

Análisis tribológico de polímeros de uso comercial

Valentina López Contreras y Stefany Sandrith Peñaranda Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Francisco José Saldivia Saldivia

M.Sc Gerencia en Mantenimiento

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

PhD. Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi hermana, por ser mi motor de vida; a mis papás, por ser mi base sólida y siempre brindarme su apoyo; a mis abuelos, por su amor y constante respaldo; a mi mejor amiga, por darme fortaleza y por su compañía incondicional; a mi pareja, por impulsarme a seguir adelante y confiar en mis capacidades; y a mis amigos y demás familia, cuyo cariño y apoyo han sido esenciales para llegar hasta aquí.

Stefany Sandrith Peñaranda Gómez

Dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud a mi mamá y mi abuela, mujeres fuertes y admirables que me han guiado con su sabiduría, paciencia y apoyo incondicional. Su amor y enseñanzas han sido el motor que me impulsa a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes. También quiero dedicarlo a mi querido gato, cuya compañía silenciosa, pero reconfortante, ha sido un refugio en mis largas jornadas de estudio y trabajo. A ellos, que han estado conmigo en cada paso de este camino, les agradezco infinitamente por ser mi inspiración y mi fortaleza.

Valentina López Contreras

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de formarnos en la carrera de Ingeniería Mecánica. A lo largo de estos años, esta institución nos ha permitido adquirir los conocimientos, habilidades y valores necesarios para crecer tanto profesional como personalmente. Gracias a sus docentes, compañeros y todo el personal que ha sido parte de este proceso, por su apoyo, dedicación y compromiso en mi formación. En especial, queremos expresar nuestra gratitud al semillero SIMA (Semillero de investigación en manufactura aplicada), a los profesores Oscar Rodolfo Bohórquez y Francisco José Saldivia, cuyo esfuerzo y guía han sido fundamentales en este logro ya que, sin su apoyo, este trabajo no habría sido posible.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco Teórico.....	15
1.1. Tribología.....	15
1.1.1. Análisis tribológico en polímeros	15
1.1.2. Tribología y su importancia en la industria	16
1.2. Desgaste	16
1.3. Fuerza crítica de rayado	18
1.4. Desgaste por rayado	18
1.5. Resistencia al rayado y su relevancia en el desempeño tribológico	19
1.6. Fricción	19
1.7. Coeficiente de fricción.....	20
1.8. Fricción y su influencia en el desgaste de polímeros.....	21
1.9. Dureza	22
1.10. Polímeros	23
1.11. Bandas transportadoras en la industria alimenticia.....	23
1.12. Selección de polímeros para bandas transportadoras en la industria alimenticia	24
1.12.1. Elongación	25
1.12.2. Precio	25
1.12.3. Densidad	25
1.12.4. Tenacidad a la fractura.....	26
1.12.5. Resistencia a la tracción.....	26

1.12.6. Módulo de Young	26
2. Objetivos	28
2.1 Objetivo General	28
2.2 Objetivos Específicos.....	28
3. Metodología	29
3.1. Selección de los polímeros.....	29
3.2.1 Densidad Vs Modulo de Young.....	30
3.2.2 Precio Vs Resistencia a la tracción	32
3.2.3 Tenacidad a la fractura Vs Elongación	34
3.3. Pruebas de dureza	35
3.4. Pruebas de resistencia al desgaste y coeficiente de fricción	37
3.5. Pruebas de resistencia al rayado	39
3.6. Scratch Test.....	39
4. Resultados y discusión.....	41
4.1. Selección de materiales.....	41
4.1.1. Densidad Vs módulo de Young	41
4.1.2. Precio Vs Resistencia a la tracción	42
4.1.3. Tenacidad Vs Resistencia a la fatiga	43
4.2. Prueba de dureza	45
4.3. Coeficiente de fricción y desgaste	48
4.3.1. Pruebas de coeficiente de fricción de los polímeros	49
4.3.2. Pruebas de desgaste no abrasivo	50
4.4. Scratch test.....	62

4.4.1. Fuerza crítica de rayado de los polímeros.....	62
4.4.2. Desgaste por rayado de los polímeros	63
4.5. Análisis de polímeros basado en prueba de desgaste y resistencia al rayado.....	64
5. Conclusiones.....	70
6. Recomendaciones	71
Referencias Bibliográficas	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Análisis de resultados de la prueba de dureza</i>	46
Tabla 2. <i>Comparación de polímeros con base al desgaste y resistencia al rayado</i>	65
Tabla 3. <i>Comparación de polímeros y pruebas para bandas transportadoras</i>	68

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Esquema conceptual de un equipo pin on disk</i>	20
Figura 2. <i>Diagrama de Ashby</i>	30
Figura 3. <i>Gráfica de Ashby: Relación entre Módulo de Young y Densidad en Polímeros.</i>	32
Figura 4. <i>Gráfica de Ashby: Relación entre precio y resistencia a la tracción en Polímeros.</i>	33
Figura 5. <i>Gráfica de Ashby: Relación entre tenacidad y elongación en Polímeros</i>	35
Figura 6. <i>Durómetro Shore D</i>	36
Figura 7. <i>Máquina TriboLab para pruebas de desgaste y fricción</i>	38
Figura 8. <i>Probetas de cada polímero</i>	40
Figura 9. <i>Comparación de Módulos de Young y densidades de los polímeros seleccionados.</i>	42
Figura 10. <i>Comparación de resistencia a la tracción y precio de los polímeros seleccionados.</i> ..	43
Figura 11. <i>Comparación de elongación y tenacidad a la fractura de los polímeros seleccionados</i>	44
Figura 12. <i>Gráfico de cajas y bigotes prueba de dureza a los polímeros</i>	46
Figura 13. <i>Gráfico de cajas y bigotes de coeficiente de fricción de los polímeros</i>	49
Figura 14. <i>Evolución del coeficiente de fricción del teflón durante la prueba de desgaste</i>	51
Figura 15. <i>Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del teflón</i>	53
Figura 16. <i>Evolución del coeficiente de fricción del EMPACK N-6 durante la prueba de desgaste</i>	55

Figura 17. <i>Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del Empack N-6</i>	56
Figura 18. <i>Evolución del coeficiente de fricción del UHMW durante la prueba de desgaste</i>	58
Figura 19. <i>Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del UHMW</i>	59
Figura 20. <i>Gráfico de cajas y bigotes de fuerza de contacto de los polímeros</i>	61

Glosario

Adhesión: Fuerza de unión entre dos superficies en contacto, que puede influir en el desgaste y la fricción de los polímeros.

Carga aplicada: Fuerza que se ejerce sobre un material durante un ensayo tribológico.

Coefficiente de fricción: Relación entre la fuerza de fricción y la carga normal aplicada a una superficie.

Desgaste: Pérdida progresiva de material en una superficie debido a la fricción o a la interacción mecánica con otra superficie.

Ensayo tribológico: Prueba experimental para evaluar la fricción, el desgaste y resistencia al rayado de materiales en condiciones controladas.

Fatiga superficial: Tipo de desgaste causado por cargas cíclicas que generan grietas en la superficie del polímero.

Fricción: Resistencia al movimiento relativo entre dos superficies en contacto.

Modificación superficial: Procesos aplicados para mejorar las propiedades tribológicas de los polímeros, como recubrimientos o tratamientos térmicos.

Polímero: Material compuesto por macromoléculas orgánicas, utilizado en aplicaciones industriales debido a sus propiedades mecánicas y tribológicas.

Resistencia a la corrosión: Capacidad de un material para soportar la degradación causada por agentes químicos o ambientales.

Resumen

Título: Análisis tribológico de polímeros de uso comercial*

Autor: Valentina López Contreras y Stefany Sandrith Peñaranda Gómez**

Palabras Clave: Tribología, desgaste, fricción, polímero, corrosión, resistencia.

Descripción: Los polímeros son materiales ampliamente utilizados en la industria debido a su bajo costo, resistencia química, ligereza y facilidad de fabricación. Sin embargo, presentan un desgaste acelerado en aplicaciones donde están sometidos a fricción y esfuerzos mecánicos continuos. En este contexto, la tribología se encarga de estudiar la fricción, el desgaste y la resistencia al rayado, aspectos determinantes en la vida útil de los polímeros en entornos industriales. Este proyecto tiene como objetivo evaluar el comportamiento tribológico de tres polímeros comerciales: politetrafluoroetileno (PTFE), polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y Empack N-6. La selección de estos materiales se realizó con base en sus propiedades mecánicas y tribológicas, utilizando el software Granta EduPack para garantizar su idoneidad en aplicaciones industriales. Para la caracterización de los polímeros, se llevaron a cabo pruebas de dureza Shore D conforme a la norma ASTM D2240, ensayos de desgaste y coeficiente de fricción mediante la prueba pin on disk bajo la norma ASTM G99-23, y ensayos de resistencia al rayado mediante el scratch test siguiendo la norma ASTM D7027. Los resultados obtenidos fueron analizados con herramientas estadísticas, como el cálculo del error absoluto, desviación estándar y coeficiente de correlación de Pearson, con el fin de comparar el desempeño de cada material. Los hallazgos de este estudio permitieron identificar el polímero con mejor desempeño tribológico, en la aplicación de diseño y mantenimiento de equipos industriales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Francisco José Saldivia Saldivia. Ingeniero Mecánico. MSc. Gerencia de Mantenimiento. Codirector: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra. PhD. Ingeniería de materiales.

