Int. J. Odontostomat.,
19(4):460-469, 2025.

Comparación de las Propiedades Mecánicas de Interés Clínico de los Materiales Termoformados Comúnmente Utilizados en la Confección de Alineadores Transparentes en Ortodoncia: Una Revisión de la Literatura

Comparative Analysis of Clinically Relevant Mechanical Properties of Frequently used Thermoformed Materials for the Fabrication of Orthodontic Clear Aligners: A Literature Review

Nataly Fernanda Henriquez-Andrade[1] & Paulo Sandoval-Vidal[2]

HENRIQUEZ-ANDRADE, N. F. & SANDOVAL-VIDAL, P. Comparación de las propiedades mecánicas de interés clínico de los materiales termoformados comúnmente utilizados en la confección de alineadores transparentes en Ortodoncia. Revisión de la Literatura. *Int. J. Odontostomat., 19(4)*:460-469, 2025.

RESUMEN: Los alineadores transparentes son atractivos y solicitados por los pacientes, sin embargo no han alcanzado la total eficiencia del tratamiento de ortodoncia convencional. Tradicionalmente, para su confección se utilizan materiales poliméricos de termoformado entre los cuales se encuentran el tereftalato de polietilenglicol (PETG) y el poliuretano (PU). Las propiedades mecánicas de estos materiales permiten predecir su comportamiento y rendimiento durante el tratamiento ortodóncico, por lo cual conocer el límite elástico, módulo elástico y estrés a la relajación es de relevancia clínica. El objetivo de esta revisión es comparar las propiedades mecánicas límite elástico, módulo elástico y relajación de la tensión de los materiales termoformados más utilizados en ortodoncia. Se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos Pubmed, Scopus, Embase y WOS publicados entre los años 2019 y octubre del 2024, que aportaron información sobre las propiedades mecánicas de los materiales tereftalato de polietilenglicol y Poliuretano. Se seleecionaron10 artículos y fueron incluidos en la revisión de la literatura. La mayoría de los artículos tratan sobre el material tereftalato de polietilenglicol y son de tipo in vitro. La mayor parte de los estudios incluyen análisis del módulo de Young, seguido del límite elástico y en una minoría analiza la relajación a la tensión. La mayoría de los estudios revelan que existe una disminución de las propiedades mecánicas de estos materiales bajo condiciones de termoformado, humedad y uso; sin embargo existen investigaciones que informaron lo contrario. Podemos concluir que no es posible confirmar las ventajas de un material sobre otro en término de las propiedades mecánicas. Se encontró una diversidad de metodologías para medir las propiedades mecánicas que no permiten comprender el comportamiento de estos materiales. Se sugiere desarrollar un protocolo estandarizado.

PALABRAS CLAVE: Material inteligente, tereftalato de polietileno glicol, poliuretanos, límite elástico, módulo de elasticidad, relajación de tensiones, alineador transparente.

INTRODUCCIÓN

Los alineadores transparentes en ortodoncia presentan algunas ventajas si se comparan con el tratamiento convencional. Proveen mayor estética, facilita la higiene dental, puede llegar a ser un tratamiento más rápido y con menor emergencias (Golkhani *et al*., 2022; Siotou *et al*., 2025). Sin embargo, aunque son reconocidos para tratar maloclusiones leves a moderadas o como complemento de la terapia convencional, no alcanzan la total eficacia del tratamiento con arco niquel-titanio (Golkhani *et al*., 2022).

Comúnmente los alineadores se confeccionan de resinas poliméricas termoplásticas (Dalaie *et al*., 2021) cuya manufactura es de forma manual; y la geometría del arco y la planificación de los movimientos ortodóncicos se realiza a través del sistema CAD-CAM (Tamer *et al*., 2019). El diseño del alineador debe permitir aplicar fuerzas controladas sobre los dientes para generar los movimientos dentales deseados (Tamer *et al*., 2019). El material debe ser biocompatible, transparente y poseer características mecánicas que

[1] Estudiante Programa de Magíster en Odontología, Facultad de Odontología, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.
[2] Profesor Asociado, Departamento de Odontopediatría y Ortodoncia, Facultad de Odontología, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

Received: 2025-06-05 Accepted: 2025-08-20

favorezcan el rendimiento (Bichu *et al*., 2022; Yazdi *et al*., 2023; Zecca *et al*., 2023).

El proceso de termoformado y el ambiente intraoral al que se someten estos materiales podrían alterar las propiedades mecánicas debido a cambios en el grosor del material y la dureza. Aunque no se tiene claro la relevancia clínica de estos cambios, es una desventaja que podría afectar el resultado del tratamiento, constituyéndose en un desafío para el operador (Tamburrino *et al*., 2020; Pratto *et al*., 2021; Putrino *et al*., 2021; Tartaglia *et al*., 2021). Los materiales comúnmente mencionados en la literatura son el Poliuretano (PU) y el Tereftalato de polietilenglicol (PETG) (Tamburrino *et al*., 2020; Pratto *et al*., 2021; Putrino *et al*., 2021; Tartaglia *et al*., 2021; Vidal *et al*., 2024). El PU es un material de alta resistencia, buena transparencia, cuya estructura interna posee zonas duras y suaves; se considera más frágil que el PETG y más susceptible a la tinción por alimentos (Putrino *et al*., 2021.; Vidal *et al*., 2024) se describe que posee excelente propiedades mecánicas lo que le permite poseer memoria de forma (Bichu *et al*., 2022). El PETG es un copolimero de tereftalato de polietileno modificado con glicol, que posee estabilidad dimensional y menor higroscopia (Vidal *et al*., 2024); además de buena resistencia a los agentes solventes y al impacto, tiene buenas propiedades ópticas y es considerado con alta durabilidad (Bichu *et al*., 2022.; Tamburrino *et al*., 2020; Vidal *et al*., 2024).

