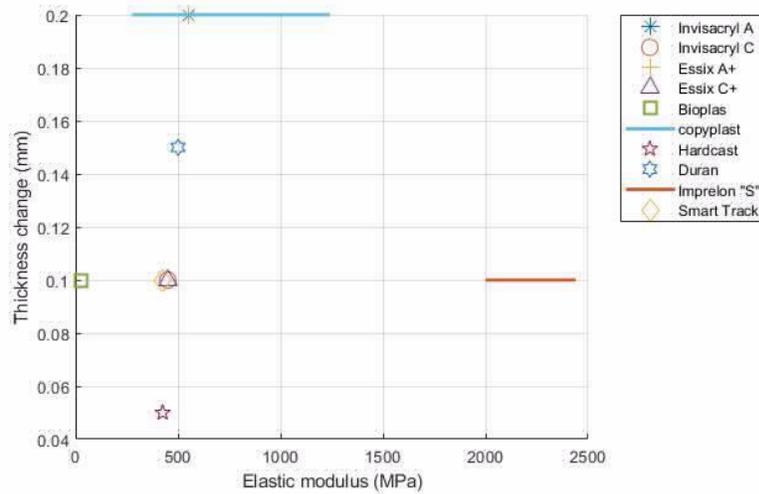
Las gráficas son, por lo tanto, herramientas de selección basadas en el comportamiento de los materiales con respecto de dos propiedades; y permiten observar cómo varía cada material según la relación de las mismas. La información para cada figura se construyó de acuerdo a la ficha técnica de cada polímero termoplástico, evaluando así sus propiedades particulares.

Figura 12 Comportamiento de espesor vs módulo elástico



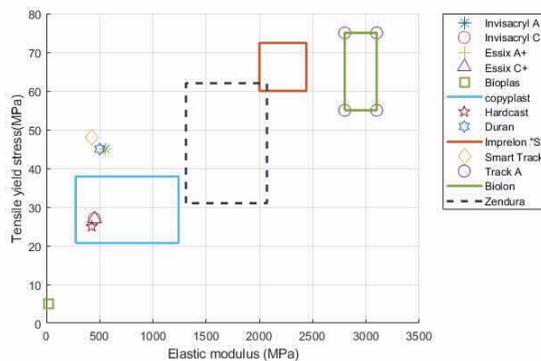
En la figura 11 se observa que el Bioplas es el material con menor módulo de elasticidad, es decir, que es el menos rígido de los valorados; por el contrario, el Biolon y el Track A tienen los mayores módulos de elasticidad, es decir, son los más rígidos.

Figura 13 Comportamiento de cambios de espesor vs módulo de elasticidad



En la figura 12 se establece que el Imprelon “S” es el material con mayor módulo de elasticidad; el Hardcast presenta los menores cambios de espesor y un módulo de elasticidad menor a 500 MPa; el Bioplas es el material con el menor módulo elástico, es decir, es el material menos rígido de los analizados, mientras que el Copyplast, el Invisacrlyl C y el Invisacrlyl A son los materiales que presentan mayor cambio en el espesor.

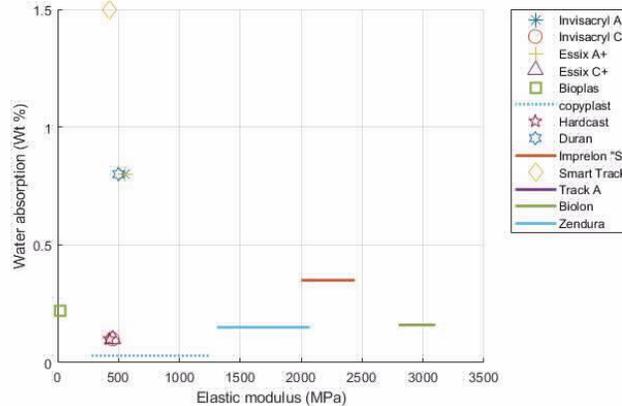
Figura 14 Comportamiento de esfuerzo de fluencia a la tensión vs módulo elástico



En la figura 13 se observa que el Bioplas es el material con menor esfuerzo de fluencia a la tensión y modulo elástico, es decir, es el más blando. El Biolon y el Track A son los

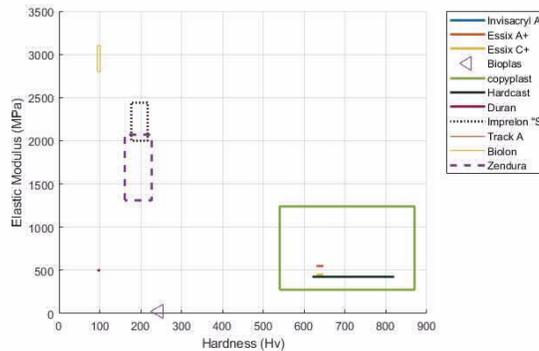
materiales con la capacidad de alcanzar el módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia por tensión más altos.

