

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LÁMINAS POLIMÉRICAS USADAS EN LA FABRICACIÓN DE ALINEADORES DENTALES

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER SHEETS USED IN THE MANUFACTURE OF DENTAL ALIGNERS

Álvarez Vargas César Augusto ¹, Orozco Ocampo Yenny Marcela ¹, Gómez Arango Juan Pablo ², Velandia Escalante Jhon Sebastián ³, De La Rosa Marrugo Eola Judith ⁴, Montoya González Estefanía ⁴

¹Grupo de Investigación en Diseño Mecánico y Desarrollo Industrial, Departamento de Mecánica y Producción, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.

²Grupo de Investigación en Salud Oral INSAO, Departamento de Salud Oral, Facultad de Salud, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.

³Estudiante del Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.

⁴Estudiante de la Especialización en Ortodoncia y Ortopedia Dentofacial, Facultad de Salud, Universidad Autónoma de Manizales, Manizales, Colombia.

^{1,2,3,4} dekinov@autonoma.edu.co

Resumen. En este trabajo se describe una metodología, usando mapas de Ashby, para la selección del polímero termoplástico con el cual debe ser termoformado un alineador dental para tratamiento de ortodoncia. Se seleccionaron trece marcas comerciales de polímero biomédico y de acuerdo a criterios jerarquizados de propiedades mecánicas-geométricas se realizaron gráficas de comparación. Las propiedades seleccionadas fueron la traslucidez, la capacidad de absorción de agua, el módulo elástico, el cambio de espesor durante el proceso de termoformado y el espesor original comercial del polímero. Los mapas fueron declarados por ortodoncistas como una herramienta fundamental para la selección del polímero dado que estas propiedades influyen de manera directa en el diseño del alineador.

Palabras Clave: polímero termoplástico, alineador dental, termoformado, mapa de Ashby

Abstract. In this paper, a methodology using Ashby plots is presented to select a thermoplastic polymer to manufacture by thermoforming a dental aligner for orthodontics treatment. Thirteen biomedical commercial polymers were selected and according to hierarchical criteria of mechanical-geometric properties the comparison plots were done. The selected properties were translucency, water absorption, elastic modulus, thickness change during thermoforming and original thickness of commercial polymer. According with orthodontists, the Ashby plots were stated as a fundamental support for the selection of the polymer since these properties directly influence the design of the aligner.

Key Words: thermoplastic polymer, dental aligner, thermoforming, Ashby plot

Resumo. Neste trabalho, é descrita uma metodologia, utilizando os mapas de Ashby, para a seleção do polímero termoplástico com o qual deve ser termoformado um alinhador dental para o tratamento ortodôntico. Foram selecionados treze marcas comerciais de polímeros biomédicos e segundo os critérios de hierárquica das propriedades mecânicas-geométricas foram feitos os gráficos de comparação. As propriedades selecionadas foram translucidez, a capacidade de absorção de água, o módulo de elasticidade, a alteração de espessura durante o processo de termoformagem e a espessura original comercial do polímero. Os mapas foram declarados pelos ortodontistas como suporte fundamental para a seleção do polímero, uma vez que essas propriedades influenciam diretamente no design do alinhador.

Palavras-chave: polímero termoplástico, alinhador dentário, termoformagem, mapa de Ashby

INTRODUCCIÓN

Los alineadores dentales son dispositivos removibles usados de manera secuencial en los pacientes con fines de corrección de problemas de maloclusión (falta de alineación entre los dientes superiores e inferiores) y de malposición dentaria. La corrección de estos problemas es objeto fundamental de estudio de la ortodoncia. El uso de los alineadores permite planificar la secuencia del movimiento dental inducido para corrección desde una posición inicial hasta una posición final deseada mediante uso de tecnología CAD/CAM¹.

A diferencia del tratamiento de ortodoncia con aparatología fija, la cual usa alambres y soportes dentales comúnmente llamados “brackets” por su denominación anglosajona, y en la cual la fuerza necesaria para llevar un diente a una posición preestablecida se realiza tensionando directamente el alambre; el movimiento dental generado por los alineadores se produce por una falta de ajuste intencionada y predeterminada entre el alineador y el diente en cada etapa del tratamiento; lo cual obliga al material de fabricación del alineador a responsabilizarse de la directa aplicación de la fuerza necesaria para el desplazamiento dentario; de esta manera, el alineador que corresponde a la nueva posición, se coloca en el arco dental, produciendo en cada desajuste un sistema de fuerzas aplicadas directamente sobre el diente, generando una cadena de eventos mecánico-biológicos, que dan como resultado la posición final deseada (Gómez et al., 2015).