Estos materiales presentarían una reducción de su grosor posterior al termoformado en un 12,3 % a 15 % (Staderini *et al*., 2024). La propiedades mecánicas de los polímeros proveen información sobre el comportamiento del material (Shirey *et al*., 2023) y en el caso de los alineadores transparentes permiten predecir su rendimiento, por lo tanto es necesario conocer el límite elástico, el módulo de Young y la relajación de la tensión. El límite elástico es la tensión máxima que soporta el material antes de su deformación plástica. El Módulo de Young permite medir la rigidez del material mediante la relación entre tensión y deformación dentro del límite elástico, es decir la capacidad de resistir la deformación. El grado de rigidez se relaciona con la cantidad de fuerzas necesarias para mover los dientes. Así, un material con baja rigidez podría resultar en movimientos dentales insuficientes a los esperados (Gold *et al*., 2021; Shirey *et al*., 2023). La relajación a la tensión expresa la pérdida de la fuerza en el tiempo que sufre el alineador debido al uso (Goracci *et al*., 2023; Zecca *et al*., 2023).

Se espera que un alineador de ortodoncia ideal presente suficiente rigidez, un alto límite elástico y mantenga la capacidad de aplicar fuerzas dentro de un rango elástico (Narongdej *et al*., 2024) lo que permitirá generar fuerzas ligeras y constantes sobre los dientes (Siotou *et al*., 2025). Identificar las propiedades mecánicas de los materiales disponibles para tratamientos con alineadores transparentes es de relevancia ya que permiten guiar al operador en términos de técnicas de manufactura y planificación de tratamientos. El objetivo de esta revisión de la literatura es comparar el límite elástico, el módulo elástico y la relajación de la tensión de los materiales poliuretano y tereftalato de polietilenglicol, según la evidencia actual.

MATERIAL Y MÉTODO

Estrategia de búsqueda: Se realizó una búsqueda bibliográfica en las bases de datos Pubmed, Scopus, Embase y WOS. Se utilizaron los siguientes términos: clear orthodontic aligner, clear aligner appliances, clear aligner therapy, mechanical properties, thermoplastic polymers, thermoformed aligner, 3D printed aligner. Se utilizaron los términos bolánaos: AND, OR. NOT.

Criterios de inclusión: Se seleccionaron artículos publicados entre los años 2019 hasta octubre del 2024. Se incluyeron todos los artículos en Idioma inglés y español que entreguen información sobre las propiedades mecánicas de los materiales de termoformado utilizados en alineadores de ortodoncia de tipo tereftalato de polietilenglicol y Poliuretano. Criterios de exclusión: Fueron excluidos los artículos que no aportaron información sobre las propiedades mecánicas de los materiales tereftalato de polietilenglicol y Poliuretano utilizados para alienadores de ortodoncia. Se excluyeron otras revisiones de la literatura.

Selección de los estudios: Los estudios fueron seleccionados por un operador a través de la lectura del título y resumen. Se eliminaron los artículos duplicados. Posteriormente, fueron analizados y seleccionados según criterios de inclusión y exclusión.

RESULTADOS

La búsqueda arrojó un total de 59 artículos, de los cuales 10 artículos fueron seleccionados e incluidos en la revisión de la literatura. Las etapas de selección se muestran en el flujograma de la Figura 1 y los artículos seleccionados están resumidos en la Tabla I.

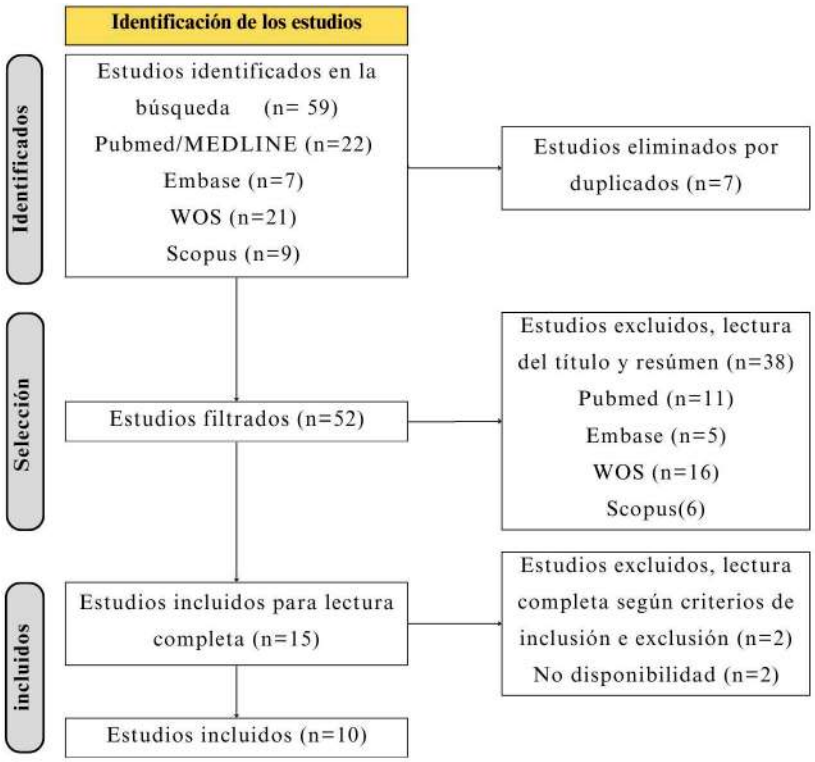

Figura 1. Flujograma.

Fig. 1. Flujograma de revisión.