Figura 15 Comportamiento de absorción de agua vs módulo de elasticidad



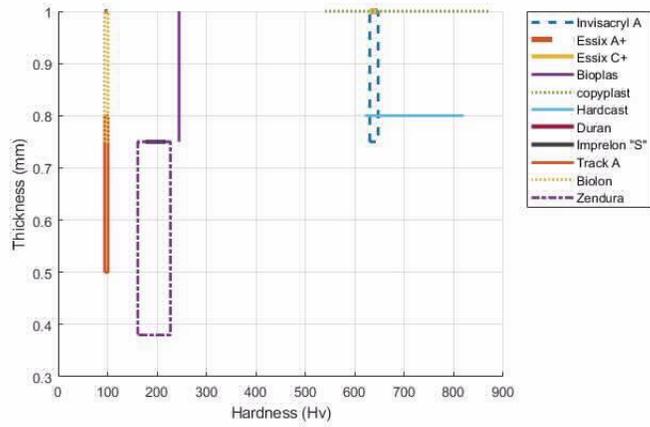
En la figura 14 se muestra que el Copyplast y el Smart Track presentan la menor y mayor capacidad de absorción de agua respectivamente y que el Biolon y el Bioplas tienen el mayor y el menor módulo elástico respectivamente.

Figura 16 Comportamiento de módulo de elasticidad vs dureza



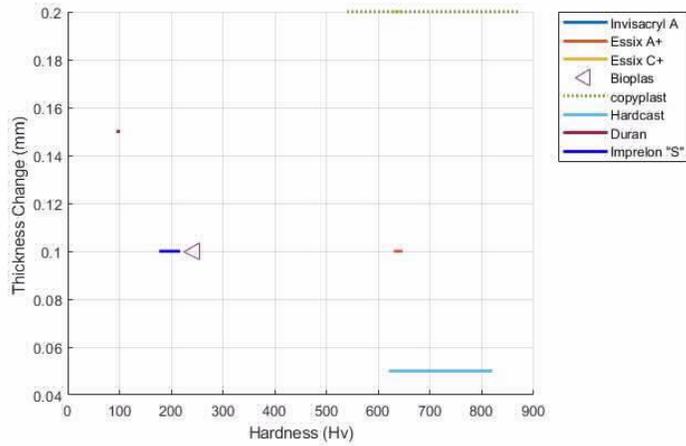
En la figura 15 se puede observar que el Bioplas y el Biolon presentan el menor y el mayor módulo elástico respectivamente; el Duran y el Biolon presentan las menores durezas, mientras que el Copyplast es el más duro de los polímeros comparados.

Figura 17 Comportamiento de espesor vs dureza



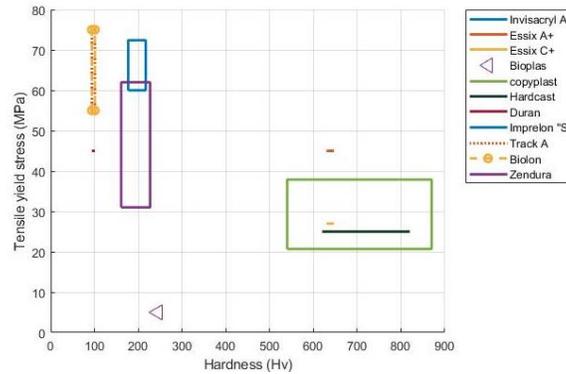
En la figura 16 se observa que el Copyplast y el Hardcast tienen las mayores durezas, mientras que el Track A y el Biolon son los más blandos de los polímeros comparados.

Figura 18 Comportamiento de cambios de espesor vs dureza.



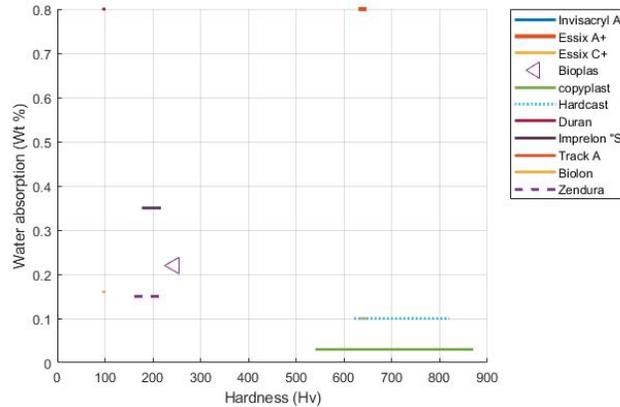
En la figura 17 se observa que el Hardcast tiene el menor cambio de espesor durante el termoformado y a su vez una dureza superior a 800 HV. El Duran es el material de menor dureza, mientras que el Copyplast y el Essix C+ presentan el mayor cambio de espesor.