Las ventajas del uso de alineadores se dan principalmente: por comodidad, dada la libre remoción del sistema por parte del paciente, generando facilidad de higiene y previniendo el riesgo de promoción de caries, gingivitis y enfermedad periodontal; y siendo la estética otro aspecto a favor para este tratamiento. Sobre este último criterio Ziuchkovsko et al., 2008 y Rosvall et al., 2009 muestran que el uso de alineadores dentales es estéticamente satisfactorio para un 90% de población adulta encuestada, mientras que el uso de ortodoncia con aparatología fija es sólo

¹ CAD/CAM son las iniciales de “Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing.

aceptable para un 55% de la población adulta encuestada. No obstante, los alineadores presentan desventajas importantes respecto a la ortodoncia fija como el incremento de costos de tratamiento, que no resulta trascendental de acuerdo a Rosvall et al., 2009, y su limitación en la aplicación completa de la fuerza para lograr el movimiento dental requerido debido a que esta debe ser asumida exclusivamente por el material (Kravitz et al., 2009). Barone et al., 2017 identificaron algunos problemas inherentes a la aplicación de la fuerza tales como: baja resistencia mecánica, baja contracción, baja resistencia al desgaste e inestabilidad dimensional y, adicionalmente Alexandropoulos et al., 2015 encontraron que el proceso de termoformado en la fabricación del alineador influye significativamente en el comportamiento mecánico del polímero.

Por otra parte, el contacto con un medio húmedo como el bucal obliga al polímero a absorber agua mediante hidrólisis lo que conlleva a una degradación importante del material causando efectos de reducción de la fuerza dental por relajación de esfuerzos y o fluencia lenta (“creep” en inglés) (Fang et al., 2013; Lombardo et al., 2017). El módulo de Young del material también es una propiedad importante debido a que es un indicador de la rigidez del polímero, lo cual junto con el espesor del polímero resultan influyentes en la facilidad del proceso de termoformación del alineador (Ryu et al., 2019).

Para un tratamiento ortodóntico con alineadores, es necesario hacer una selección criteriosa de propiedades mecánicas y geométricas que garanticen la efectividad y éxito del tratamiento y que contrarresten resultados indeseados, no obstante aún no se comprende de manera formal la fenomenología del cambio de propiedades mecánicas y geométricas en la fabricación del alineador para un tratamiento específico, aumentándose la problemática con la variabilidad de valores de propiedades mecánicas y geométricas propuestas por las casas fabricantes de polímeros adecuados para tratamientos clínicos. Así mismo no hay claridad metodológica en la manera como el odontólogo responsable de un tratamiento pueda seleccionar un polímero de trabajo de acuerdo a los requerimientos del tratamiento. Este trabajo apunta a emplear una metodología común en la ingeniería de materiales para ilustrar los requerimientos de selección del polímero clínico para un tratamiento específico, en el cual se genera una guía usando diagramas de Ashby con fin de comparar propiedades mecánicas y geométricas relevantes en el proceso de diseño de un alineador dental.

MARCO TEÓRICO

Proceso de fabricación de un alineador dental

El proceso de fabricación de alineadores dentales consta de cuatro pasos principales que son descritos a continuación.

Impresión digital

Usando un escáner intraoral, se realiza una impresión digital 3D del aparato dental del paciente, la cual es registrada por visualización computacional. No obstante, algunas prácticas tradicionales hacen un escaneo digital sobre un modelo impreso en yeso del aparato dental del paciente.

Planeación del tratamiento ortodóntico

Usando análisis CAD de la impresión digital, el ortodoncista decide los movimientos necesarios para corregir las posturas dentales. Este proceso incluye la determinación del tiempo estimado de tratamiento, así como del número de secuencias necesarias para lograr la corrección de posición de las piezas dentales.