Abstract

Title: Tribological analysis of commercially used polymers *

Author(s): Valentina López Contreras and Stefany Sandrith Peñaranda Gómez **

Key Words: Tribology, wear, friction, polymer, corrosion, resistance.

Description: Polymers are widely used materials in industry due to their low cost, chemical resistance, light weight and ease of manufacture. However, they show accelerated wear in applications where they are subjected to friction and continuous mechanical stresses. In this context, tribology is in charge of studying friction, wear and scratch resistance, determining aspects in the useful life of polymers in industrial environments. This project aims to evaluate the tribological behavior of three commercial polymers: polytetrafluoroethylene (PTFE), ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW) and Empack N-6. These materials were selected based on their mechanical and tribological properties using Granta EduPack software to ensure their suitability for industrial applications. For the characterization of the polymers, Shore D hardness tests were carried out according to ASTM D2240, wear and friction coefficient tests using the pin on disk test under ASTM G99-23, and scratch resistance tests using the scratch test following ASTM D7027. The results obtained were analyzed with statistical tools, such as the calculation of the absolute error, standard deviation and Pearson's correlation coefficient, in order to compare the performance of each material. The findings of this study allowed the identification of the polymer with the best tribological performance in the application of design and maintenance of industrial equipment.

* Degree Work

**Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Francisco José Saldivia Saldivia Mechanical Engineering. MSc. Maintenance Management. Codirector: Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra. PhD. Materials Engineering

Introducción

Los polímeros desempeñan un papel fundamental en diversas aplicaciones industriales y comerciales debido a sus propiedades distintivas, como su densidad, módulo de Young, precio, resistencia a la tracción, tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga. Actualmente, su uso se justifica por las ventajas funcionales, estéticas y económicas que ofrecen. No obstante, el principal desafío radica en su desgaste acelerado, lo que hace necesario realizar pruebas tribológicas para determinar su durabilidad.

La ingeniería se ocupa de estos eventos en el proceso de diseño y del mantenimiento industrial ya que el desgaste provoca una disminución en la vida útil de las máquinas y equipos. Lo que resalta la necesidad de investigaciones tribológicas.

El campo de investigación de la tribología se enfoca en el estudio del desgaste, la resistencia al rayado y la fricción; aspectos críticos en la producción, el diseño y la aplicación efectiva de sistemas que incluyen componentes en movimiento. Los análisis tribológicos se han convertido en una herramienta fundamental para evaluar y entender el comportamiento de los polímeros frente al desgaste. Estas técnicas permiten modelar y estudiar las interacciones entre superficies en movimiento relativo, proporcionando datos cuantitativos sobre coeficientes de fricción y tasas de desgaste. El desgaste produce desperdicio de material, pérdida de rendimiento mecánico y genera cambios de forma geométrica que reduce la resistencia de los materiales (Gwidon, et. al, 2005).

En el caso de los polímeros, los análisis tribológicos según Witold Brostow et al. (2003) no se realizan muchos estudios, lo que afecta directamente los costos en dos áreas principales: el alto consumo de energía debido a la fricción en las máquinas y el desperdicio de materias primas.

El propósito de este trabajo es determinar la resistencia al desgaste, la fricción y la resistencia al rayado en tres polímeros de uso comercial a través de análisis tribológicos. Se seleccionaron los polímeros más relevantes para el diseño y mantenimiento de bandas transportadoras en la industria alimenticia y se sometieron a una serie de pruebas tribológicas. Estas bandas desempeñan un papel crucial en la manipulación y transporte de productos, garantizando eficiencia en los procesos productivos. A través de la investigación y el análisis de resultados, se busca identificar los factores que influyen en estos materiales y proporcionar información para mejorar su rendimiento en aplicaciones prácticas.

En resumen, se plantea la siguiente hipótesis ¿Cuál polímero de uso comercial tendrá mejor desempeño tribológico para el diseño de equipos y mantenimiento de bandas transportadoras en industrias alimenticias?

1. Marco Teórico

Con el objetivo de brindar una comprensión clara del tema con los conceptos fundamentales que sustentan la investigación, se realizó un análisis detallado de la tribología y los polímeros, pilares centrales del estudio. Además, se exploraron conceptos clave como fricción, desgaste, dureza, resistencia al rayado, cuya comprensión resulta esencial para interpretar los procesos tribológicos y su impacto en los materiales evaluados. Asimismo, se presentó un recorrido por los antecedentes investigativos más relevantes, lo que permitió contextualizar la hipótesis del estudio y destacar la importancia de las pruebas tribológicas en la evaluación del desempeño de los polímeros en bandas transportadoras para industrias alimenticias.

1.1. Tribología

En primer lugar, la tribología se puede definir como la ciencia y la tecnología de las superficies que interactúan en movimiento relativo y prácticas relacionadas (Ramírez, 2013). Por tanto, un análisis tribológico corresponde al examen o estudio sistemático de los fenómenos relacionados con la fricción, el desgaste y la lubricación que ocurren en las superficies en contacto relativo. En adición a la anterior definición, se señala que el análisis tribológico es el estudio científico de aplicar un análisis operacional a problemas de gran importancia económica, llámese, confiabilidad, mantenimiento, y desgaste del equipo técnico (Castillo, 2007).

1.1.1. Análisis tribológico en polímeros

El análisis tribológico en polímeros estudia el comportamiento de estos materiales frente a fenómenos de fricción y desgaste cuando están en contacto con otras superficies. Este tipo de análisis permite comprender cómo las propiedades intrínsecas del polímero como su dureza,

estructura molecular y resistencia mecánica influyen en su desempeño tribológico, siendo fundamental para mejorar su uso en aplicaciones industriales donde se requiere minimizar el desgaste y la pérdida de energía por fricción. Además, los polímeros ofrecen ventajas específicas como baja densidad y buena resistencia al desgaste, lo que los hace especialmente atractivos para componentes móviles, revestimientos y sistemas de transporte (Bhushan, 2013).

1.1.2. Tribología y su importancia en la industria

La tribología es la ciencia que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo, abordando fenómenos como la fricción, el desgaste y resistencia al rayado. En la industria, el desgaste de materiales es un problema significativo que afecta la vida útil de componentes mecánicos, incrementando costos de mantenimiento y afectando la eficiencia operativa (Stachowiak & Batchelor, 1993). En las bandas transportadoras utilizadas en la industria alimenticia, la selección de materiales tribológicamente eficientes es esencial para garantizar la durabilidad y minimizar la generación de residuos. (ASTM International, 2021).

1.2. Desgaste

El desgaste es entendido como el deterioro gradual de las superficies debido a la acción mecánica durante el contacto (García, 2003). Por otro lado, se define el desgaste como el proceso de eliminación de material debido al movimiento relativo de esta superficie respecto a otra en contacto (Luengo, 2008). Dicho esto, existe una íntima relación entre la fricción y el desgaste de las piezas que se ven involucradas en el movimiento, en donde la lubricación actúa como agente reductor.

La tasa de desgaste se determinó a partir de la variación de masa antes y después del ensayo, considerando la densidad del material y la distancia recorrida durante la prueba. Este cálculo

permite comparar el comportamiento de diferentes polímeros en condiciones de fricción controladas y evaluar su desempeño en aplicaciones industriales. A continuación, se presenta la ecuación utilizada para determinar el volumen de material desgastado en función de estos parámetros.

$$W = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{\text{densidad del material} * \text{distancia recorrida}} \quad (1)$$

Donde:

- W: Desgaste [mm^3 o cm^3]
- Densidad del material: [$\frac{g}{cm^3}$ o $\frac{kg}{m^3}$]
- Distancia recorrida: [m]

El desgaste volumétrico es un parámetro fundamental para evaluar la pérdida de material en componentes sometidos a fricción y contacto continuo. Este parámetro se calcula a partir de la reducción de masa del material después de las pruebas de desgaste, considerando su masa inicial y densidad antes del ensayo, lo que permite estimar el volumen total de material removido durante el proceso. La medición del desgaste volumétrico es esencial para analizar el comportamiento de los polímeros en aplicaciones industriales, ya que proporciona información sobre su durabilidad y rendimiento en condiciones reales de operación. La ecuación presentada es utilizada para determinar el desgaste volumétrico en función de la masa perdida y la densidad del material.

$$V = \frac{m_{inicial} - m_{final}}{\text{densidad del material}} \quad (2)$$

Donde:

- V: desgaste volumétrico [$\frac{mm^3}{m}$ o $\frac{cm^3}{m}$]

1.3. Fuerza crítica de rayado

Este es un parámetro esencial para evaluar la resistencia superficial de un material ante cargas aplicadas a través de un contacto puntual. Esta propiedad cobra especial importancia en polímeros empleados en aplicaciones industriales, donde el desgaste y la deformación por rayado pueden comprometer su rendimiento y durabilidad. Para determinar la resistencia del material al rayado, se mide la fuerza de contacto aplicada y el área de la punta del dispositivo de ensayo, lo que permite calcular la tensión generada en la superficie. La siguiente ecuación es la empleada para calcular la fuerza crítica de rayado. (Bucaille et al., 2006)

$$S = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Donde:

- S: Fuerza crítica de rayado [N/m^2]
- F: Fuerza de contacto [N]
- A: Área de la punta de dispositivo de rayado [cm^2 o m^2]

1.4. Desgaste por rayado

El desgaste por rayado es un aspecto fundamental en el análisis del comportamiento tribológico de los materiales, especialmente en aplicaciones donde las superficies están expuestas a deslizamientos constantes y cargas repetitivas. Para evaluar la tasa de desgaste, se analiza la relación entre el volumen de material perdido, la carga normal aplicada y la distancia de deslizamiento. El volumen de desgaste se determina a partir de la masa inicial y final de cada polímero, junto con su densidad conocida antes de la prueba. Esto permite calcular la cantidad de material removido durante el ensayo, para comparar el desempeño tribológico de los materiales. La ecuación empleada para determinar el desgaste por rayado es la siguiente: (Archard, 1953)

$$K = \frac{V}{(Fxs)} \quad (4)$$

Donde:

- K: Desgaste por rayado [cm^2]
- V: Volumen del material desgastado [mm^3]
- F: Carga normal aplicada durante la prueba [N]
- S: Distancia de deslizamiento [m]

1.5. Resistencia al rayado y su relevancia en el desempeño tribológico

La resistencia al rayado es un parámetro esencial en materiales utilizados en la industria, ya que influye en la durabilidad y apariencia del material. En polímeros, esta propiedad se evalúa mediante ensayos de dureza y pruebas de *scratch test*, determinando su capacidad para soportar fuerzas aplicadas sin sufrir daños superficiales (ASTM International, 2021). En las bandas transportadoras de la industria alimenticia, la resistencia al rayado es relevante para evitar la acumulación de residuos y facilitar la limpieza (ISO, 2019).