Figura 19 Comportamiento de esfuerzo de fluencia a la tensión vs dureza



La figura 18 muestra que el Biolon y el Track A, tienen la mayor resistencia a la tensión y son los materiales con menor dureza. El Duran tiene una resistencia a la tensión puntual de 45 Mpa con dureza igual a las del Biolon y del Track A. El material con menor resistencia a la tensión es el Bioplas y tiene una dureza de 250 HV, mayor que la del Biolon y del Track A.

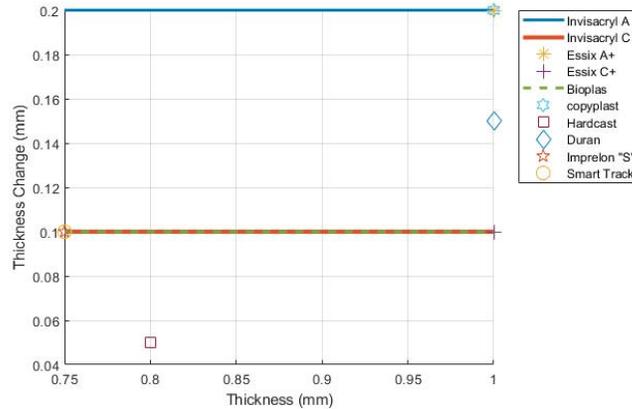
Figura 20 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs dureza



La figura 19 muestra que los materiales que tienen una capacidad de absorción de agua menor a 20% son el Biolon y el Zendura con baja dureza, siendo el Biolon el material más blando; el Hardcast es un material con alta dureza y absorbe poca agua. El Copyplast es el

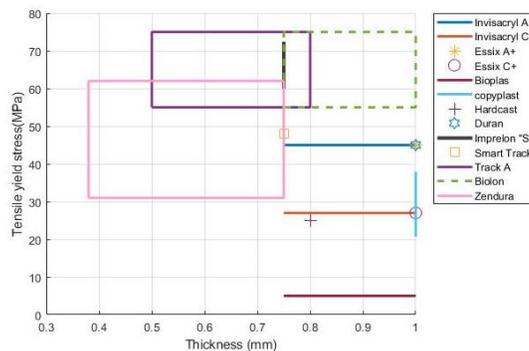
material que menos agua absorbe. El Essix A+ tiene la mayor capacidad de absorción de agua con dureza es igual a la del Essix C+.

Figura 21 Comportamiento de espesor vs cambio de espesor



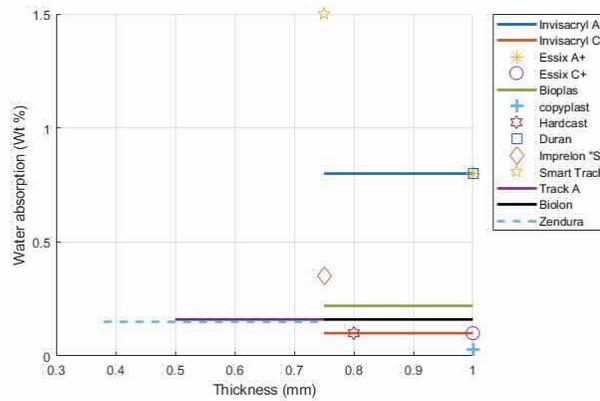
La figura 20 muestra que después del termoformado, los materiales que tiene un cambio de espesor de 0,1 mm son: el Hardcast, el Invisacrly C, el Bioplas, el Imprelon "S" y el Smart Track mientras que los materiales que mayores cambios experimentan son el Invisacrly A, el Copyplast y el Essix A+, todos con un cambio en el espesor de 0,2 mm a partir de un espesor dado.

Figura 22 Comportamiento de espesor vs esfuerzo de fluencia a la tensión.



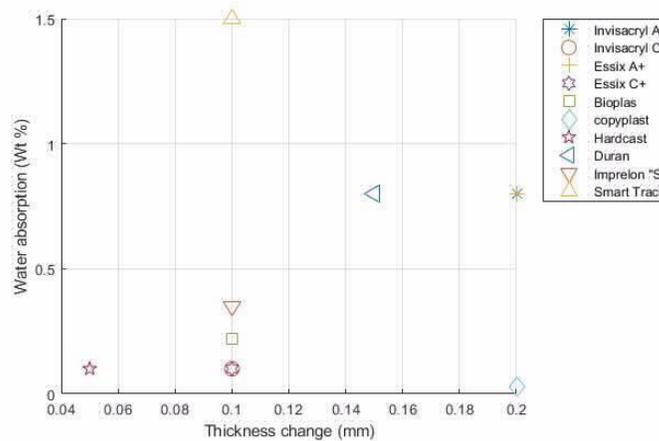
En la figura 21 se puede observar que los materiales con menor esfuerzo de fluencia a la tensión son el Bioplast y el Hardcast, por el contrario el Biolon y el Track A son los de mayor.

Figura 23 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs espesor.