La mayoría de los artículos tratan sobre el material PETG y son de tipo *in vitro*. De los artículos incluidos en esta revisión, dos analizaron las propiedades mecánicas del material PU y PETG en contraste. Cuatro artículos analizaron las propiedades mecánicas sólo del tereftalato de polietilenglicol. Dos investigaron las propiedades mecánicas del Poliuretano exclusivamente, un artículo que analizó el PETG con materiales con polipropileno en su composición y un artículo comparó materiales con PU en su composición y material PETG con material de impresión directa. Seis artículos son de tipo experimental *in vitro*, tres *in vivo* y un artículo es de tipo experimental (Figs. 2 y 3).

Las propiedades analizadas en los artículos son (Tabla II): el módulo de Young, límite elástico, dureza, resistencia máxima a la tracción, punto de fluencia y temperatura de transición vítrea. La mayor parte de los estudios incluyen análisis del módulo de Young, le sigue el límite elástico y en una minoría analiza la relajación a la tensión (Fig. 4). Los resultados de la mayoría de los estudios arrojan que existe una disminución de las propiedades mecánicas de estos materiales bajo condiciones de termoformado, humedad y uso; sin embargo existen investigaciones que informan lo contrario Tabla III.

En los estudios *in vitro*, estas propiedades son comparadas en los materiales en su estado pre termoformado y termoformado; y se analizaron bajo condiciones intraorales simulado que incluye termociclado y humedad. En los estudios *in vivo*, las propiedades son analizadas en ciclos de tiempo de uso en 0 h, 7 h y 14 h. Los valores del módulo de Young, del límite elástico y de la relajación al estrés para los materiales PETG y PU reportadas por los distintos autores se resumen en la tabla IV. Cada artículo reporta valores acorde a las distintas metodologías utilizadas.

DISCUSIÓN

La búsqueda realizada arrojó en su mayoría estudios de tipo *in vitro* y el material mayormente estudiado fue el PETG. Dentro de las propiedades mecánicas que se consideraron en esta revisión, el módulo de Young fue considerado en todos los estudios y el límite elástico también fue ampliamente estudiado. La propiedad mecánica menos estudiada fue la relajación a la tensión. Probablemente, la diferencia en la frecuencia de estudios que consideran las distintas propiedades se deban al tipo de diseño de estudio, en el caso de relajación a la tensión es necesario estudios *in vivo* que permitan observar el comportamiento del material durante su funcionamiento como alineador; no así el módulo de elasticidad que es comúnmente medible en pruebas experimentales de laboratorio. Algunos estudios utilizaron el módulo elástico, módulo de indentación y módulo flexural para referirse al módulo de Young. También utilizaron el tensile yield stress, yield strength e índice elástico para referirse al límite elástico; y algunos midieron el índice de relajación para referirse a la relajación a la tensión.

Tabla I. Resumen de artículos seleccionados.

AUTORES	TIPO DE ESTUDIO	RESUMEN Y CONCLUSIÓN
Ihssen *et al.* 2019	*In Vitro*	Investigación de las propiedades elásticas de láminas de alineadores de tereftalato de polietileno glicol (PETG) bajo cambios extremos de temperatura simulados por termociclado, temperatura ambiental y absorción de agua. Las temperaturas extremas alternantes junto con la temperatura intraoral y la absorción de agua pueden reducir el módulo de Young del material. Estos cambios podrían promover una disminución de las fuerzas de ortodoncia resultantes.
Tamburrino *et al.* 2020	*In Vitro*	Evaluar el efecto del termoformado (T), el almacenamiento en saliva artificial (SAS) y su combinación en las propiedades mecánicas de los los materiales Duran (PETG) ®, Biolon (PET) ® y Zendura (PU) ®. El impacto de las condiciones de procesamiento sobre las propiedades mecánicas puede variar según el polímero específico. El termoformado reduce en un 30 % el límite elástico de Zendura (PU) y aumenta el límite elástico de Durán (PETG). Comparado con el estado de fabrica, la inmersión en saliva disminuye ligeramente el límite elástico de Durán (PETG) y disminuye significativamente para Zendura (PU). El módulo elástico disminuye después del termoformado, comparado con el estado de fabrica, disminuye notablemente para Durán (PETG) y ligeramente para Zendura (PU).
Dalaie *et al.* 2021	*In Vitro*	Evaluaron las propiedades termomecánicas después del termoformado y el envejecimiento simulado en Duran (PETG) ® y Erkudur (PETG)® bajo condiciones de termoformado (T), envejecimiento simulado (TA) y control (C). En ambos materiales, el módulo de flexión disminuyó significativamente después del termoformado, 88 % en Duran y 70 % en Erkodur, pero no cambió significativamente después del envejecimiento. Después del termoformado, la dureza disminuyó significativamente en ambos materiales (22 % en Duran y 7,6 % en Erkodur). La Tg dinámica fue significativamente menor después del termoformado (T) y envejecimiento simulado (TA) en ambos materiales. A todas las temperaturas (25, 37, 55 °C) en Duran, la diferencia del módulo elástico solo fue significativa entre C y TA, pero en Erkodur, disminuyó significativamente en T y no hubo cambios significativos después del envejecimiento. El módulo viscoso y el factor de pérdida mostraron los mismos patrones de cambio a todas las temperaturas. En ambos materiales, aumentaron después del termoformado, pero no cambiaron significativamente después del envejecimiento. Duran presentó una mayor estabilidad termomecánica que Erkodur.
Pratto *et al.* 2022	*Experimental*	Identificar la influencia del procesamiento térmico en las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de alineadores transparentes ACE 035 Essix (PETG: PP), C + Essix (PP), Crystal 0.75 (PETG) y Crystal 1.0 (PETG). La tensión de fluencia y el módulo de Young presentaron valores superiores para los alineadores que contenían 100 % de tereftalato de polietileno glicol.
Shirey *et al.* 2023	*In Vitro*	Se examinaron las propiedades mecánicas de los alineadores termoformados EX30 (PU), LD30 (PU/PP) y los alineadores de impresión directa en condiciones de laboratorio y en un entorno bucal simulado. El módulo elástico de las muestras secas y húmedas fue 103,2 ± 17,3 MPa y 114,4 ± 17,9 MPa (EX30), 61,3 ± 9,18 MPa y 103,5 ± 11,4 MPa (LD30), La resistencia máxima a la tracción de las muestras secas y húmedas fue de 64,41 ± 7,25 MPa y 61,43 ± 7,41 MPa (EX30), 40,04 ± 5,00 MPa y 30,09 ± 1,50 MPa (LD30), La tensión residual de las muestras húmedas con una deformación del 2 % durante 2 horas fue 59,99 ± 3,02 % (EX30), 52,57 ± 12,28 % (LD30). Se observó una diferencia significativa en el módulo elástico, la resistencia máxima a la tracción y la relajación de la tensión entre las muestras analizadas.
Lira *et al.* 2023	*In Vivo*	El objetivo fue evaluar los cambios químicos, físicos, mecánicos y morfológicos en los alineadores poliméricos después de la exposición al entorno bucal. Se dividieron veinticuatro alineadores de ortodoncia Invisalign en dos grupos: un grupo envejecido *in vivo* en el que los pacientes utilizaron alineadores hasta 14 días y el grupo de referencia, sin exposición al entorno oral. Las propiedades mecánicas del polímero mostraron una disminución estadísticamente significativa en su módulo elástico y dureza luego del uso.