Serrano (2010) señala que hay dos tipos de rayados: multirayado y progresivo. El primero de ellos ocurre cuando la carga a aplicar se puede emplear de manera constante y, el segundo en donde se va aumentando la carga de manera progresiva conforme el punzón va avanzando. Dicho esto, la resistencia al rayado consiste tanto en la capacidad de un tipo de material sometido a una carga que pone a prueba su desgaste, como en un método estático.

1.6. Fricción

La fricción se puede entender como la fuerza de contacto que actúa para oponerse al movimiento deslizante entre superficies. La cual actúa paralela a la superficie y opuesta al sentido del deslizamiento. También menciona que la fricción estática se produce por la interacción entre

las irregularidades de las dos superficies, que se incrementará para evitar cualquier movimiento relativo hasta un límite donde ya empieza el movimiento. (Vargas, 2019)

El desgaste de materiales que interactúan puede llevarse a cabo utilizando un equipo de "pin on disk", también conocido como perno sobre disco como se puede visualizar en la Figura 1. Este método aplica una carga específica sobre un perno estacionario que presiona contra un disco en rotación, permitiendo así evaluar cómo diferentes condiciones afectan el desgaste. Según (Ølholm et al., 2009) se ha demostrado que tanto la carga aplicada como la velocidad de deslizamiento juegan un papel crucial en la tasa de desgaste de los compuestos poliméricos. Al variar estas condiciones, el estudio revela que un aumento en la carga generalmente resulta en un mayor desgaste, mientras que la velocidad de deslizamiento también influye significativamente en el comportamiento tribológico de los materiales. Este enfoque experimental proporciona una comprensión más profunda de los mecanismos de desgaste, lo que es esencial para el diseño y la selección de materiales en aplicaciones industriales.

Figura 1.

Esquema conceptual de un equipo pin on disk



Nota. Adaptado de Dumne, S. S., Rajiv, Dr. B., & Jaybhaye, Dr. M. D. (2022).

1.7. Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción es un parámetro importante en el análisis tribológico de los materiales, ya que permite evaluar la resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto.

Este coeficiente es fundamental para determinar el comportamiento de los polímeros en aplicaciones donde el deslizamiento y la fricción juegan un papel crucial, como en las bandas transportadoras de la industria alimenticia. La fricción entre los materiales puede influir en la eficiencia del sistema, el consumo de energía y el desgaste del material, por lo que su estudio es esencial para mejorar el rendimiento y la vida útil de los componentes. La ecuación utilizada para calcular el coeficiente de fricción en función de las fuerzas involucradas en el contacto entre superficies es la siguiente: (Moebs et al., 2021)

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \quad (5)$$

Donde:

- μ : Coeficiente de fricción
- F_f : Resistencia al movimiento entre superficie [N]
- F_N : Peso de carga aplicada [N]

El peso de carga aplicada que se usa en materiales blandos como los polímeros es de 1 N a 20 N.

1.8. Fricción y su influencia en el desgaste de polímeros

La fricción es la resistencia al movimiento relativo entre dos superficies en contacto. En los polímeros, la fricción depende de factores como la textura de la superficie, la carga aplicada y la velocidad de deslizamiento (Bhushan, 2013). Un coeficiente de fricción bajo es deseable en bandas transportadoras para reducir el consumo energético y evitar el sobrecalentamiento de los materiales, lo que podría comprometer su estructura y funcionalidad en ambientes industriales exigentes.

1.9. Dureza

Al respecto, la dureza se entiende como la carga normal aplicada por un punzón en el área donde se proyecta (Serrano, 2010). También, señala que la dureza se define como la resistencia de un material en contra de la deformación producida por penetración de un indentador vertical. La dureza es un dato fundamental que se utiliza para caracterizar la resistencia de un material ante esfuerzos específicos. Aunque la dureza de rayado está asociada principalmente con la deformación localizada, se interpreta como un valor representativo de otras propiedades mecánicas, tales como la resistencia a la abrasión, la fatiga o la fricción, que son claves para determinar su desempeño en diversas aplicaciones industriales. Por lo tanto, la dureza es una medida inicial de la resistencia de un material, y con ella se puede realizar una proyección aproximada sobre otras características de desempeño, como la resistencia a la fractura o la deformación. En este sentido, la dureza de rayado y la tenacidad a la fractura, aunque relacionadas, son conceptos distintos que complementan la evaluación del material para aplicaciones específicas, estos dos aspectos deben ser considerados independientemente, dado que representan diferentes tipos de respuesta del material ante cargas o deformaciones (Serrano, 2010).

La norma ASTM D2240 establece el método de prueba estándar para medir la dureza de materiales plásticos y elastómeros mediante durómetros Shore. La escala Shore D en particular se utiliza para polímeros de mayor rigidez, como plásticos duros, y mide la resistencia del material a la penetración de un indentador bajo una fuerza determinada. Esta medición proporciona un valor numérico de dureza, donde números más altos indican materiales más duros. La prueba es fundamental para caracterizar y comparar materiales en aplicaciones donde la resistencia al rayado, la indentación o la deformación superficial es crítica (ASTM International, 2015).

1.10. Polímeros

Los polímeros son cadenas de moléculas que se construyen mediante la unión repetida de una o más moléculas mediante enlaces covalentes. Estas moléculas individuales que se unen para formar polímeros se llaman monómeros, y las reacciones que conducen a su formación se conocen como reacciones de polimerización como lo mencionan Beltrán & Marcilla (Beltrán M. & Marcilla A., 2012). Junto a estas definiciones Laza & Pérez (2014), anotan que existen numerosas clasificaciones para polímeros. Por ejemplo, según su naturaleza, composición química, estructura, características, aplicaciones y reacciones de polimerización.

1.11. Bandas transportadoras en la industria alimenticia

Las bandas transportadoras son componentes esenciales en la industria alimentaria, ya que automatizan el movimiento de productos y materias primas, mejorando los tiempos de producción. Además, al mantener una velocidad constante y minimizar las interrupciones, las bandas transportadoras aseguran un flujo de trabajo continuo y ordenado. (Matuz, 2025)

Entre los materiales más utilizados para la fabricación de estas bandas se encuentran polímeros como el politetrafluoroetileno (PTFE), el polietileno de ultra alto peso molecular UHMW y el polipropileno (PP), debido a su resistencia al desgaste, facilidad de limpieza y compatibilidad con normativas de seguridad alimentaria (ISO, 2019).

Las bandas transportadoras utilizadas en la industria de alimentos pueden clasificarse según su diseño y aplicación en los siguientes tipos. Las bandas modulares plásticas, se fabrican con materiales FDA (polietileno, polipropileno y poliacetal), permite un amplio rango de temperatura de utilización y presenta las ventajas de fácil manipulación, limpieza y montaje a la vez de una gran longevidad. Las bandas de poliuretano (PU) o policloruro de vinilo (PVC), se emplean para

el transporte interior de productos, fabricadas con núcleo textil de poliéster, pero con cobertura de PVC, poliuretano o silicona y las bandas metálicas, son fabricadas en distintos metales y aleaciones, generalmente están constituidas por espiras de alambre unidas entre sí por varillas onduladas o rectas. (Vizuet Alcocer, 2010).

1.12. Selección de polímeros para bandas transportadoras en la industria alimenticia

La selección de materiales es un proceso fundamental en el diseño y desarrollo de componentes industriales, ya que garantiza que los materiales elegidos cumplan con los requisitos mecánicos, económicos y de durabilidad de cada aplicación específica. En la industria, una adecuada selección permite mejorar el rendimiento, minimizar costos y aumentar la vida útil de los productos, especialmente en aplicaciones exigentes como las bandas transportadoras utilizadas en sectores como el alimenticio o el manufacturero (Ashby, 2011). Los polímeros seleccionados para este estudio fueron elegidos con base en su desempeño tribológico y su viabilidad en bandas transportadoras para industrias alimenticias.

Bhushan explica que el coeficiente de fricción es fundamental para entender el desempeño de los materiales en aplicaciones tribológicas. Un bajo coeficiente de fricción reduce el desgaste de los materiales y mejora la eficiencia energética al reducir la resistencia al movimiento. Los polímeros seleccionados para bandas transportadoras deben tener un coeficiente de fricción bajo para minimizar el consumo de energía y mejorar la durabilidad de los componentes. (Bhushan, 2013).