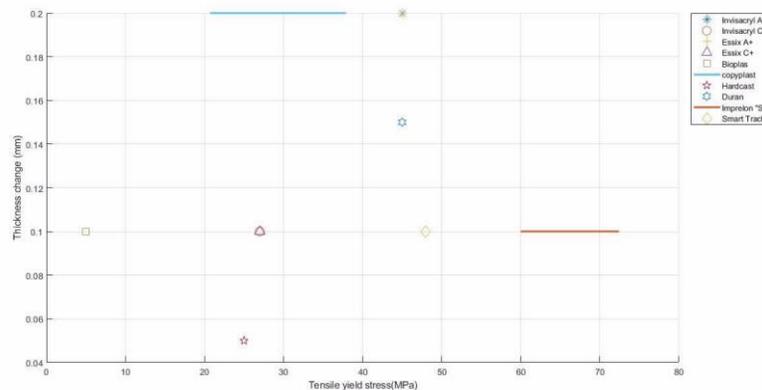
Con base en la figura 22 se puede establecer que el Zendura es el material que con menor espesor posee y más baja capacidad de absorción agua; Track A tiene similar capacidad de absorción de agua pero con un espesor mayor.

Figura 24 Comportamiento de capacidad de absorción de agua vs cambio de espesor.



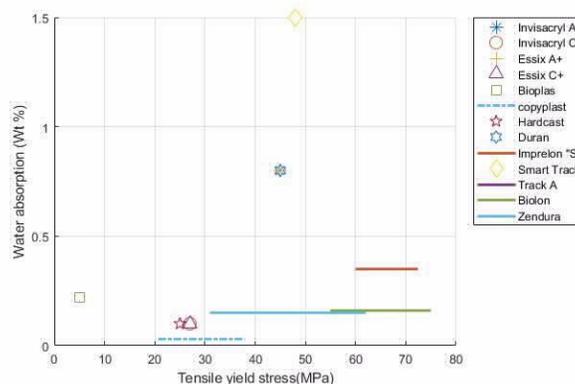
En la figura 23 se observa que el Hardcast es el material que tiene menor capacidad de absorción de agua y menor cambio en el espesor luego del termoformado, el Copyplast absorbe agua en un bajo porcentaje, pero presenta el mayor cambio en el espesor. El Smart Track, el Imprelon “S”, el Bioplas, el Essix C+ y el Invisacrly C experimentan iguales cambios esperados en el espesor y entre ellos el Smart Track posee mayor capacidad de absorción de agua.

Figura 25 Comportamiento de cambios de espesor vs esfuerzo de fluencia a la tensión



La figura 24 permite establecer que el Imprelon “S”, es el material con mayor resistencia a la tensión y experimenta un cambio de espesor de 0,1 mm, mientras que el Copyplast sufre un cambio de espesor de 0,2 mm con una menor resistencia a la fluencia.

Figura 26 Comportamiento de absorción de agua vs esfuerzo de fluencia a la tensión.



Según lo observado en la gráfica 25, el material que mayor resistencia a la fluencia experimenta y tiene capacidad de absorción de agua moderada es el Biolon, el Zendura también posee moderada capacidad, con mediana resistencia a la fluencia. El material que mayor capacidad de absorción de agua tiene es el Smart Track, que absorbe un 150% y presenta mediana resistencia a la tensión (50 MPa).

9 DISCUSIÓN

Como se ha mencionado en el desarrollo del documento, el comportamiento mecánico de los alineadores, es determinante en la efectividad de los movimientos que se desean obtener. Los alineadores ortodónticos tienen limitaciones inherentes, como la capacidad de absorción de agua, la inestabilidad dimensional y la baja resistencia al desgaste, características asociadas con la naturaleza de los materiales usados y con los procesos empleados para la fabricación de los mismos.

En general, para la realización de ortodoncia con alineadores dentales, es preferible que el material utilizado presente baja absorción de agua, alta dureza y poco cambio de espesor con el proceso de termoformado. Los polímeros termoplásticos absorben agua a través de la humedad del aire o la inmersión en agua. El ambiente intraoral húmedo produce un alto grado de absorción de agua, induciendo cambios físico-químicos en los materiales, lo que hace que las propiedades mecánicas de los polímeros se degraden irreversiblemente, provocando a su vez modificaciones en las fuerzas ortodónticas producidas por los alineadores (8). Lo anterior se debe a que los alineadores dentales se usan aproximadamente 22 horas diarias durante 10 a 14 días por cada etapa, por lo tanto, están en contacto directo con fluidos intraorales durante la mayor parte del tiempo (38).