Bhate & Nagesh, 2024	*In Vitro*	El objetivo fue comparar la rugosidad de la superficie y el módulo de flexión de los materiales Zendura (PU) y Duran (PET-G) después de los procesos de termoformado y envejecimiento simulado. Se formaron dos grupos de 12 muestras cada uno: el grupo 1 fue de Duran (PET-G) y el grupo 2 de Zendura-poliuretano (PU). El proceso de termoformado y envejecimiento redujo la resistencia a la flexión en ambos materiales.
Siotou *et al.* 2025	*In Vivo*	Se evaluó las propiedades mecánicas de los alineadores de ortodoncia Clear Aligner (PETG) después del uso intraoral durante 7, 10 y 14 días comparados con los alineadores sin uso (0 días). El módulo de Young fue significativamente menor desde el día 0 de uso (911,66 ± 139,90 MPa) hasta el día 14 (746,41 ± 145,41 MPa, p = 0,038). Hubo diferencia significativa entre los segmentos. La tensión de fluencia mostró una reducción significativa durante el uso clínico desde el día 0 de uso (33,05 ± 3,76 MPa) hasta el día 7 (28,90 ± 6,07 MPa, p = 0,0018), sin diferencia significativa entre los segmentos. La evaluación de la dureza de las muestras mostró una disminución en la dureza promedio entre el día 0 y el día 14 de uso, que no resultó estadísticamente significativa. Los segmentos posteriores demostraron una reducción estadísticamente significativa en la dureza desde el día 0 de uso (64,06 ± 1,91 Shore D) hasta el día 7 (61,38 ± 1,70 Shore D, p < 0,01). El tiempo de uso genera cambios importantes en las propiedades mecánicas del alineador, siendo mayormente afectado el sector posterior.
Sayahpour *et al.* 2024	*In Vivo*	El objetivo de este estudio fue examinar el impacto del envejecimiento intraoral en las propiedades mecánicas de los alineadores de impresión directa (DPA) en comparación con los alineadores termoformados DUR (PETG) e INV (PU). El grupo DUR mostró propiedades mecánicas más favorables en comparación con DP e INV.
Staderini *et al.* 2024	*In Vitro*	El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos del termoformado en las propiedades mecánicas, ópticas, químicas y morfológicas de sesenta muestras de PET-G. El estudio comparó el espesor, el peso, la absorbancia, la estructura química, la rugosidad superficial, el módulo elástico, la resistencia a la fluencia y la carga de rotura de treinta muestras termoformadas con treinta muestras no termoformadas. No se observaron cambios significativos en la funcionalidad de los alineadores después del termoformado, ya que no se encontraron cambios mecánicos significativos.

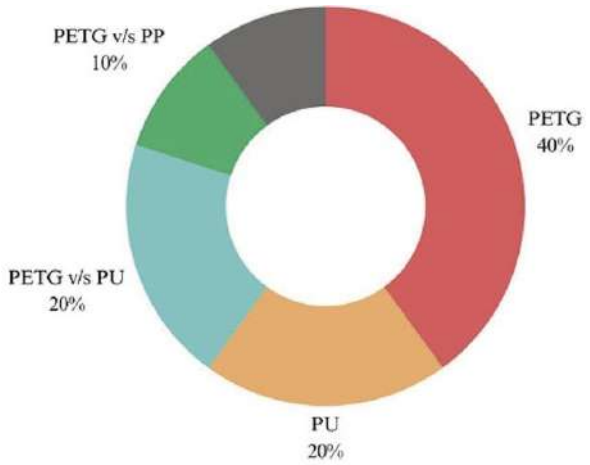

Fig. 2. Distribución de los artículos según materiales analizados. PP: polipropileno; PETG: tereftalato de polietilenglicol; PU:POLIUTERANO, 3D:resina de impresión directa.

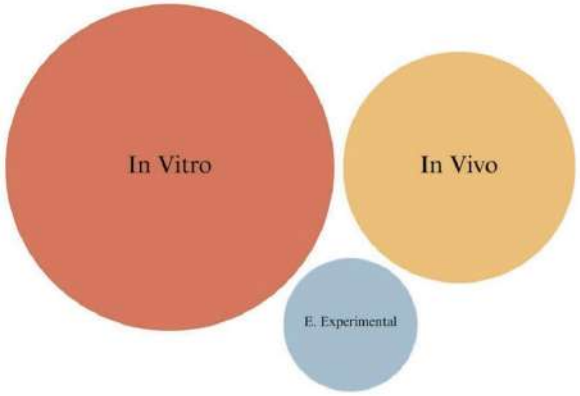

Fig. 3. Frecuencia de estudios según diseño.