En cuanto la resistencia al desgaste el autor Hutchings aborda cómo los materiales deben resistir el desgaste, un fenómeno crítico en entornos industriales donde las superficies de contacto están en constante fricción. Los polímeros con alta resistencia al desgaste no solo tienen una vida

útil más larga, sino que también mantienen su desempeño a lo largo del tiempo, lo que reduce la necesidad de reemplazo y el mantenimiento costoso. Las bandas transportadoras en la industria alimentaria requieren materiales que sean resistentes al desgaste debido al constante movimiento de productos y materiales a lo largo de ellas. (Hutchings, 1992). Entre los criterios considerados para tener en cuenta al momento de seleccionar los polímeros se incluyen:

1.12.1. Elongación

La elongación evalúa la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de romperse, lo cual es crucial en sistemas donde se presentan tensiones dinámicas y flexibilidad estructural. En bandas transportadoras utilizadas en la industria alimenticia, esta propiedad permite absorber deformaciones sin generar fallos inmediatos. (Granta Design, 2023).

1.12.2. Precio

El precio es un factor importante para considerar en la selección de materiales ya que en la industria alimenticia requiere materiales rentables sin sacrificar calidad ni durabilidad. Los materiales de polímero deben ofrecer un equilibrio entre costo y desempeño. En la industria alimentaria, donde la eficiencia operativa es clave, elegir un polímero que sea rentable pero que también cumpla con los requisitos técnicos (como resistencia a la fricción, desgaste, etc.) es crucial. Los costos de producción de bandas transportadoras deben mantenerse dentro de un presupuesto sin prescindir propiedades críticas como la resistencia y durabilidad. (Campo, 2008).

1.12.3. Densidad

La densidad fue un factor esencial en la selección de materiales, ya que una menor densidad contribuye a reducir el peso de las bandas transportadoras, facilitando su eficiencia energética y disminuyendo la carga sobre los motores.

Los autores García & López (2017) explican que la densidad es una propiedad clave al seleccionar materiales para aplicaciones industriales. Los polímeros con menor densidad pueden reducir el peso de las bandas transportadoras, lo cual es importante para la eficiencia energética y la reducción de costos operativos. Sin embargo, los materiales con alta densidad a menudo ofrecen mejor resistencia y durabilidad.

1.12.4. Tenacidad a la fractura

En cuanto a tenacidad a la fractura se discute cómo los polímeros deben tener una alta tenacidad para resistir la propagación de grietas y fracturas bajo condiciones de trabajo extremas. La tenacidad es crítica en entornos industriales donde las tensiones cíclicas y los impactos son comunes. Para la resistencia a la fatiga los polímeros deben ser capaces de soportar repetidos ciclos de carga sin fallar, lo cual se describe como resistencia a la fatiga. La tenacidad a la fractura permitió determinar la capacidad del material para resistir impactos o grietas que pudieran comprometer su funcionamiento. (Davis, 2004).

1.12.5. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción mide la capacidad del material para soportar fuerzas mecánicas sin romperse, lo que es esencial en aplicaciones donde las bandas estén sujetas a cargas constantes y esfuerzos repetitivos. Un material con baja resistencia a la tracción sufre deformaciones o fallas prematuras, comprometiendo la eficiencia del sistema de transporte. La resistencia a la tracción se evaluó para garantizar que los polímeros soportaran esfuerzos mecánicos sin romperse, aspecto clave en entornos donde se transportan cargas pesadas. (Callister & Rethwisch, 2021).

1.12.6. Módulo de Young

El módulo de Young, también conocido como módulo de elasticidad, es una propiedad mecánica que mide la rigidez de un material, es decir, su capacidad para resistir la deformación

elástica bajo una carga aplicada. En el contexto de bandas transportadoras utilizadas en la industria alimenticia, esta propiedad es crucial, ya que garantiza que el polímero mantenga su forma y funcionalidad ante esfuerzos mecánicos repetidos sin sufrir deformaciones permanentes. Una banda transportadora con un módulo de Young apropiado asegura un buen soporte de carga y estabilidad estructural durante el transporte de alimentos, incluso en condiciones exigentes de producción. La selección de materiales con un módulo adecuado permite mejorar la durabilidad, de los procesos industriales. Según Callister & Rethwisch (2021), el módulo de Young representa la pendiente en la región elástica de la curva esfuerzo-deformación, siendo un parámetro fundamental para caracterizar la resistencia mecánica de materiales estructurales.

Los polímeros analizados en esta investigación han demostrado ser opciones viables para aplicaciones en la industria alimenticia debido a su combinación de propiedades mecánicas, resistencia química y bajo desgaste en entornos de fricción (Stachowiak & Batchelor, 1993).

El desarrollo del marco teórico permitió evaluar de manera integral el comportamiento de los polímeros en términos de resistencia mecánica, tribológica y durabilidad, considerando factores clave como dureza, desgaste, coeficiente de fricción, tenacidad a la fractura y elongación. A través de las pruebas realizadas, se obtuvieron datos fundamentales para comparar el desempeño de cada material en aplicaciones industriales específicas.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Determinar el desempeño tribológico en tres polímeros de uso comercial a través de análisis tribológicos para el diseño y mantenimiento de bandas transportadoras en industrias alimenticias.

2.2 Objetivos Específicos

Seleccionar tres polímeros de uso comercial e industrial para la aplicación en diseño y mantenimiento proporcionado por el software Granta EduPack.

Determinar el mejor polímero a partir de las pruebas de dureza conforme a los parámetros establecidos por la norma ASTM D2240.

Analizar las pruebas de la resistencia al desgaste no abrasivo y del coeficiente de fricción de los polímeros según los parámetros de la norma ASTM G99-23 a través del ensayo de pin on disk para establecer el polímero con los resultados más convenientes.

Evaluar la resistencia al rayado de los polímeros según los parámetros de la norma ASTM D7027 mediante el ensayo scratch test para concluir cuál polímero tiene una mayor resistencia al rayado.

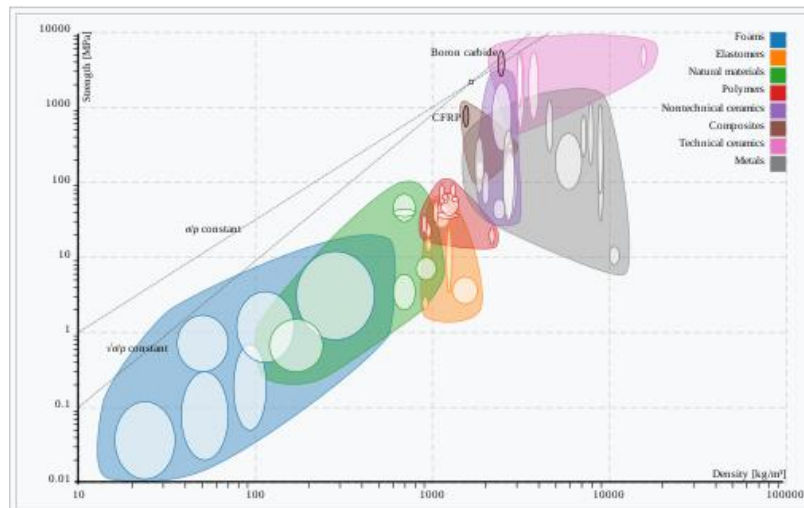
3. Metodología

3.1. Selección de los polímeros

En la selección se priorizaron polímeros que ofrecieran un balance adecuado entre propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y desempeño tribológico. Entre los parámetros considerados se incluyeron la densidad, el módulo de Young, el precio, la resistencia a la tracción, la tenacidad a la fractura y la resistencia a la fatiga, factores fundamentales para asegurar un funcionamiento eficiente y duradero en condiciones operativas exigentes.

El uso del software Granta EduPack facilitó una investigación de polímeros industriales, ya que la base de datos contenía más de sesenta materiales con unos límites elegidos por Granta Design Team, versión CES EduPack 2019, en colaboración con usuarios del software. Este enfoque permitió evaluar criterios clave para el desempeño de los polímeros en bandas transportadoras, los cuales fueron densidad, módulo de Young, precio, resistencia a la tracción, tenacidad a la fractura y resistencia a la fatiga.

Para la elección de los tres polímeros se utilizó un método de selección de materiales llamado Diagrama de Ashby presentado en la Figura 2, el cual es una herramienta visual que permite comparar diferentes materiales en función de sus propiedades.

Figura 2.*Diagrama de Ashby*

Nota. Adaptado de *De la ciencia de datos a la ciencia de datos de materiales* (pp. 15-30), de S. Sandfeld, 2024, *The Materials Research Society*, Springer International Publishing.

Los criterios seleccionados fueron definidos con base en las normativas internacionales de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), asegurando la adecuada evaluación de los polímeros en aplicaciones industriales. La selección de estos parámetros permitió analizar el comportamiento de los materiales en función de su desempeño tribológico y su aplicabilidad en bandas transportadoras dentro de la industria alimenticia. A continuación, se muestran las comparaciones de cada criterio de selección.