Vale la pena señalar, además, que la capacidad de absorción de agua de estos materiales puede afectar el tamaño del alineador y tener una influencia en el ajuste “alineador – arco dental”, modificando su comportamiento clínico debido a la alteración en las fuerzas producidas (1, 6). Ryokawa et al. (1) realizaron un estudio en el 2006 cuyo objetivo fue evaluar las propiedades mecánicas de 8 polímeros termoplásticos en un ambiente intraoral, a saber: EVA (Bioplast), PE (Copyplast), PETG (Duran), PP (Hardcast), PC (Imprelon “S”), A+ (Essix A+), C+ (Essix C+) y PUR (Invisalign). Se evaluó la absorción de agua en un entorno intraoral simulado y el cambio de espesor con el proceso de termoformado, encontrando, que la absorción de agua aumentó con el tiempo. De mayor a menor los resultados fueron: PUR, PETG, A+, PC, EVA, PP, C+ y PE. Los cambios de espesor oscilaron entre el 74,9% y el 92,6%, en comparación con las muestras antes del

termoformado. Los resultados anteriores, son similares con los encontrados en el presente estudio, donde, independientemente de la relación de variables, el porcentaje de absorción de agua, presenta el mismo patrón de comportamiento que en el estudio anteriormente mencionado, hallando entonces que, de mayor a menor porcentaje de absorción de agua, se encuentran: Duran, Essix A+, Imprelon “S”, Bioplast, Hardcast, Essix C+ y Copyplast.

Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo, Copyplast es el material que tiene menor porcentaje de absorción de agua, lo que le permite mantener sus propiedades, es decir que presenta el menor porcentaje de variación de sus características biomecánicas durante cada etapa del tratamiento. Por el contrario, SmartTrack es el polímero que más alteraciones de sus características biomecánicas podría sufrir, debido a que tienen el mayor porcentaje de absorción de agua.

El termoformado es un proceso mediante el cual un material termoplástico es modificado empleando moldes y/o presión, lo cual genera cambios en el espesor y en algunas propiedades del mismo material, lo cual altera la efectividad de los movimientos planeados para el tratamiento. Por esta razón es importante utilizar materiales cuyas propiedades y espesores varíen lo menos posible durante dicho procedimiento. Se infiere entonces, que antes de realizar la simulación de los movimientos del tratamiento, el ortodoncista debe conocer y seleccionar el espesor inicial del material pero además, debe tener presente los cambios que éste va a presentar durante el termoformado, ya que la mecánica cambia completamente.

La disminución de espesor resultante del proceso de termoformado, varía según el polímero termoplástico utilizado. En éste estudio se observa que Copyplast, Essix A+ e Invisacryl A son los materiales que presentan mayor porcentaje de cambio de espesor, por el contrario, Hardcast presenta el menor porcentaje; se ha encontrado, además, que dichas variaciones no son uniformes, pero si son predecibles. Éstas se encuentran directamente relacionadas con la geometría de las superficies dentales, siendo cervical bucal y gingival las zonas de mayor cambio, es decir, de mayor adelgazamiento, lo que se traduce en reducción de la efectividad de los movimientos de torque de los incisivos (6, 39).

Figura 27 Modificaciones del espesor con el proceso de termoformado



Fuente: (39)

Krey et al. (39) realizaron un estudio en el 2019 en donde cuantificaron y localizaron los cambios dimensionales de algunos polímeros utilizados para la fabricación de alineadores, encontraron que Durasoft, fue el material que mayor porcentaje de adelgazamiento presentó en la zona de los incisivos, después del termoformado (51,9%) seguido de Erkodur (49,8%) y SmartTrack (42,2%). En contraste, el que menor porcentaje de cambio presentó fue Zendura con un 38,43%.

Lo anterior corrobora la importancia de seleccionar adecuadamente el material termoplástico utilizado para la fabricación de alineadores, de acuerdo a las necesidades biomecánicas de cada caso en particular. Si se tiene, por ejemplo, un caso con apiñamiento anterior moderado o severo, se debe considerar que en ésta zona la fuerza del alineador disminuye cuantiosamente, lo que conlleva a la alteración del movimiento planeado; éste problema biomecánico debe ser contrarrestado, seleccionando el polímero que presente menor porcentaje de cambio de espesor, es decir, se debe seleccionar un polímero más grueso o más rígido.

Barone et al. en el 2017 (6) analizaron el efecto que el proceso de formación y el uso normal del alineador, pueden tener en las propiedades mecánicas de los materiales. Se

midió el espesor real del alineador, encontrando que éste no es uniforme y puede variar mucho a lo largo de las superficies dentales, es decir, que el proceso de fabricación induce variaciones inesperadas de la geometría del alineador resultante. Los hallazgos obtenidos en el trabajo, sugieren que la magnitud de los efectos de las diferentes condiciones, sobre las propiedades mecánicas de los materiales termoplásticos, puede diferir entre los diferentes materiales (6); por lo tanto, los polímeros usados para la fabricación de aparatos de ortodoncia, deben seleccionarse después de una caracterización detallada de sus propiedades mecánicas.

El proceso de entrega de fuerza con el sistema de alineadores dentales, no es un mecanismo completamente comprendido. Varios estudios muestran que podría estar muy influenciado por el espesor del alineador (6). Jae – Sung et al. (12), concluyeron en su estudio, que después del termoformado, las cantidades de entrega de fuerza de los polímeros analizados disminuyó.