Impresión 3D

Luego de tener el número de secuencias necesarias para llevar a cabo el tratamiento planeado, se deben imprimir en 3D todos los modelos secuenciales desde la posición inicial a corregir hasta la posición final. La tecnología más usada en odontología para la impresión del modelo es la fotopolimerización en recipiente, en la cual una resina líquida (fotopolímero) que se encuentra en un recipiente estándar se solidifica por capas bajo la acción de luz ultravioleta (UV). Inicialmente se solidifica la parte inferior del modelo y posteriormente, la plataforma de elevación se desplaza hacia debajo de tal manera que se vayan creando nuevas capas sólidas sobre las anteriores. Un espejo con movilidad angular refleja el haz de luz UV en el punto del plano XY deseado. Una vez el modelo se completa, la plataforma elevadora sube. La representación esquemática del proceso se muestra en la Fig. 1.

Termoformado

El último paso del proceso de fabricación del alineador consiste en el termoformado. En este proceso, una lámina de polímero transparente clínico es llevada a la temperatura de trabajo, definida como aquella temperatura bajo la cual el polímero puede ser transformado sin perder sus propiedades fundamentales (mecánicas, físicas, químicas), para ser deformada permanentemente empleando calor y utilizando presión con fin de construir el alineador dental sobre el modelo de impresión 3D. El proceso de termoformación se ilustra en la Fig. 2.

Descripción del material, propiedades mecánicas y aspectos geométricos relevantes de aplicación en el diseño de alineadores dentales

Los polímeros empleados en el diseño de alineadores dentales pertenecen al grupo de los polímeros termoplásticos que se caracterizan por componerse de largas cadenas moleculares no cruzadas y desordenadas que permiten la deformación plástica por flujo viscoso cuando la temperatura aumenta.

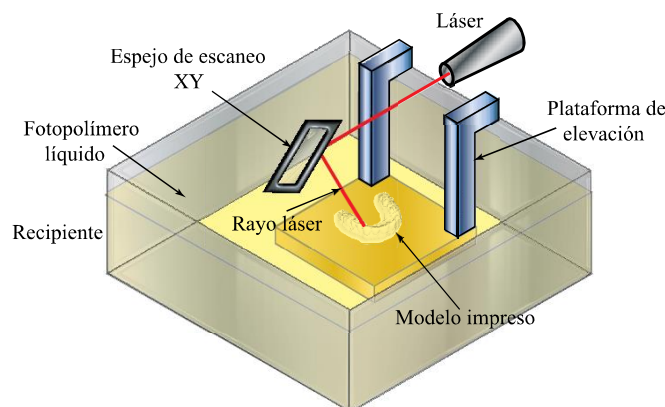


Figura 1. Esquema del proceso de impresión por fotopolimerización en recipiente.

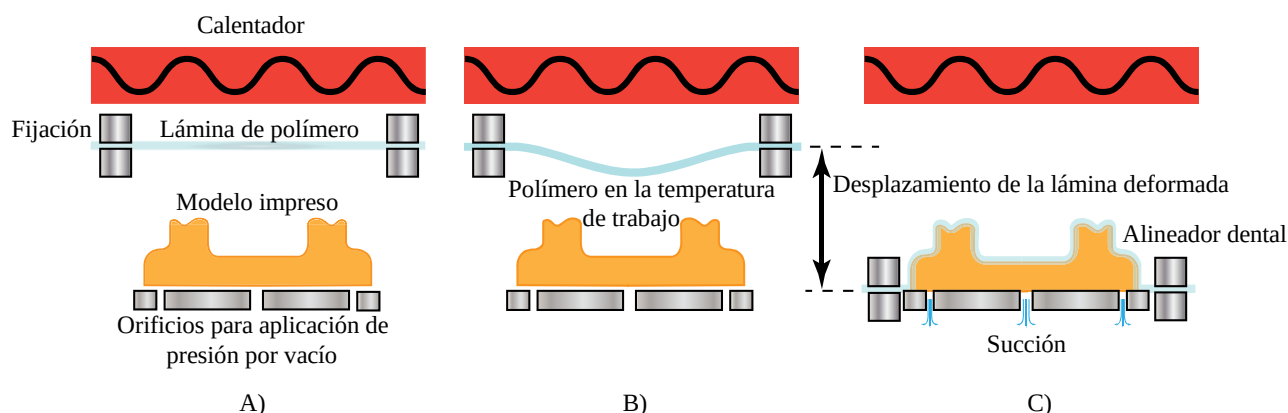


Figura 2. Esquema del proceso de termoformación: A) Fijación de la lámina de polímero y posicionamiento del modelo impreso. B) Calentamiento para llevar el polímero a la temperatura de trabajo. C) Desplazamiento de la lámina deformada y formación del alineador sobre el modelo por presión de vacío.