3.2.1 Densidad Vs Modulo de Young

Se seleccionaron la densidad y el módulo de Young como criterios clave para el análisis comparativo de los polímeros. La densidad es un factor determinante en la selección de materiales, ya que influye en el peso total de la banda transportadora. De acuerdo con la norma ASTM D7027,

tanto los polímeros de baja como de alta densidad pueden ser adecuados, dependiendo de la aplicación específica. Los materiales más ligeros permiten reducir el peso del sistema, mejorando la eficiencia energética y facilitando su manipulación, mientras que los materiales más densos ofrecen mayor estabilidad y resistencia al impacto en espacios reducidos. Para este estudio, se trabajó con un rango de densidad de 900 kg/m^3 a 2.200 kg/m^3 (ASTM, 2020). Por otro lado, un polímero con un módulo de Young elevado será más rígido, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones donde se requiera mayor estabilidad estructural, mientras que un módulo más bajo permitirá mayor flexibilidad. Los rangos de módulo de Young que se trabajaron fueron de $0,2 \text{ GPa}$ a 2 GPa (ASTM, 2020).

Además, la norma ISO 14890 establece las medidas de amplitud y longitud que deben cumplir las correas transportadoras y especifica cómo los polímeros se comportan en diversas condiciones, como temperatura, tensión y durabilidad. De igual manera, la norma define criterios relacionados con los recubrimientos y la construcción base con textiles, lo que asegura una mayor resistencia y operatividad en diferentes entornos industriales.

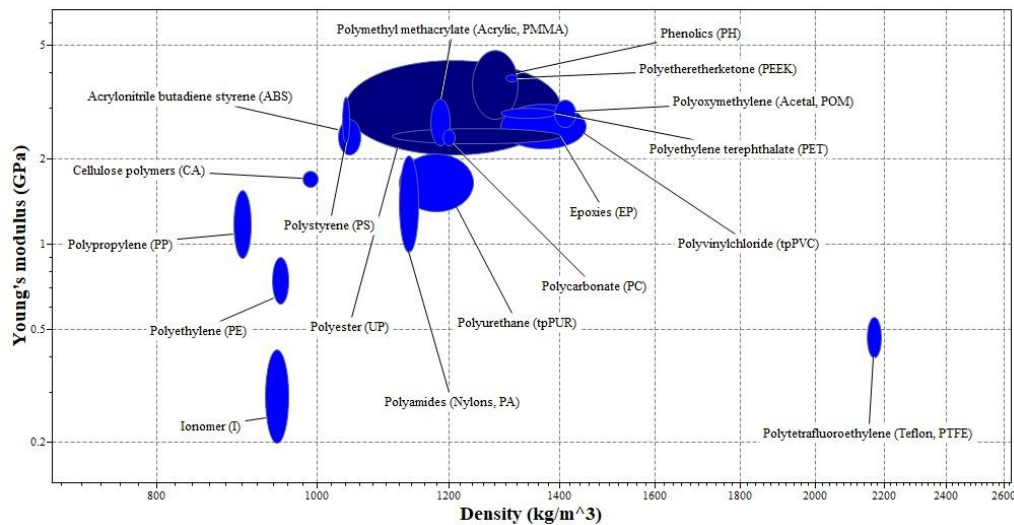
La comparación entre densidad y módulo de Young permitió evaluar el equilibrio entre peso y rigidez, asegurando que los materiales seleccionados para las bandas transportadoras en la industria alimenticia cumplieran con los estándares de seguridad, eficiencia y durabilidad requeridos en aplicaciones industriales exigentes.

La Figura 3 muestra la relación entre el módulo de Young (GPa) y la densidad (kg/m^3) de diversos polímeros. En el eje X se representa la densidad, con un rango aproximado de 900 a 2.200 kg/m^3 , y en el eje Y el módulo de Young, entre $0,2$ y 2 GPa . Para aplicaciones como bandas transportadoras, los polímeros más convenientes son aquellos ubicados hacia la izquierda y arriba

de la gráfica, ya que combinan baja densidad, lo que reduce el peso del sistema, con alta rigidez, menor deformación bajo carga, mejorando así el desempeño mecánico y energético del sistema.

Figura 3.

Gráfica de Ashby: Relación entre Módulo de Young y Densidad en Polímeros.



Nota. Adaptado de *CES EduPack Material Property Data*, por Granta Design, (2023)

Para concluir, se puede afirmar que, en base a la relación mostrada entre el módulo de Young y la densidad de los polímeros, los materiales que se ubican en la parte superior izquierda de la gráfica son los más adecuados para aplicaciones como bandas transportadoras. Estos polímeros ofrecen una combinación ideal de baja densidad y alta rigidez, lo que garantiza un buen desempeño mecánico y energético. Esta selección no solo mejora la eficiencia en el transporte, sino que también minimiza el impacto en el peso total del sistema, favoreciendo una operación más económica y efectiva.

3.2.2 Precio Vs Resistencia a la tracción

El precio fue un factor determinante en la selección de materiales, ya que influyó directamente en los costos de producción y mantenimiento. De acuerdo con la norma ASTM D7027, los materiales más económicos fueron preferidos en aplicaciones de producción en masa

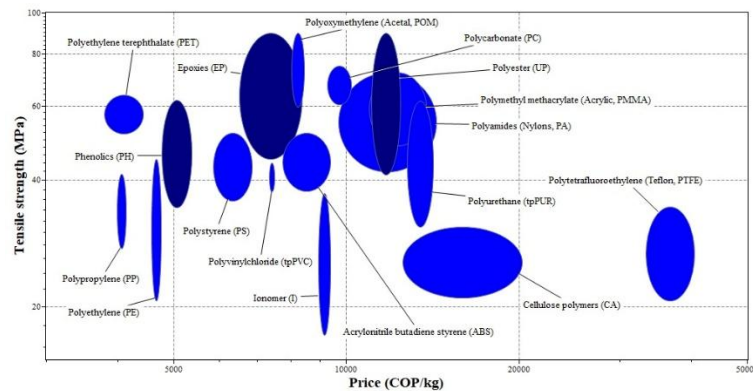
debido a su bajo costo, disponibilidad y facilidad de procesamiento (ASTM, 2020). Para este estudio, se consideró un rango de precio entre 3.000 COP/kg y 48.000 COP/kg y una resistencia a la tracción entre 20 MPa y 40 MPa (Granta Design, 2023).

La relación entre precio y resistencia a la tracción es clave en la selección de materiales para bandas transportadoras, ya que permite encontrar un equilibrio entre costos y desempeño mecánico. Si bien los polímeros más económicos son adecuados para aplicaciones estándar, aquellos con mayor resistencia a la tracción aseguran una mayor estabilidad estructural y un mejor desempeño en condiciones exigentes. En la industria alimenticia, esta comparación es esencial para garantizar que los materiales seleccionados sean rentables sin comprometer la seguridad ni la eficiencia del sistema de transporte.

En la Figura 4 se muestra que en el eje X se representa el precio (de 3.000 a 48.000 COP/kg), mientras que en el eje Y se muestra la resistencia a la tracción (de 20 a 100 MPa). Para aplicaciones industriales como bandas transportadoras, los polímeros más convenientes se ubican en la zona superior izquierda, ya que combinan alta resistencia con bajo costo, mejorando tanto el desempeño como la viabilidad económica del material.

Figura 4.

Gráfica de Ashby: Relación entre precio y resistencia a la tracción en Polímeros.



Nota. Adaptado de CES EduPack Material Property Data, por Granta Design, (2023).

A partir de la anterior gráfica, se puede concluir que los polímeros ubicados en la zona superior izquierda de la figura son los más adecuados para aplicaciones industriales que requieren bandas transportadoras. Estos materiales combinan una alta resistencia a la tracción con un costo relativamente bajo, lo que los convierte en opciones rentables y eficientes en términos de desempeño mecánico. La selección de un polímero dependerá del equilibrio entre estas dos características clave, lo que garantiza tanto la efectividad en el funcionamiento como la viabilidad económica del sistema en el que se utilicen.

3.2.3 Tenacidad a la fractura Vs Elongación

Estos parámetros son esenciales para evaluar la capacidad de los polímeros utilizados en sistemas de transporte sujetos a cargas cíclicas y posibles impactos mecánicos. Para este estudio, se trabajó con un rango de $1 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ a $5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, lo que permitió identificar materiales con mayor resistencia al impacto y mejor integridad estructural en bandas transportadoras expuestas a condiciones exigentes (Granta Design, 2023). Un polímero con alta tenacidad a la fractura resiste mejor los impactos y deformaciones sin comprometer su integridad estructural, lo que es crucial en bandas transportadoras que operan en entornos con cargas variables o impactos frecuentes.

Un polímero con baja elongación tiende a fracturarse rápidamente ante esfuerzos repetitivos o impactos, mientras que uno con alta elongación puede acomodarse a deformaciones sin comprometer su integridad. (Sperling, 2006)

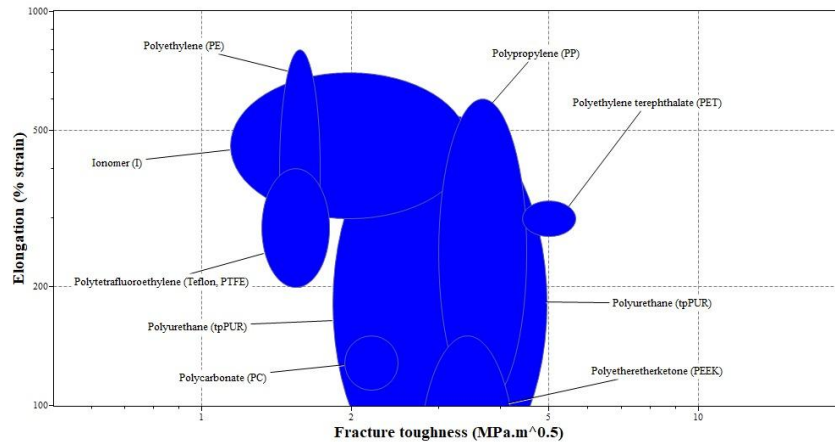
Los polímeros que combinan una elongación elevada con una tenacidad a la fractura superior a $2 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ son ideales para aplicaciones que exigen tanto resistencia al impacto como flexibilidad.