En el 2010 Sam Min et al. (40) realizaron un estudio en el cual se registró el espesor inicial y posterior al proceso de termoformado de Duran, Essix A+, Easy-Vac y Essix ACE, encontraron que todos los materiales disminuyeron en espesor después del proceso, con una reducción promedio del 42,4% de espesor, sin importar su espesor inicial, ya que la prueba fue realizada con espesores de 0,5 mm; 0,75 mm y 1,00 mm para cada material. Las diferencias en la reducción de espesor, pueden variar con el espesor del material inicial, que tiende a disminuir más con materiales más gruesos, y también pueden depender del modelo utilizado para la fabricación. En su estudio, Ryokawa et al. (1) informaron que después del termoformado, el espesor del material termoplástico se reduce de un 74,9% a un 92,6% del valor inicial.

Naohisa et al. en el 2013 (2) realizaron un estudio con tres materiales termoplásticos (Duran, Erkodur y Hardcast) de dos espesores diferentes para cada material, con el fin de evaluar el módulo elástico y la fuerza generada por cada uno, a una temperatura de 28°C, se encontró que aquellos materiales fabricados con mayor espesor (0,75 mm y 0,80 mm) ocasionaron fuerzas ortodónticas significativamente mayores a aquellos con menor espesor.

Se concluyó, que las fuerzas liberadas por los materiales ortodónticos dependen, entre otras cosas, del espesor del material. Teniendo en cuenta los resultados de este estudio, Hardcast presenta los menores cambios de espesor y un módulo de elasticidad menor a 500 Mpa y Bioplas es el material con el menor módulo elástico al cambiar su espesor, es decir, es el material menos rígido de los analizados.

Hahn W. et al. en 2009 (35) realizaron un estudio cuyo objetivo fue cuantificar las fuerzas generadas por alineadores fabricados con dos materiales (Erkodur y Duran), de espesores diferentes durante la inclinación de un incisivo central superior. Para cada material se fabricaron 5 alineadores; encontraron que la fuerza generada por polímeros de mayor espesor, fue significativamente mayor que la de aquellos con menor. Lo anterior no se puede evaluar en éste trabajo, ya que no se estudió la fuerza generada por los materiales, se recomienda realizar un estudio, en el cuál mediante laboratorio se analicen las propiedades mecánicas de éstos polímeros termoplásticos, las fuerzas generadas al realizar movimientos dentales y cómo pueden ser modificadas, según diferentes variables, como la densidad ósea del paciente, la cantidad de activación de los alineadores, morfología dental, entre otras. Se sugiere sea realizado, no solo en un ambiente extraoral, sino también intraoral, ya que el comportamiento de los materiales es diferente.

Otro aspecto de gran importancia a la hora de seleccionar el polímero, es el “desajuste” programado entre la placa y los dientes. Como se ha mencionado en este documento, esta variable, junto con el tipo de material y el espesor del mismo, son las tres variables determinantes del nivel de fuerza ejercida por el alineador. Estudios han demostrado que las cargas terapéuticas aplicadas a los dientes, por los alineadores pueden exceder sustancialmente los valores recomendados. Elkholy F et al. (41) en 2017 cuantificaron las fuerzas generadas por alineadores de Tereftalato de Glicol de Polietileno (PET-G), que se termoformaron a partir de láminas de 0,3 mm; 0,4 mm; 0,5 mm; 0,62 mm y 0,75 mm de espesor. Se programaron movimientos de 0,25 mm por placa, para la desrotación de un incisivo central superior. Se encontró una relación directa entre el espesor y la fuerza ejercida. A mayor calibre, más rigidez. Por lo tanto, los valores de rigidez más altos se observaron para los alineadores de 0,75 mm con valores de hasta 9,95 N.mm por grado para

rotación mesial y 13,88 Nmm por grado para rotación distal. Por el contrario, los materiales de menor espesor (0,3 mm y 0,4 mm) tuvieron reducción de la rigidez necesaria para controlar el movimiento rotacional de un 76% y 45% respectivamente; se midieron además, momentos de 73,5 N.mm y 89,1 N.mm con el polímero de 0,5 mm. Lo anterior, puede ser una explicación del hallazgo de la reabsorción apical radicular en algunos estudios clínicos sobre terapias con alineadores (42). Se recomienda la realización de estudios futuros, que cuantifiquen las fuerzas generadas por los materiales termoplásticos comercialmente más usados, variando la cantidad de movimiento planeado durante la simulación y además teniendo en cuenta las variaciones del espesor de los mismos, antes y después del termoformado.

10 CONCLUSIONES

- Los polímeros termoplásticos comercialmente disponibles para fabricar alineadores dentales presentan gran variabilidad en su comportamiento mecánico. Estas características no son reveladas por las casas comerciales que las proveen, lo cual dificulta la elección de los mismos a la hora de planear el tratamiento.
- Dado que el comportamiento mecánico de los polímeros termoplásticos es determinante en el desempeño clínico de los mismos, es imperativo que los ortodoncistas reconozcan las diferencias que existen entre las opciones disponibles en el mercado, permitiendo potenciar las ventajas de cada uno dependiendo de las necesidades biomecánicas específicas.