Entre los polímeros termoplásticos usados en el diseño de alineadores se encuentran el polipropileno PP (poly (propene)), el policarbonato PC (carbonic acid; 4-[2-(4-hydroxyphenyl)propan-2-yl] phenol), el diisocianato de difenilmetano MDI (1,1'-Methylenebis (4-isocyanatobenzene)) y el teraftalato de polietileno glicol PETG que es una copolimerización con glicol del teraftalato de polietileno PET (Poly (ethyl benzene-1,4-dicarboxylate))². Las cadenas básicas de estos polímeros se ilustraron en la Fig. 3.

² Los nombres entre paréntesis son los nombres oficiales del polímero establecidos por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada IUPAC (por su sigla en inglés: International Union of Pure and Applied Chemistry).

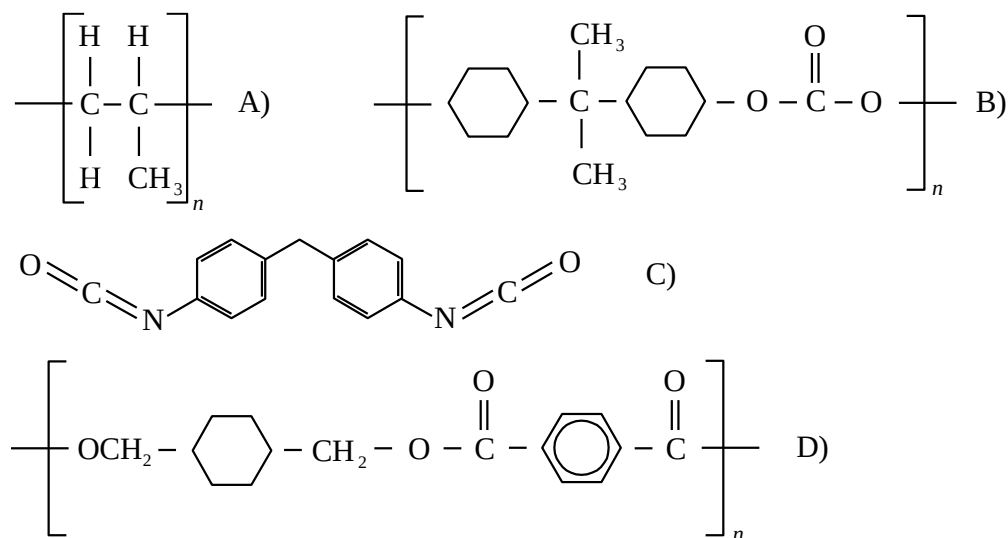


Figura 3. Estructuras de polímeros termoplásticos usuales en la fabricación de alineadores dentales: A) Polipropileno, B) Policarbonato, C) Diisocianato de difenilmetano, D) Teraftalato de polietileno glicol.

A continuación, se especifican algunas propiedades mecánicas relevantes de los polímeros termoplásticos usados en la fabricación de alineadores y se referencian aspectos geométricos relevantes que resultan cruciales, de acuerdo a la revisión literaria, para el buen desempeño ortodóntico del alineador.

Capacidad de absorción de agua

Los polímeros termoplásticos poseen alto potencial de absorción de humedad del medio circundante y el agua reacciona químicamente con la cadena principal del polímero en un proceso conocido como hidrólisis. La absorción de agua causa degradación irreversible de las propiedades mecánicas del polímero y alteración de la geometría. En cuanto a este punto Zhang et al., 2011 muestran que los cambios higroscópicos producidos por la humedad en la cavidad bucal afectan significativamente el ajuste entre el alineador y el diente causando una baja efectividad del tratamiento ortodóntico.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, conocido como módulo de Young en materiales con comportamiento elástico lineal, es un indicador de la rigidez de un material en su comportamiento elástico. Cuando se aplica una fuerza sobre un material, esta produce un cambio en la geometría del mismo, llamado deformación. El material se comporta de manera elástica si al cesar la aplicación de la fuerza recupera sus dimensiones originales. El módulo de elasticidad muestra que entre dos materiales específicos que se deforman bajo una misma carga, será más rígido el que se deforme menos y por este motivo se considera como un indicador de la rigidez del material. Kohda et al., 2013 demostraron que para tres materiales comerciales distintos el módulo de elasticidad del material

afecta significativamente la fuerza ortodóntica necesaria para llevar el diente a una posición determinada y es una propiedad mecánica susceptible de variación en el proceso de termoformado.