En la Figura 5. se visualiza la relación entre la tenacidad a la fractura (eje X: $1-10 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$) y la elongación (eje Y: $100-1.000 \%$). Para aplicaciones que exigen alta resistencia a

impactos y buena deformabilidad, como bandas transportadoras, los materiales más convenientes se encuentran en la zona superior derecha, ya que combinan alta elongación con gran tenacidad, lo que indica durabilidad y flexibilidad frente a esfuerzos repetitivos.

Figura 5.

Gráfica de Ashby: Relación entre tenacidad y elongación en Polímeros



Nota. Adaptado de *CES EduPack Material Property Data*, por Granta Design, (2023)

Con base en lo anterior, se puede concluir que los polímeros ubicados en la zona superior derecha de la gráfica, como el polipropileno (PP) y el polietileno (PE), presentan las mejores propiedades para aplicaciones industriales que requieren una combinación de alta tenacidad y elongación. Estos materiales no solo ofrecen una gran capacidad de deformación antes de fracturarse, sino también una notable resistencia a los impactos, lo que los hace ideales para aplicaciones como bandas transportadoras, donde la flexibilidad y la durabilidad frente a esfuerzos repetitivos son esenciales.

3.3. Pruebas de dureza

Para evaluar la dureza de los polímeros, se realizaron pruebas utilizando un durómetro portátil tipo Shore D como el de la Figura 6, el cual mide la resistencia a la deformación por

penetración usando el método de indentación. Estas pruebas se llevaron a cabo en el Parque Tecnológico Guatiguará, sede de la Universidad Industrial de Santander (UIS), bajo los lineamientos de la norma ASTM D2240. Se efectuaron cinco mediciones por cada disco, ubicadas a una distancia de 1 cm entre sí, con el fin de obtener una representación precisa y homogénea de la dureza superficial. Cada muestra era un disco de 6 mm de espesor, dispuesto sobre una superficie plana, limpia y libre de impurezas. Las lecturas se tomaron un segundo después del contacto completo del penetrador con la superficie del polímero, aplicando una carga constante y evitando impactos bruscos durante la medición. Esta metodología aseguró condiciones uniformes que permitieron una comparación confiable entre los materiales evaluados. Gracias a este procedimiento, fue posible obtener datos comparativos sobre el comportamiento de los polímeros, para aplicaciones en bandas transportadoras dentro de la industria alimenticia.

Figura 6.

Durómetro Shore D



Nota. Adaptado de Manual de durómetros Shore D digital (16HDM002, D100HD06) (2016)

Para evaluar la dureza de los polímeros seleccionados en esta investigación, se compararon los valores teóricos establecidos en la literatura con los valores obtenidos en pruebas de laboratorio en dureza Shore D bajo la norma ASTM D2240. Esta comparación permitió analizar la precisión de los resultados experimentales y su relación con las propiedades mecánicas esperadas de los

materiales. Para validar la confiabilidad de los resultados, se calcularon indicadores estadísticos como el error absoluto, error relativo.

Para asegurar la uniformidad de las mediciones, cada punto fue tomado a una distancia de 1 cm entre sí. El equipo de medición utilizado operó con un rango de indentación de 0 a 2,5 mm, aplicando una presión de la punta de indentación que osciló entre 0 y 44,5 N. Además, el tamaño de la punta del indentador fue SR0,1 mm, permitiendo una evaluación precisa de la resistencia superficial de cada polímero.

3.4. Pruebas de resistencia al desgaste y coeficiente de fricción

Estas pruebas se llevaron a cabo siguiendo los parámetros definidos por la norma ASTM G99-23, los cuales abarcaron aspectos como carga, presión, velocidad de deslizamiento y material. Se realizaron pruebas de resistencia al desgaste no abrasivo y coeficiente de fricción en los polímeros mediante el ensayo de *pin on disk* en la máquina TriboLab, como se muestra en la Figura 7. Durante el ensayo, se registraron los valores de desgaste y coeficiente de fricción de cada polímero, lo que permitió una evaluación detallada de su desempeño tribológico y su aplicabilidad para su uso en bandas transportadoras para la industria alimentaria. En particular, se obtuvieron las siguientes fuerzas de fricción (F_z) y distancias de deslizamiento: para el Empack N-6, una fuerza de fricción de 604,652 [N] y una distancia de deslizamiento de 1631,745 [cm]; para el Teflón, 563,994 [N] y 1117,389 [cm]; y para el UHMW, 460,651 [N] y 1601,591 [cm].

Figura 7. Para ello, se aplicó una carga de 10 N y una presión de 62 kPa sobre la superficie de contacto. La velocidad de deslizamiento se mantuvo constante a 8,5 RPM y se utilizó como contraparte un pasador de carburo de tungsteno, seleccionado por su alta dureza y resistencia al desgaste.

Durante el ensayo, se registraron los valores de desgaste y coeficiente de fricción de cada polímero, lo que permitió una evaluación detallada de su desempeño tribológico y su aplicabilidad para su uso en bandas transportadoras para la industria alimentaria. En particular, se obtuvieron las siguientes fuerzas de fricción (F_z) y distancias de deslizamiento: para el Empack N-6, una fuerza de fricción de 604,652 [N] y una distancia de deslizamiento de 1631,745 [cm]; para el Teflón, 563,994 [N] y 1117,389 [cm]; y para el UHMW, 460,651 [N] y 1601,591 [cm].

Figura 7.

Máquina TriboLab para pruebas de desgaste y fricción



Nota. Adaptado de Tribómetro universal - UMT TriboLab™, por Bruker Nano Surfaces, (2014)

Es esencial mencionar que la presencia de ruido en la señal puede atribuirse a diversos factores, como la rugosidad del disco, la liberación de partículas del material o pequeñas inestabilidades en la máquina de ensayo. Para mitigar estas variaciones, el uso de un promedio móvil de 20 periodos (curva roja) permite identificar tendencias más claras y sugiere que la fuerza tiende a decrecer con el tiempo, lo que indica un ajuste progresivo del material en la interfaz de contacto (Bhushan, 2013).

3.5. Pruebas de resistencia al rayado

Esta prueba se realizó mediante el ensayo de pin on disk en la máquina TriboLab, conforme a los criterios establecidos por la norma ASTM D7027. Durante este proceso, se aplicó una carga de 10 N y una velocidad de deslizamiento constante de 8,5 RPM, con el fin de replicar condiciones reales de desgaste. Estos parámetros fueron seleccionados para evaluar el comportamiento tribológico de los polímeros bajo condiciones controladas y comparables. Se registraron los resultados obtenidos de las pruebas, incluyendo la profundidad y extensión de los rayones en cada polímero evaluado. La comparación de estos datos permitió determinar la resistencia al rayado de cada material y su capacidad para soportar condiciones de uso.

3.6. Scratch Test

La prueba de scratch test se implementó con el fin de caracterizar la resistencia superficial de los materiales poliméricos frente a esfuerzos mecánicos concentrados. Como se puede visualizar en la siguiente Figura 8 las muestras fueron previamente cortadas y acondicionadas según los requerimientos del equipo TriboLab, utilizado para este ensayo. Se registraron parámetros como la fuerza aplicada de 10 N y la respuesta del material en términos de desplazamiento y daño superficial, permitiendo comparar la resistencia al rayado entre los diferentes polímeros.

Figura 8.

Probetas de cada polímero



Nota. Autor

4. Resultados y discusión

4.1. Selección de materiales

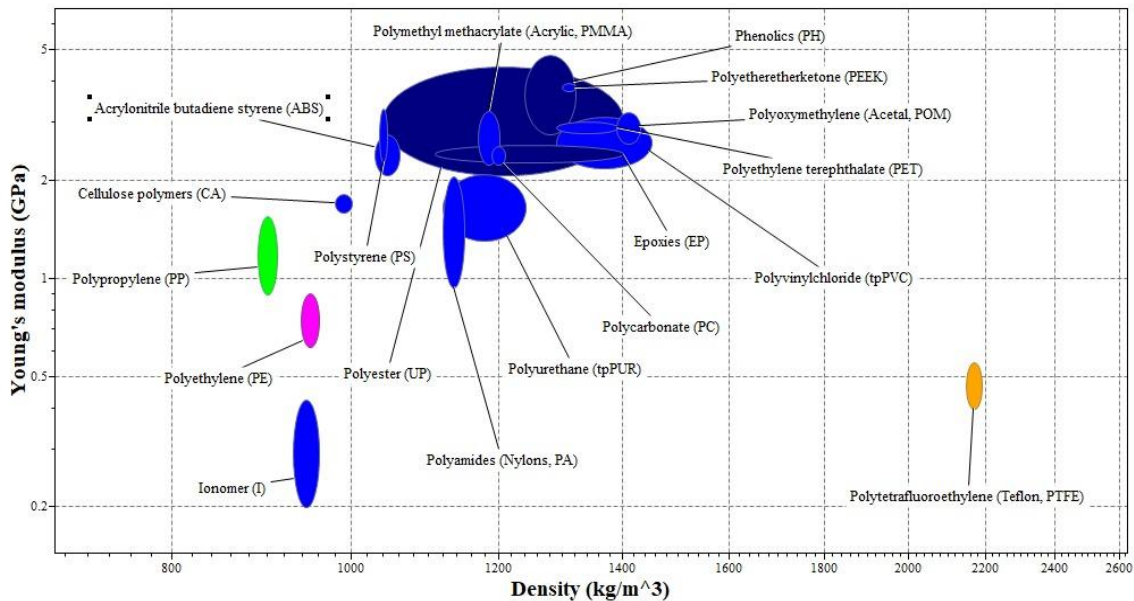
En el análisis de material mediante el software Granta EduPack, los tres polímeros más adecuados para realizar el análisis tribológico, de acuerdo con los criterios de selección, son: el teflón (PTFE), el UHMW perteneciente a la familia del polietileno (PE), y el Empack N-6, parte de la familia del polipropileno (PP). Estos materiales no solo destacan por su desempeño en aplicaciones tribológicas, sino que además fueron seleccionados por su amplia disponibilidad comercial, su alta demanda en el mercado y su uso frecuente en aplicaciones industriales, especialmente en el sector alimenticio. Su elección se justifica porque son fácilmente adquiribles en el entorno local e internacional, cuentan con respaldo técnico por parte de los fabricantes.