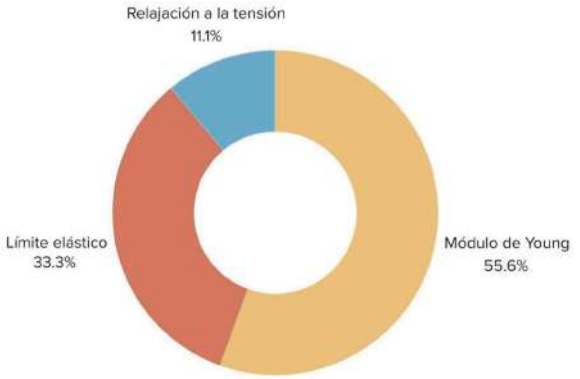

Fig.4. Proporción de estudios que analizan el módulo de Young, limite elástico y relajación a la tensión.

Tabla II. Analisis descriptivos de la planimetría, propiedades mecánicas y métodos de medición.

AUTOR	PLANIMETRÍA	TAMAÑO MUESTRA	PROPIEDAD MECÁNICA MEDIDA	MÉTODO DE MEDICIÒN
Ihssen *et al.*, 2019.	Norma ISO 20753:2014-07, espécimen modificado (Type A2) de 0,5 mm.	60	Modulo de Young, fuerza de rendimiento (yield strength), resistencia máxima a la tracción.	Prueba de tracción en máquina universal. Sensor de fuerza 2kN, velocidad de deformación 5 mm por s. Cámara de temperatura controlada.
Tamburrino *et al.*, 2020.	Norma EN ISO 527-2 Tipo 5B. Grosor 0,75 mm o 1 mm.	6 por material	Módulo de Young y tensile yield stress (Estrés de Fluencia por Tensión).	Prueba de tracción en máquina universal Instron 5500R.
Dalaie *et al.*, 2021.	Segmentos de 4x20 mm con forma similar a cara vestibular de incisivos central superior. Duran de 1 mm y ERkodur de 0,8 mm.	96	Módulo flexural, dureza, módulo elástico, módulo viscoso, temperatura de transición vítrea.	Máquina DMTA con aumento de temperatura de 5 ºC/min a partir de la temperatura de transición vítrea de cada material. Fuerza dinámica de 2 N, fuerza estática de 0,01 N con frecuencia de 1 Hz y rango de 0,1 %.
Pratto *et al.*, 2022.	Norma ASTM D638 Tipo V. Crystal 0,75 mm y 1 mm (PETG), ACE 035 (PETG/PP), C+ (PP).	160 (20 en cada grupo).	Módulo de Young y Yield Strength (tensión de fluencia).	Espectrometría infrarroja para medir los cambios en la estructura química. Análisis por calorimetría de escaneo para evaluar las propiedades térmicas. Pruebas de tensión por medio de texturómetro Stable Micro System.
Shirey *et al.*, 2023.	Segmentos de 2,5x20,0 mm desde mesial del canino a medial primer molar por vestibular.	6 muestras para medir M. de Yung, 6 muestras para medicar UTS y 3 para medir relajación al estrés.	Módulo elástico, resistencia máxima a la tracción, relajación al estrés.	Análisis mecánico dinámico por medio de RSA3 (RSA3 Dynamic Mechanical Analyzer) y sistema de testeo Universal Instron.
Lira *et al.*, 2023.	Segmentos de 4x4 mm de la superficie bucal correspondiente al diente 1,1	24 alineadores Invisalign.	Módulo elástico, Dureza.	Test de nanoindentación. Mediciones se realizaron con un calibrador de área de punta de diamante Berkovich. La dureza y el módulo elástico con el método de Oliver- Pharr.
Bhate & Nagesh, 2024.	Segmentos de 40x9 mm. PETG de 0,75 mm. PU de 0,75 mm.	24 (12 muestras de PETG, 12 muestras de PU).	Módulo flexural.	Test de flexión por medio de máquina de testeo universal Instron E- 3000.
Siotou *et al.*, 2025.	Norma ISO 6892- 1:2019. Alineadores de 0,75 mm grosor	96	Mòdulo elástico, resistencia máxima a la tracción, Yield stress (Tensión de fluencia).	Mediciones según ISO 14577-2016. testeo a través de máquina Sauter TVO 500N500S. Carga de 500 N y velocidad de desplazamiento de 15 mm/min. La dureza se midió con un Durómetro Tipo D de Instromacrode a ASTM D2240.
Sayahpour *et al.*, 2024.	Superficie bucal del primer molar mandibular.	60 (30 alineadores usados, 30 no usados).	Dureza de Martens, módulo de indentación, índice elástico, índice de relación.	Máquina universal de medición de dureza, curva de profundidad de fuerza de indentación con carga máxima de 4,9 N por 2 s y pulsos de indentación tetragonal con profundidad constante de 50 *um* por 120 s. Cálculo de la disminución de la fuerza al inicio y al final del periodo de indentación constante según una fórmula.
Staderini *et al.*, 2024.	Norma ISO 577-2 Tipo 5B.	60 (2 grupos de 30 especímenes).	Resistencia a la fluencia o Yield strength, Carga de ruptura, módulo elástico.	Pruebas de tensión a través de máquina Univert acorde con EN ISO 527-1:2019.

Tabla III. Distribución de artículos según hallazgos comunes en aumento o disminución de las propiedades mecánicas en los materiales de termoformado PU y PETG.