Traslucidez

Es una característica esencial en la estética del alineador, puesto que es un criterio esencial en el uso de este tipo de elementos ortodónticos: Ziuchkovski et al. (2008) y Rosvall et al. (2009). No obstante, los materiales termoplásticos traslucidos presentan módulos de elasticidad y capacidad de absorción de agua más altos que los materiales termoplásticos opacos, lo que implica que los materiales de aplicación ortodóntica deben ser seleccionados de acuerdo a una detallada caracterización de sus propiedades mecánicas: Ryokawa et al. (2006). Los polímeros termoplásticos cuyas estructuras se muestran en la Fig. 3 son transparentes, excepto el polipropileno y por razón de translucidez y estética se prefieren sobre otros termoplásticos usados en ortodoncia, pero opacos como el acetato de vinilo y el polietileno.

Espesor y cambio de espesor del polímero base

Hahn et al. (2009) y Kohda et al. (2013) muestran que el espesor original del polímero y su cambio de espesor medio durante el proceso de termoformado intervienen directamente en la fuerza ortodóntica suministrada por el alineador y que las fuerzas de ortodoncia aumentan a medida que el espesor aumenta y el cambio de espesor en termoformado es mínimo. No obstante un problema inherente es la geometría del modelo dental para el termoformado pues el cambio de espesor es diferente en geometrías redondeadas como en los molares y en geometrías planas como en los incisivos. Así mismo, las fuerzas ortodónticas varían según el tipo de diente y el movimiento correctivo de posición.

METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Como lo mencionan Ryokawa et al. (2006), el gran éxito del tratamiento ortodóntico con alineadores dentales depende de un criterioso proceso de selección de acuerdo a una correcta caracterización de propiedades mecánicas y características geométricas del material termoplástico base. La metodología de operación se basa en tres aspectos:

- Revisión literaria para la descripción de la información.
- Comparación de propiedades usando mapas de Ashby.
- Establecimiento de criterios de selección del alineador de acuerdo a los parámetros explicados en el parágrafo 3.

Registro de información

Se recopilaron valores de la capacidad de absorción de agua medida en porcentaje en peso (%wt), el módulo elástico medido en megapascuales (MPa), la translucidez especificada como opaca o transparente, el espesor medido en milímetros (mm) y el cambio de espesor en el proceso de

termoformado medido en milímetros (mm) para trece polímeros comerciales usados en la fabricación de alineadores plásticos. La información pertinente es mostrada en la Tabla 1.

Comparación de propiedades

Para comparar las propiedades mecánicas y las características geométricas se usaron mapas de Ashby, los cuales son diagramas donde dos propiedades mecánicas, físicas, etc., son comparadas en función de diferentes materiales. De esta manera se facilita el proceso de selección de un material específico de acuerdo a una propiedad determinada. En este trabajo se comparan cuatro propiedades de once materiales teniendo $13C4 = 715$ combinaciones distintas de materiales, de acuerdo a la Tabla 1, donde C es la operación combinatoria. Para realizar los mapas de Ashby se generó un código en MATLAB®. 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, no obstante se trabaja en su inclusión asumiendo su transparencia u opacidad como criterios binarios 1/0. Los mapas de Ashby del Espesor vs. Módulo elástico, Cambio de espesor vs. Módulo elástico, Capacidad de absorción de agua vs. Módulo elástico y Capacidad de absorción de agua vs. Cambio de espesor son mostrados en las Figs. 4 a 7.