4.1.1. Densidad Vs módulo de Young

En la Figura 9 se visualiza la relación entre la densidad (kg/m^3) y el módulo de Young (GPa) para los diferentes polímeros. Se observó que los materiales con densidades más bajas, como el UHMW (PE) y el Empack N-6 (PP), tienen valores inferiores al módulo de Young, lo que indica menor rigidez. Se encontró que a medida que la densidad es mayor, se encuentran materiales como el teflón (PTFE) que, aunque es más denso, mantiene un módulo de Young bajo en comparación con otros polímeros de densidad similar. Por otro lado, los polímeros con mayor módulo de Young tienden a agruparse en el rango de densidad media a alta, lo que sugiere que existe una correlación positiva entre estos parámetros en algunos materiales. Estos resultados son esenciales para la elegir materiales en aplicaciones donde se requieran bandas transportadoras sobre todo en la industria alimenticia.

Figura 9.

Comparación de Módulos de Young y densidades de los polímeros seleccionados.



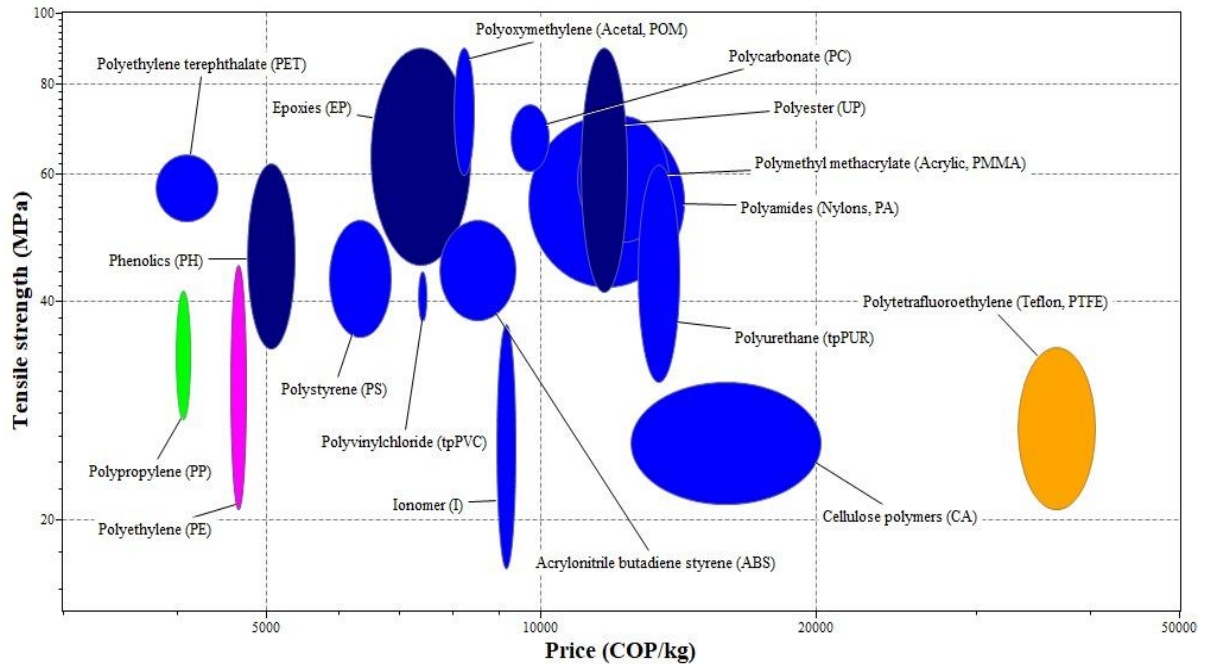
Nota. Adaptado de *CES EduPack Material Property Data*, por Granta Design, (2023)

4.1.2. Precio Vs Resistencia a la tracción

En la Figura 10 se observa que los materiales como el Empack N-6 (PP) y UHMW (PE) se destacan por su bajo costo y una resistencia a la tracción moderada, lo que los convierte en opciones atractivas cuando se busca un equilibrio entre precio y rendimiento. Por otro lado, el teflón (PTFE) tiene un costo significativamente más alto, pero su resistencia a la tracción es menor en comparación con otros polímeros más económicos. La distribución de los datos indica que los materiales con mayor resistencia a la tracción suelen ubicarse en un rango de precios intermedio a alto, lo que muestra que su costo puede estar influenciado por propiedades mecánicas avanzadas o características adicionales.

Figura 10.

Comparación de resistencia a la tracción y precio de los polímeros seleccionados



Nota. Adaptado de CES EduPack Material Property Data, por Granta Design, (2023)

4.1.3. Tenacidad Vs Resistencia a la fatiga

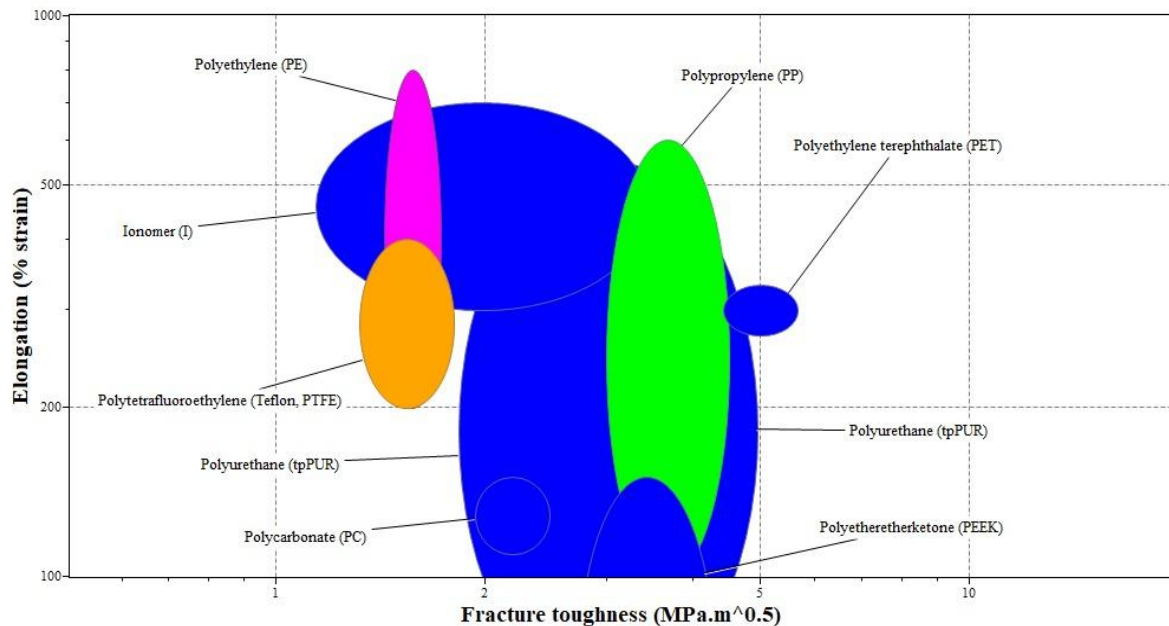
La Figura 11 nos permite visualizar cómo se relacionan la tenacidad a la fractura ($\text{MPa}\cdot\sqrt{m}$) y la resistencia a la fatiga (MPa) a 10^7 ciclos en distintos polímeros. Se puede notar que materiales como el UHMW (PE) y el Empack N-6 (PP) tienen una resistencia a la fatiga moderada, junto con una tenacidad que varía de baja a intermedia. Esto indica que pueden soportar esfuerzos cíclicos sin fracturarse fácilmente, lo que los hace opciones viables en aplicaciones donde la durabilidad es clave.

Por otro lado, el teflón (PTFE) presenta tanto una baja tenacidad como una resistencia a la fatiga limitada, lo que indica que no es la mejor elección para condiciones de carga cíclica.

prolongada. La distribución de los polímeros en la Figura 11 nos muestra que una mayor tenacidad no siempre se convierte en una mejor resistencia a la fatiga.

Figura 11.

Comparación de elongación y tenacidad a la fractura de los polímeros seleccionados



Nota. Adaptado de *CES EduPack Material Property Data*, por Granta Design, (2023)

Los polímeros UHMW (PE), Empack N-6 (PP) y Teflón (PTFE) fueron elegidos para este estudio debido a su amplia disponibilidad en el mercado y sus propiedades mecánicas ideales para su uso en bandas transportadoras dentro de la industria alimenticia. Estos materiales cumplen con características clave como baja fricción y factores esenciales para garantizar un desempeño.