Aumento de las propiedades mecánicas	Disminución de las propiedades mecánicas	Sin cambio significativos en las propiedades mecánicas
Tamburrino *et al.,* 2020*	Tamburrino *et al.,* 2020***	Stardarini *et al.,* 2024
Sayahpour *et al.*, 2024	Dalai *et al.,* 2021	
Shirey *et al.,* 2023**	Lira *et al.,* 2023	
	Shirey *et al.,* 2023****	
	Bhate & Nagesh, 2024	
	Siotou *et al.,* 2024	

*En condición de termoformado. **Módulo elástico PU, ambiente oral simulado. ***En condiciones de humedad. ****Límite elástico y relajación al estrés en PU, ambiente oral simulado.

Tabla IV. Valores obtenidos en los distintos estudios del módulo de Young, Límite elástico y relajación al estrés para los materiales PETG y PU.

		Material tereftalato de polietilenglicol (PETG)	Material Poliuretano (PU)
Modulo de Young	Preformado	1531 MPa (Tamburrino *et al.*)	1478 MPa (Tamburrino *et al.*)
		2198,155 MPa a los 25 °C - 2180 MPa a los 37 °C – 2111,009 Mpa a los 55 ºC (Dalaie *et al.*)	
		1980 MPa (Pratto *et al.*) [a]	
		730 MPa (Staderini *et al.*) [a]	
	Termoformado	1693 MPa (Tamburrino *et al.*)	1730 MPa (Tamburrino *et al.*)
		2,753 MPa (Sayahpour *et al.*) [b]	1717,0 MPa (Sayahpour *et al.*) _
		2044.808 MPa a los 25 °C - 2015 Mpa a los 37 °C - 1921,949 MPa a los 55 ºC (Tamburrino *et al.*)	103,2 MPa (Shirey *et al.*)
		1940 Mpa (Pratto *et al.*) [a]	
		720 Mpa (Staderini *et al.*) [a]	
	Saliva artificial	1368 MPa (Tamburrino *et al.*, 2020)	1466 Mpa (Tamburrino *et al.*, 2020)
	Luego de 14 días de uso	746,41 MPa (Día cero = 911.66 Mpa) (Siotou *et al.*)	405,16 MPa (No uso = 640,75 MPa) (Lira *et al.*)
Límite elástico	Preformado	49,29 MPa (Tamburrino *et al.*)	62,37 MPa (Tamburrino *et al.*)
		48,7 MPa (Pratto *et al.*) [c]	
		51 MPa (Pratto *et al.*) [d]	
		41,3 MPa (Staderini *et al.*) [a]	
	Termoformado	53,52 MPa (Tamburrino *et al.*)	41,92 MPa (Tamburrino *et al.*)
		35,3% (Sayahpour *et al.*) [e]	19,13 % (Sayahpour *et al.*, 2024) _
		42,3 MPa (Staderini *et al.*) [a]	
	Saliva artificial	49,49 Mpa (Tamburrino *et al.*)	44,61 Mpa(Tamburrino *et al.*)
	Luego de 14 días de uso	19,94 MPa (día 0 = 33,05 MPa) (Siotou *et al.*).	
Relajación al estrés		17,92 % (Sayahpour *et al.*) [f]	29,73 % (Sayahpour *et al.*) _
			59,99 % (Shirey *et al.*) _

[a] Para láminas de 0,75 mm. [b] Representado en módulo de indentación. [c] Yield strength o tensión de fluencia (tensión mínima en que comienza la deformación plástica) en láminas de 1 mm. [d] Yield strength o tensión de fluencia (tensión mínima en que comienza la deformación plástica) en láminas de 0.75 mm.[e] Representado por el índice elástico. [f] Representado por el índice de indentación. [g] En condiciones de humedad.

Según la literatura, posterior al proceso de termoformado los materiales PETG y PU presentan disminución en su grosor y con ello podrían presentar cambios en sus propiedades mecánicas. Los resultados obtenidos por Ihssen *et al*. (2019) informaron que el módulo de Young fue similar para el material PETG y PU posterior al termoformado; y que para ambos materiales el módulo de Young disminuye en condiciones de ambiente intraoral, siendo más significativo en PETG. Los hallazgos de este autor concuerdan con los de Staderini *et al*. (2024) quien no encontró cambios significativos en el módulo elástico de PETG luego del proceso de termoformado. Este estudio utilizó la misma norma ISO usada por Tamburrino *et al*. (2020), pero la cantidad de muestras estudiadas podrían ser más representativas; por otra parte, Ihssen *et al*. (2019) demostró en su estudio *in vitro* la disminución del módulo de Young en PETG bajo condiciones de humedad y calor. Mientras que, Shirey *et al*. (2023) informa que el módulo de Young fue mayor para el PU y no se incrementó significativamente bajo condiciones de humedad, se debe considerar que este autor no incluye el material PETG dentro de los comparadores. Algunos autores obtuvieron resultados del módulo de Young considerando mediciones atípicas, Sayahpour *et al*. (2024) utilizó el módulo de indentación en su estudio *in vivo* obteniendo como resultado, que el módulo de Young para PETG es mayor en comparación a PU, pero considerado su metodología sus hallazgos podría no ser representativos ya que no considera el cuerpo del material en su totalidad. Pratto *et al*. (2022) consideró el módulo elástico efectivo en pruebas de flexión en PETG, sus resultados arrojaron una disminución del módulo elástico. Por otro lado Bhate & Nagesh, 2024 analizó el módulo de Young a través del módulo flexural, sus resultados sugirieron que el PU tendría una menor resistencia a la flexión, por lo tanto un módulo de Young menor que el PETG en condición pre termoformado y termoformado; y para ambos materiales el termociclado tendría un efecto significativo en reducir la resistencia a la flexión. Sin embargo, estos resultados podrían ser inconsistentes debido al tamaño de la muestra utilizada para cada prueba, además de poseer baja potencia estadística.