11 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios para verificar el comportamiento mecánico de los diferentes polímeros termoformados reportados en las fichas técnicas de dichos materiales.
- Sugerir protocolos clínicos que utilicen diferentes polímeros termoplásticos de acuerdo a las necesidades de cada etapa del tratamiento, conforme al diagnóstico y la biomecánica que se requiera. Se conseguirán tratamientos más efectivos e individualizados.
- Es importante tener en cuenta que el costo y la disponibilidad en el mercado de los materiales deben ser considerados dentro de los criterios de selección. Actualmente, estos dos aspectos son objeto de estudio en nuestro grupo de investigación.
- Se recomienda realizar un estudio en el cual se evalúen las propiedades biomecánicas de los polímeros después del termoformado y en un entorno húmedo, simulando la cavidad oral, debido a los cambios que se dan en las propiedades de los materiales con las dos variables mencionadas.

12 BIBLIOGRAFÍA

1. Ryokawa H, Miyazaki Y, Fujishima A, Miyazaki T, Maki K. The Mechanical Properties of Dental Thermoplastic Materials in a Simulated Intraoral Environment. *Orthod Waves*. 2006;65(2):64-72.
2. Kohda N, Lijima M, Muguruma T, Brantley W, al. e. Effects of Mechanical Properties of Thermoplastic Materials on the initial force of Thermoplastic Appliances. *Angle Orthod*. 2013;83(3):476-483.
3. Alexandropoulos A, Al Jabbari Y, Zinelis S, Eliades T. Chemical and Mechanical Characteristics of Contemporary Thermoplastic Orthodontic Materials. *Aust Orthod J*. 2015;31(2):165-170.
4. Liu C, Sun W, Liao W, Lu W, Li Q, Jeong Y, et al. Colour Stabilities of three types of Orthodontic clear Aligners Exposed to Staining Agents. *Int J Oral Sci*. 2016;8(4):246-253.
5. Lombardo L, Martines E, Mazzanti V, Arreghini A, Mollica F, Sicilian G. Stress Relaxation Properties of four Orthodontic aligner Materials: A 24-hour in vitro study. *Angle Orthod*. 2017;87(1):11-18.
6. Barone S, Paoli A, Neri P, Razionale A. Mechanical and Geometrical Properties Assessment of Thermoplastic Materials for Biomedical. Application. In: Eynard B, Nigrelli V, Oliveri S, Peris-Fajarnes G, Rizzuti Se, editors. *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering.*: Springer.; 2017. p. 437-446.
7. Kravitz N, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A Prospective Clinical Study Evaluating the Efficacy of tooth Movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2009;135(1):27-35.

8. Zhang N, Bai Y, Ding X, Zhang Y. Preparation and Characterization of Thermoplastic Materials for Invisible Orthodontics. *Dent Mater J*. 2011;30(6):954-959.
9. Fang D, Zhang N, Chen H, Bai Y. Dynamic stress Relaxation of Orthodontic Thermoplastic Materials in a Simulated Oral environment. *Dent Mater J*. 2013;32(6):946-951.
10. Ryu J, Kwon J, Jiang H, Cha J, Kim K. Effects of Thermoforming on the Physical and Mechanical Properties of Thermoplastic Materials for Transparent Orthodontic Aligners. *Korean J Orthod*. 2018;48(5):316-325.
11. Paul D, Newman S. *Polymer Blends*. New York: Academic Press.; 1978.
12. Kwon J, Lee Y, Lim B, Lim Y. Force delivery Properties of Thermoplastic Orthodontic Materials. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2008;133(2):228-234.
13. Gómez J, Peña F. Initial force Systems during bodily Tooth Movement with Plastic aligners and Composite Attachments: A three-dimensional Finite Element Analysis. *Angle Orthodontist*. 2015;85(3):454-460.
14. Sombuntham N, Songwattana S, Atthakorn P, Jungudomiaroen S, Panyarachun B. Early tooth Movement with a clear Plastic appliance in Rats. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2009;136(1):75-82.
15. Wong B. Invisalign A to Z. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2002;121(5):540-541.
16. Bollen A, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and Material Stiffness of Sequential Removable Orthodontic Appliances. Part 1: Ability to Complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2003;124(5):496-501.
17. Wasserman I, Barberá A, Conte F, Zajia E. Férula de Retención o Placa Essix® como Alternativa en Ortodoncia: revisión sistemática. *Revista Salud Bosque*. 2015;4(1):37-50.