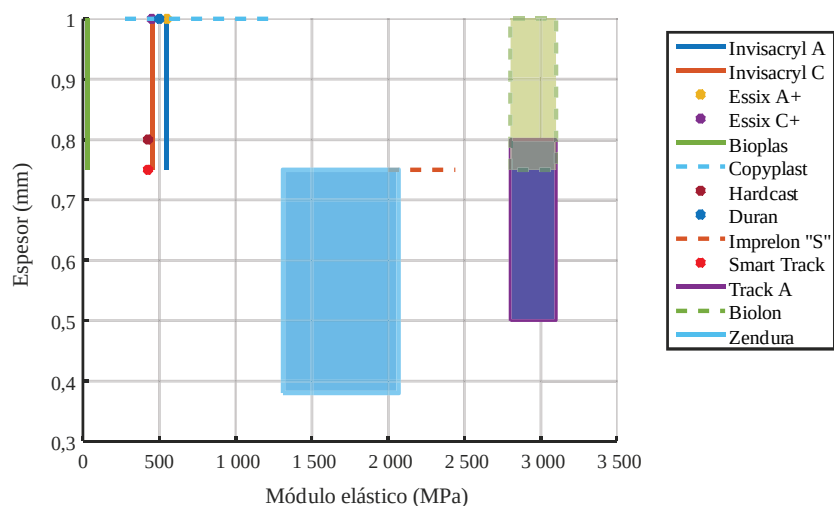


Figura 4. Mapa de Ashby para la comparación entre el espesor y el módulo elástico.

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

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.

De la Fig. 4 se establece que los mayores espesores son pertenecientes al Copyplast, Essix A+, Essix C+ y Duran, no obstante, estos materiales tienen módulo elástico bajo. Así mismo se puede verificar que tanto el Biolon como el Track A poseen módulos elásticos altos y el Biolon también posee un rango superior alto en el espesor. El Zendura tiene un dominio intermedio en ambas propiedades.

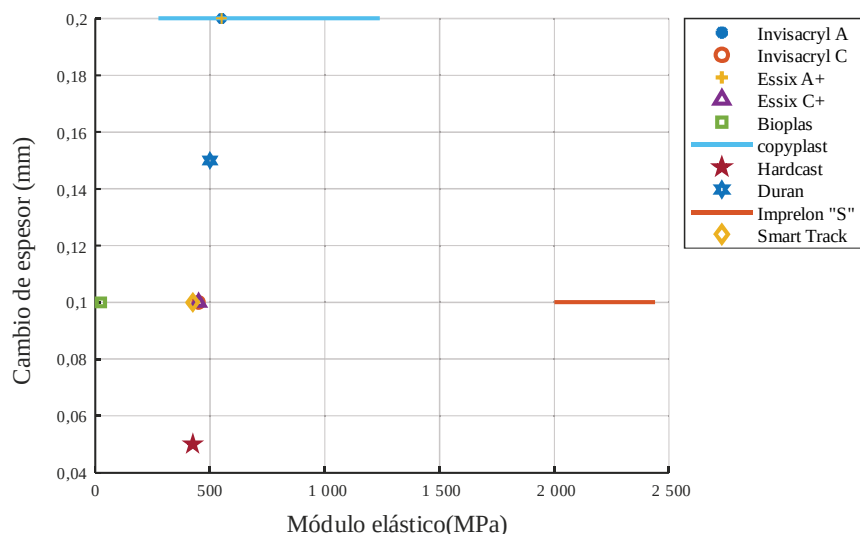


Figura 5. Mapa de Ashby para la comparación entre el cambio de espesor y el módulo elástico.

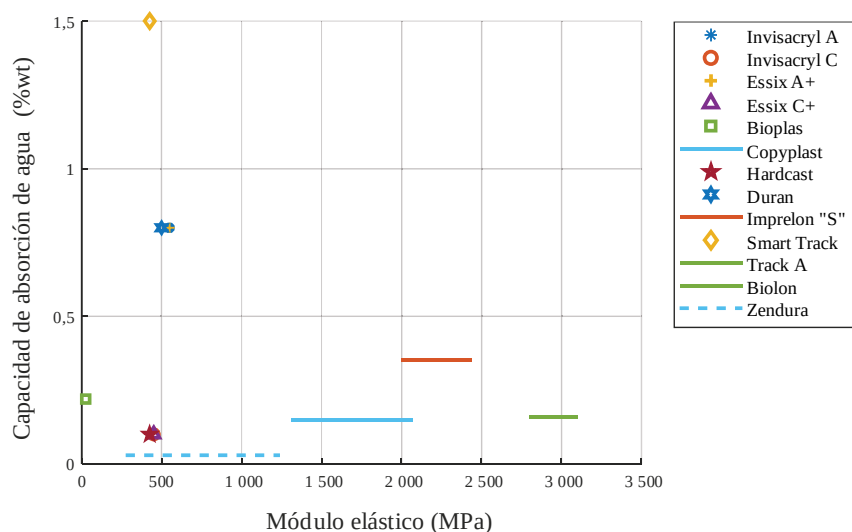


Figura 6. Mapa de Ashby para la comparación entre la capacidad de absorción de agua y el módulo elástico.