Los estudios *in vivo* más actuales demostraron los efectos del ambiente intraoral en el alineador, en donde tanto para PU como para PETG el módulo de Young disminuyó. Siotou *et al*. (2025) en su estudio *in vivo* para PETG observó que luego de 14 días de uso hubo una reducción del módulo Young significativamente, siendo más afectado el segmento posterior; resultados similares informó Lira *et al*. (2023) en su estudio *in vivo*, cuyos resultados demostraron que el Módulo de Young disminuyó significativamente en alineadores de PU luego de 14 días de uso.

En relación al Límite elástico, Tamburrino *et al*. (2020) informó que posterior al proceso de termoformado aumenta para PETG y disminuye para PU; y que el ambiente intraoral disminuye el límite elástico para ambos materiales. Sus resultados concuerdan con los hallazgos de Sayahpour *et al*. (2024) quien a través del índice elástico encontró un aumento del límite elástico en PETG. En un estudio *in vivo* realizado por Siotou *et al*. (2025) se observó una diferencia significativa en el límite elástico luego de 7 días de uso del alineador de PETG. De igual forma, Pratto *et al*. (2021) obtuvo resultado significativamente mayor en el yield strength de los alineadores de PETG luego del proceso de termoformado, lo cual representaría un mayor límite elástico. En contraste, otros autores no encontraron cambios significativos para PETG, los hallazgos de Staderini *et al*. (2024) informaron que el yield strength no arrojó diferencias significativas entre PETG termoformado y pre termoformado e Ihssen *et al*. (2019) no encontró diferencias significativas en condiciones de humedad y termociclado para el mismo material, aunque en este último los resultados parecieran informar que el aumento de la temperatura tiende a disminuir el límite elástico. Este estudio no informa si el material fue sometido a termoformado, lo cual podría afectar la validez de los resultados.

Según los hallazgos de Sayahpour *et al*. (2024) el PU mantendría fuerzas constantes por más tiempo durante el uso; estos resultados concuerdan con los presentados por Shirey *et al*. (2023) aunque ambos estudios no son comparables en el tipo de material de comparación, diseño y número de muestras estudiadas. Concordamos con los autores Shirey *et al*. (2023) y Staderini *et al*. (2024) en que existe variabilidad en los resultados debido a las distintas metodologías utilizadas por los autores por la falta de estandarización o protocolos de medición para el comportamiento mecánico de los materiales que se utilizan para la confección de los alineadores. Además, las distintas representaciones para la propiedades mecánicas utilizadas por algunos autores puede generar confusión en el operador clínico quien podría no estar familiarizado y generar errores de interpretación para entender el comportamiento de los materiales. Por lo tanto se acepta la hipótesis planteada en este estudio. Consideramos que la búsqueda

realizada podría presentar sesgo de selección ya que se estableció límite de tiempo e idioma, lo cual podría limitar la cantidad de artículos incluidos.

CONCLUSIÓN

Existe controversia sobre los cambios en el módulo de Young y Límite elástico de un material sobre otro posterior al termoformado. Para ambos materiales disminuiría el Módulo Young y el Límite elástico en ambiente intraoral. No es posible determinar un valor único en las variables estudiadas para ambos materiales.

El material PU tendría ventajas sobre el PETG en cuanto a la mantención de fuerzas bajas y continuas durante más tiempo. Con la evidencia encontrada no es posible confirmar las ventajas de un material sobre otro en términos de las propiedades mecánicas: módulo de Young, límite elástico y relajación a la tensión. Es necesario contar con un protocolo estandarizado que permita medir las propiedades mecánicas de los materiales que se utilizan para la confección de alineadores transparentes que conduzcan a una mejor comprensión del comportamiento de estos.

HENRIQUEZ-ANDRADE, N. F. & SANDOVAL-VIDAL, P. Comparative analysis of clinically relevant mechanical properties of frequently used thermoformed materials for the fabrication of orthodontic clear aligners: a literature review. *Int. J. Odontostomat., 19(4)*:460-469, 2025.

ABSTRACT: Clear aligners offer advantages that make them attractive to patients; however, they have not achieved the same efficacy as conventional orthodontic treatment. These aligners are traditionally fabricated using thermoformed polymeric materials, including polyethylene terephthalate glycol (PETG) and polyurethane (PU). Understanding the mechanical properties of these materials-specifically elastic limit, elastic modulus, and stress relaxation is clinically relevant for predicting their behavior and performance during orthodontic treatment. To compare the mechanical properties (elastic limit, elastic modulus, and stress relaxation) of the most commonly used thermoformed materials in orthodontics according to current literature. A comprehensive literature search was conducted in PubMed, Scopus, Embase, and Web of Science databases for articles published between 2019 and October 2024 that reported mechanical properties of PETG and PU materials used in orthodontic applications. Ten articles were selected for inclusion in this literature review. Most studies focused on PETG material and employed *in vitro* methodologies. Young's modulus was the most frequently analyzed parameter, followed by elastic limit (yield strength), while stress relaxation was evaluated in fewer studies. The majority of investigations demonstrated decreased mechanical properties under thermoforming, humidity, and clinical usage conditions; however, some studies reported contradictory findings. Based on current evidence, it is not possible to establish the superiority of one material over another regarding mechanical properties. The diversity of methodologies used for measuring mechanical properties limits comprehensive understanding of these materials' behavior. Development of standardized testing protocols is recommended for future research.

KEY WORDS: Smart material, polyethylene terephthalate glycol, polyurethanes, elastic limit, yield strength, elastic modulus, stress relaxation, clear aligner appliance.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bhate, M. & Nagesh, S. Assessment of the effect of thermoforming process and simulated aging on the mechanical properties of clear aligner material. *Cureus, 16(7)*:64933, 2024.