18. Buschang P, Shaw S, Ross M, Crosby D, Campbell P. Comparative time Efficiency of Aligner Therapy and Conventional Edgewise Braces. *Angle Orthod.* 2014;84(3):391-396.
19. Weir T. Clear Aligners in Orthodontic Treatment. *Aust Dent J.* 2017;62(S1):58-62.
20. Barreda G, Dzierewianko E, Muñoz K, Piccoli G. Surface wear of Resin Composites used for Invisalign® Attachments. *Acta Odontol Latinoam.* 2017;30(2):90-95.
21. Martorelli M, Gerbino S, Giudice M, Ausiello P. A Comparison between Customized clear and Removable Orthodontic appliances Manufactured using RP and CNC Techniques. *Dent Mater.* 2013;29(e1-e10).
22. Morales R, Candal M. Diseño y Fabricación de un Molde de Termoformado utilizando herramientas CAD/CAE. *Rev Fac Ingenieria.* 2006;21(1):83-99.
23. Ma Y, Fang D, Zhang N, Ding X, Zhang K, Bai Y. Mechanical Properties of Orthodontic Thermoplastics PETG/ PC2858 after Blending. *Chin J Dent Res.* 2016;19(1):43-48.
24. Boyd R, Vlaskalic V. Three-dimensional Diagnosis and Orthodontic Treatment of Complex Malocclusions with the Invisalign Appliance. *Semin Orthod.* 2001;7:274-293.
25. Miller K, McGorray S, Womack R, al. e. A Comparison of treatment Impacts between Invisalign Aligner and fixed Appliance Therapy during the first week of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2007;131:302e1-302.e9.
26. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi C. Efficacy of clear aligners in Controlling Orthodontic tooth Movement: a Systematic Review. *Angle Orthod.* 2015;85(5):881-889.
27. Chisari J, McGorray S, Nair M, Wheeler T. Variables affecting Orthodontic tooth Movement with clear Aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014;145(4):S82-S91.

28. Uribe G. Capitulo 21. Principios de Física que se Aplican al Movimiento Dental en Ortodoncia. In: Fundamentos de Odontología. Ortodoncia.; 2010. p. 339-386.
29. Nanda R. Biomecánica y Estética. Estrategia en Ortodoncia Clínica capitulo 1. In: Amolca. E, editor. Principios Biomecánicos.
30. Kravitz N, Kusnoto B, Agran B, Viana G. Influence of Attachments and Interproximal Reduction on the Accuracy of Canine Rotation with Invisalign. A Prospective Clinical study. Angle Orthod. 2008;78(4):682-687.
31. Lombardo L, Arreghini A, Ramina F, Huanca Ghislanzoni L, Siciliani G. Predictability of Orthodontic Movement with Orthodontic Aligners: a Retrospective Study. Prog Orthod. 2017;18(1):35.
32. Grünheid T, Loh C, Larson B. How accurate is Invisalign in Nonextraction cases? Are predicted tooth Positions Achieved? Angle Orthod. 2017;87(6):809-815.
33. Posada B. La Degradación de los Plásticos. Rev. Univ. EAFIT. 1994;30(94):67-86.
34. Pascual A, Beeman C, Hicks E, Bush H, Mitchell R. The Essential Work of Fracture of Thermoplastic Orthodontic Retainer Materials. Angle Orthod. 2010;80(3):554-561.
35. Hahn W, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Zapf A, Kubein-Meesenburg D, et al. Influence of Thermoplastic appliance thickness on the Magnitude of force delivered to a Maxillary Central incisor during Tipping. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;136(1):12e1-7.
36. Ren C, Li X, Wang Z, Wang H, Bai Y. Measurement of Orthodontic forces Exerted on the upper right Central Incisor with the Increase of the distance of Tooth Movement and Thickness of the Aligner. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2014;49(3):177-179.
37. Norton R. Machine Design An Integrated Approach. Upper Saddle River. 4 ed. ed: Prentice Hall.; 2010.

38. Martina S, Rongo R, Bucci R, Razionale A, Valletta R, D'Anto` V. In Vitro Cytotoxicity of different Thermoplastic Materials for clear Aligners. *Angle Orthod.* 2019.
39. Krey K, Behyar M, Hartmann M, Corteville F, Ratzmann A. Behaviour of Monolayer and Multilayer foils in the Aligner Thermoforming Process. *J Aligner Orthod.* 2019;3(2):139-145.
40. Min S, Hwang C, Yu H, Lee S, Cha J, al. e. The effect of Thickness and Deflection of Orthodontic Thermoplastic Materials on its Mechanical Properties. *Korean J Orthod.* 2010;40(1):16-26.
41. Elkholy F, Schmidt F, Jäger R, Lapatki B. Forces and Moments applied during Derotation of a Maxillary Central Incisor with thinner Aligners: An In-vitro Study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2017;151(2):407-415.
42. Barbagallo L, Jones A, Petocz P, Darendeliler M. Physical Properties of root Cementum: Part 10. Comparison of the Effects of invisible Removable Thermoplastic Appliances with light and Heavy Orthodontic forces on Premolar Cementum. A Microcomputed-tomography Study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;133(2):218-227.