La Fig. 5 muestra que los mayores cambios de espesor los presenta el Copyplast, el Invisacryl A y el Essix A con módulos elásticos de bajo a moderados. Por otra parte, el Imprelon S tiene un módulo elástico elevado con cambios de espesor medio. El Hardcast presenta simultaneidad baja máxima en ambas propiedades. La Fig. 6 ilustra que el Smart Track es el material con mayor capacidad de absorción de agua con bajo módulo elástico, mientras que el Biolon y el Track A poseen igual rango de módulo elástico con baja capacidad de absorción de agua. El Zendura posee la menor capacidad de absorción de agua con rango de módulo elástico entre bajo y medio.

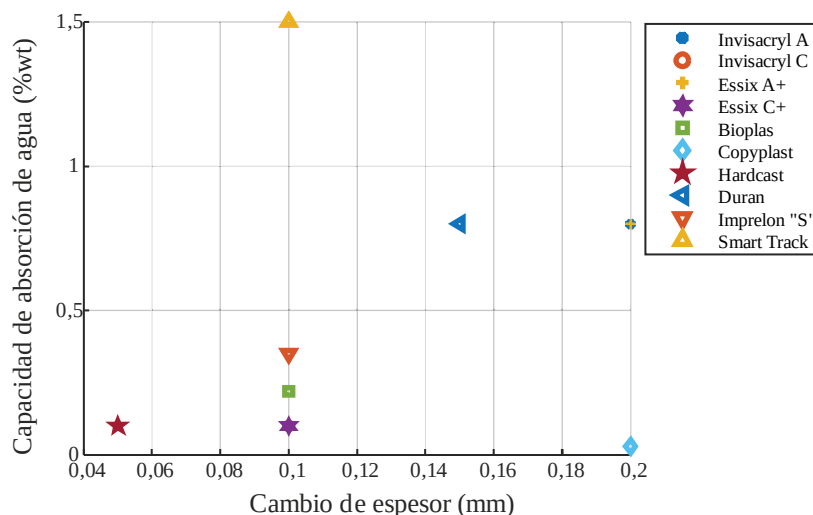


Figura 7. Mapa de Ashby para la comparación entre la capacidad de absorción de agua y el cambio de espesor.

La Fig. 7 muestra que los mayores cambios de espesor los presentan el Invisacrlyl A, el Essix A+ y el Copyplast, no obstante, los dos primeros tienen mayor capacidad de absorción de agua que el último. El Hardcast presenta baja capacidad de absorción de agua con bajo cambio de espesor en el proceso de termoformado.

CONCLUSIONES

Se usó la metodología de mapas de Ashby para comparar los materiales de fabricación como fase previa en un proceso de investigación actual sobre el efecto del termoformado en la respuesta mecánica de un alineador dental. Se seleccionaron trece materiales comerciales para polímeros termoplásticos biomédicos generalmente usados en la fabricación de alineadores. Se hizo la revisión literaria correspondiente sobre propiedades mecánicas-geométricas relevantes en el diseño y manufactura del alineador teniendo en cuenta que su criterio de selección es fundamental en el proceso ortodóntico del paciente. Se establecieron jerarquías para el proceso de selección. Es importante señalar que el criterio de selección para el diseño no es fijo, sino que depende de cada paciente en el momento de la examinación por parte del especialista. A continuación, se hace una reseña de superlativos máximo y mínimo de acuerdo al orden jerárquico siguiente: i) capacidad de absorción de agua, ii) módulo elástico, iii) cambio de espesor, iv) espesor. Los resultados en criterio de superlativos se establecen sólo para los materiales transparentes que ganan por estética a los opacos en cuanto a la preferencia del paciente. Los resultados son mostrados en la Tabla 2. Actualmente se trabaja en la inclusión de propiedades tales como dureza, temperatura de operación y temperatura de transición vítrea y el costo de polímero por unidad de masa. El proceso de visualización en mapas de Ashby facilita al ortodoncista la selección adecuada del material. Adicionalmente se está desarrollando una aplicación ("app") que permita declarar el material adecuado introduciendo los criterios de máximo o mínimo de tal manera que pueda ser utilizada en dispositivos celulares.