Bichu, Y.M.; Alwafi, A.; Liu, X.; Andrews, J.; Ludwig, B.; Bichu, A.Y. & Zou, B. Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioact. Mater., 22*:384-403, 2022.

Dalaie, K.; Fatemi, S. M. & Ghaffari, S. Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. *Prog. Orthod., 22(1)*:15, 2021.

Gold, B. P.; Siva, S.; Duraisamy, S.; Idaayath, A. & Kannan, R. Properties of orthodontic clear aligner materials: a review. *J. Evol. Med. Dent. Sci.,10(37)*:3288-94, 2021.

Golkhani, B.; Weber, A.; Keilig, L.; Reimann, S. & Bourauel, C. Variation of the modulus of elasticity of aligner foil sheet materials due to thermoforming. *J. Orofac. Orthop., 83(4)*:233-43, 2022.

Goracci, C.; Juloski, J.; D'Amico, C.; Balestra, D.; Volpe, A. & Vichi, A. Clinically relevant properties of 3D printable materials for intraoral use in orthodontics: a critical review of the literature. *Materials (Basel), 16(6)*:2166, 2023.

Ihssen, B.A.; Willmann, J.H.; Nimer, A. & Drescher, D. Effect of *in vitro* aging by water immersion and thermocycling on the mechanical properties of PETG aligner material. *J. Orofac. Orthop., 80(6)*:292-303, 2019.

Lira, L.F.; Vargas, E.O.A.; Da Silva, E.M.; Maia, J.N.S.M.D.; Elzubair, A.; De Morais, L.S.; Camargo Jr., A.D.S.; Serra, G. & De Souza, M.M.G. Effect of oral exposure on chemical, physical, mechanical, and morphologic properties of clear orthodontic aligners. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 164(2)*:51-63, 2023.

Narongdej, P.; Hassanpour, M.; Alterman, N.; Rawlins-Buchanan, F. & Barjasteh, E. Advancements in clear aligner fabrication: a comprehensive review of direct 3D printing technologies. *Polymers (Basel), 16(3)*:371, 2024.

Pratto, I.; Busato, M.C.A. & Bittencourt, P.R.S. Thermal and mechanical characterization of thermoplastic orthodontic aligners discs after molding process. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater., 126*:104991, 2022.

Putrino, A.; Barbato, E. & Galluccio, G. Clear aligners: between evolution and efficiency-A scoping review. *Int. J. Environ. Res. Public Health, 18(6)*:2870, 2021.

Sayahpour, B.; Zinelis, S.; Polychronis, G.; Eliades, T.; Goteni, M.; Kopp, S. & Eslami, S. Effects of intraoral aging on mechanical properties of directly printed aligners vs. thermoformed aligners: an *in vivo* prospective investigation. *Eur. J. Orthod., 46(1)*:63, 2024.

Shirey, N.; Mendonca, G.; Groth, C. & Kim-Berman, H. Comparison of mechanical properties of three-dimensional printed and thermoformed orthodontic aligners. *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop., 163(5)*:720-8, 2023.

Siotou, K.; Chountalas, T.; Katsavrias, A.; Siotos, C.; Mpalias, K.; Semitekolos, D.; Charitidis, C. & Tsolakis, A. I. The mechanical properties of orthodontic aligners after intraoral use in different time periods. *Orthod. Craniofac. Res., 28(2)*:253-60,2025.

Staderini, E.; Chiusolo, G.; Guglielmi, F.; Papi, M.; Perini, G.; Tepedino, M. & Gallenzi, P. Effects of thermoforming on the mechanical, optical, chemical, and morphological properties of PET-G: *in vitro* study. *Polymers, 16(2)*:203, 2024.

Tamburrino, F.; D'Antò, V.; Bucci, R.; Alessandri-Bonetti, G.; Barone, S. & Razionale, A.V. Mechanical properties of thermoplastic polymers for aligner manufacturing: *in vitro* study. *Dent. J., 8(2)*:47, 2020.

Tamer, I.; Oztas, E. & Mars¸an, G. Orthodontic treatment with clear aligners and the scientific reality behind their marketing: a literature review. *Turk. J. Orthod., 32(4)*:241-6, 2019.

Tartaglia, G.M.; Mapelli, A.; Maspero, C.; Santaniello, T.; Serafin, M.; Farronato, M. & Caprioglio, A. Direct 3D printing of clear orthodontic aligners: current state and future possibilities. *Materials (Basel), 14(7)*:1799, 2021.

Vidal, E.M.; Carvajal, M.T. & d'Oliveira, N.G. Cytotoxic damage evaluation of dental aligners: A systematic review. *Ortod. Esp., 62(1)*:71-3, 2024.

Yazdi, M.; Daryanavard, H.; Ashtiani, A.H.; Moradinejad, M. & Rakhshan, V. A systematic review of biocompatibility and safety of orthodontic clear aligners and transparent vacuum-formed thermoplastic retainers. *Dent. Res. J., 20*:41, 2023.

Zecca, P.A.; Bocchieri, S.; Borgese, M.; Dolci, C.; Campobasso, A.; Battista, G.; Caprioglio, A. & Raspanti, M. *In vitro* investigation of the mechanical properties of blended 3D-printing resins for orthodontic aligners. A Comparison between Commercial Resin and Nickel-Titanium Wire. *Appl. Sci., 13(15)*:9020, 2023.

Dirección para correspondencia:
Paulo Sandoval Vidal
Departamento de Odontopediatría y Ortodoncia
Facultad de Odontología
Universidad de La Frontera
Temuco
CHILE

E-mail: paulo.sandoval@ufrontera.cl
ortodonciadrsandoval.temuco@gmail.com