Tabla 2. Superlativos de comparación entre los materiales termoplásticos seleccionados para el estudio y escogidos por su transparencia.

Material	Capacidad de absorción de agua [wt%]	Módulo elástico [MPa]	Cambio de espesor [mm]	Espesor [mm]
Invisacryl A			Máximo	Máximo
Essix A+			Máximo	
Duran				
Imprelon S				
Smart Track	Máximo		Mínimo	
Zendura	Mínimo	Mínimo		Mínimo
Track A		Máximo		
Biolon		Máximo		Máximo

REFERENCIAS

- [1] Alexandropoulos A.; Al Jabbari Y.; Zinelis S.; Eliades T. (2015) *Chemical and mechanical characteristics of contemporary thermoplastic orthodontic materials*, Australian Orthodontic Journal, vol. 31, no. 2, pp. 165 – 170.
- [2] Barone S.; Paoli A.; Neri P.; Razonale A.; Gianesse M. (2017) *Mechanical and Geometrical Properties Assessment of Thermoplastic Materials for Biomedical Application*. In: Eynard B.; Nigrelli V.; Oliveri S.; Peris-Fajarnes G.; Rizzuti S. (eds) *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham.
- [3] Fang D.; Zhang N.; Chen H.; Bai Y. (2013) *Dynamic stress relaxation of orthodontic thermoplastic materials in a simulated oral environment*, Dental Materials Journal; 32(6): 946 – 951.
- [4] Gomez J.; Peña F., Martínez V., Giraldo D.; Cardona C. (2015) *Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis*, Angle Orthodontist, vol. 85, No 3, pp. 454 – 460.
- [5] Hahn W.; Dathe H.; Fialka-Fricke J.; Fricke-Zech S.; Zapf A.; Kubein-Meesenburg D.; Sadat-Khonsari R. (2009) *Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping*, J Orthod Dentofacial Orthop. Vol. 136, No. 1, pp 12.e1 – 12.e7.
- [6] Kohda N.; Ijima M.; Mugurama T.; Brantley W.; Ahluwalia K-; Mizoguchi I. (2013) *Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances*, Angle Orthodontist, vol. 83, No. 3, pp. 476 – 483.

Artículo No. 05. No. 11, Vol. VI, Año 6, 2019. Revista de divulgación y tecnología de la Red Internacional de Investigadores de Ingeniería Industrial <REDI4>

- [7] Kravitz N.; Kusnoto B.; BeGole E.; Obrez A.; Agran B. (2009) *How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign*, Am J. Orthod Dentofacial Orthop vol. 135, no. 1, pp. 27 – 35.
- [8] Lombardo L.; Martines E.; Mazzanti V.; Arreghini A.; Mollica F.; Siciliani G. (2017) *Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study*, Angle Orthodontist, vol. 87, No. 1, p.p. 11 – 18.
- [9] Rosvall D.; Campos H.; Ziuchkovski J.; Rosentiel F.; Johnston W. (2009) *Attractiveness, acceptability, and value of orthodontic appliances*, Am J. Orthod Dentofacial Orthop vol. 135, no. 3, pp. 276 – 277.
- [10] Ryokawa H.; Miyazaki Y.; Fujishima A.; Miyazaki T.; Maki K. (2006) *The mechanical properties in a simulated intraoral environment*, Orthodontic waves, vol. 65, pp. 64 – 72.
- [11] Ryu J.; Kwon J.; Jiang H.; Cha J.; y Kim K. (2018) *Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners*, The Korean Journal of Orthodontics, vol. 48, no. 5, pp. 316 – 325.
- [12] Zhang N.; Bai Y.; Ding X.; Zhang Y. (2011) *Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics*, Dent Mater J., vol. 30, no. 6, pp. 954 – 959.
- [13] Ziuchkovski J.; Fields H.; Johnston W.; Lindset D. (2008) *Assessment of perceived orthodontic appliance attractiveness*, Am J. Orthod Dentofacial Orthop vol. 133, no. 4, pp. 68 – 78.