El UHMW (PE) es una opción destacada por su buena tenacidad, resistencia a la fatiga y bajo costo, lo que lo convierte en un material eficiente para bandas transportadoras flexibles. Por su parte, el Empack N-6 (PP) se caracteriza por ser ligero, y brinda una buena resistencia mecánica, haciéndolo adecuado para entornos industriales exigentes. En cuanto al teflón (PTFE), su principal

ventaja radica en su baja adhesión, lo que ayuda a prevenir la acumulación de residuos en las bandas transportadoras.

Estos polímeros presentaron propiedades clave como baja fricción, alta resistencia al desgaste, buena tenacidad a la fractura y una elongación favorable, lo cual es esencial en sistemas de transporte expuestos a cargas cíclicas, impactos y deslizamientos.

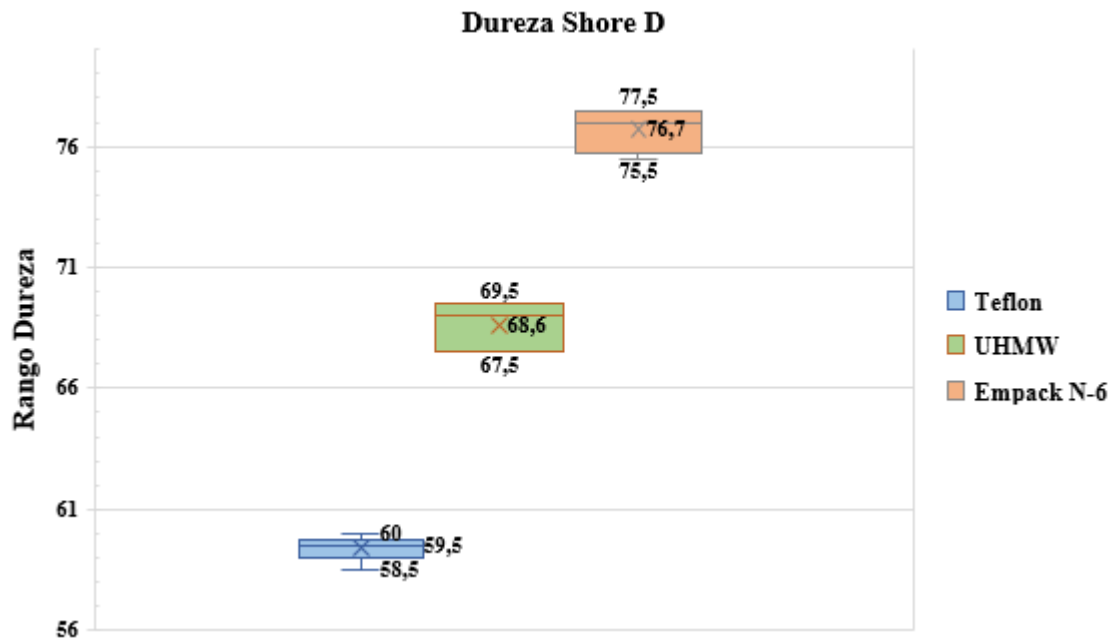
4.2. Prueba de dureza

Para evaluar la dureza de los polímeros seleccionados, se realizaron pruebas utilizando el método de indentación bajo la norma ASTM D2240. Los materiales analizados fueron Teflón (PTFE), Empack N-6 (PP) y UHMW (PE), comparando los valores obtenidos en laboratorio con sus rangos de dureza teórica en la escala Shore D. En el caso del teflón (PTFE), se esperaba una dureza entre 50 y 60 Shore D, mientras que para el Empack N-6, el rango teórico estaba entre 70 y 80 Shore D. Por su parte, el UHMW presentaba una dureza teórica estimada entre 60 y 70 Shore D.

En la Figura 12 se muestran los resultados de la prueba de dureza Shore D para los diferentes tipos de polímeros: Teflón, UHMW y Empack N-6. Cada material presenta una distribución de valores de dureza, representada por cajas y bigotes, que nos permiten entender mejor sus propiedades.

Figura 12.

Gráfico de cajas y bigotes prueba de dureza a los polímeros



La Tabla 1 permite identificar de manera clara las diferencias de dureza entre los polímeros evaluados, a partir de los resultados obtenidos en la prueba correspondiente.

Tabla 1.

Análisis de resultados de la prueba de dureza

Polímero	Valor teórico	Rango de dureza	Error absoluto (AE)	Error relativo (RE)	Observación
Teflón (PTFE)	50 - 60	58,5 – 60	4,25	7,73%	Es el polímero de menor dureza, el más adecuado para aplicaciones que

					requieren menor fricción.
UHMW (PE)	60 - 70	67,5 – 69,5	3,5	5,38%	Presenta dureza intermedia, con un balance entre resistencia y flexibilidad.
EMPACK N-6 (PP)	70 - 80	75,5 – 77,5	1,5	2%	Es el de mayor dureza entre los polímeros analizados, es ideal para aplicaciones que exigen alta resistencia.

Comparando los resultados obtenidos, el Empack N-6 se posiciona como el polímero de mayor dureza entre los tres materiales evaluados, superando tanto al UHMW como al Teflón. Su bajo error relativo (2%) y su rango de dureza más elevado lo hacen ideal para aplicaciones que requieren alta resistencia mecánica. En contraste, el UHMW, con una dureza intermedia y un error relativo de 5,38%, ofrece un buen balance entre resistencia y flexibilidad, siendo recomendable en aplicaciones donde se requiere cierta adaptabilidad estructural. Por otro lado, el teflón presenta la menor dureza y el mayor error relativo (7,73%), siendo menos resistente que los otros dos polímeros, aunque ventajoso para minimizar la fricción.

Esta comparación se respalda en estudios como el de (Wypych, 2016) donde se establece que las poliamidas como el Empack N-6 presentan propiedades superiores en resistencia mecánica y dureza en comparación con polímeros como el UHMW y el Teflón, aunque destacan en otras propiedades como la baja fricción, no igualan su desempeño en aplicaciones de alta carga. Así, el Empack N-6 es claramente superior en términos de resistencia mecánica frente al UHMW y al Teflón.

4.3. Coeficiente de fricción y desgaste

En el ensayo de pin on disk para realizar las pruebas de resistencia al desgaste no abrasivo y del coeficiente de fricción en los polímeros seleccionados bajo la norma ASTM G99-23 se realizaron los siguientes cálculos para la selección del polímero adecuado. El peso de carga aplicada que se usa en materiales blandos como los polímeros oscila entre 1 [N] y 20 [N], en el caso de esta investigación se empleó una carga de 10 [N] en todas las pruebas, ya que una carga mayor provocaba la fractura de las probetas.

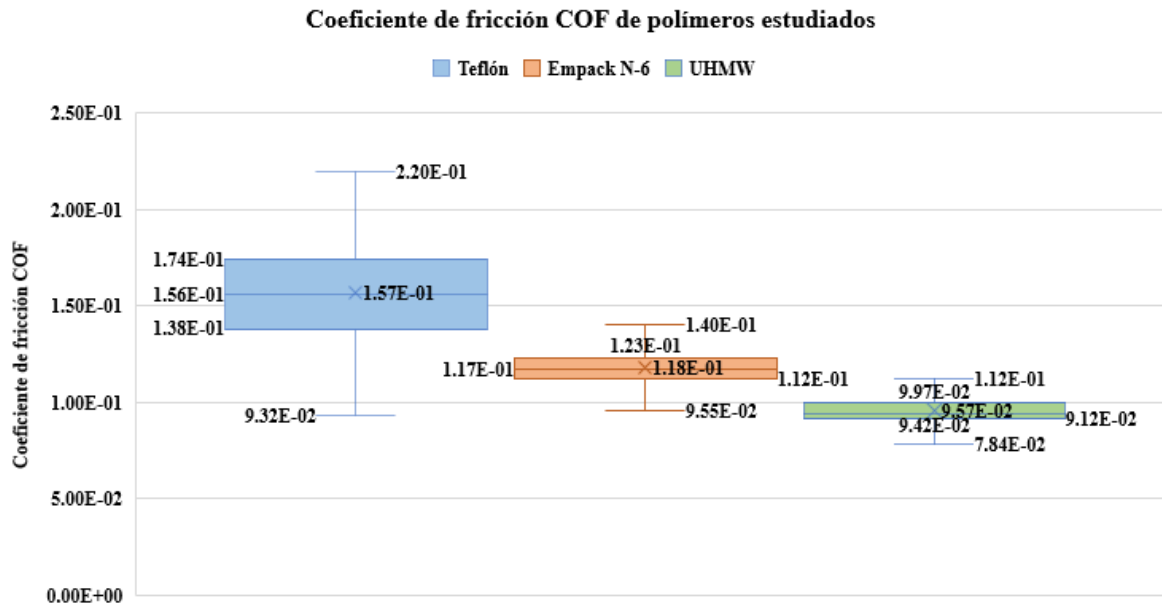
Por otro lado, en la Figura 13 se aprecia que el teflón presenta el mayor rango de variabilidad en su coeficiente de fricción (COF), con una media de 0,1571, indicando un comportamiento menos predecible. El Empack N-6 presenta una media de 0,1178, con menor dispersión, lo que sugiere un desempeño más uniforme en términos de resistencia al deslizamiento. Finalmente, el UHMW registra el valor promedio más bajo con 0,0957, lo que refleja una excelente capacidad de reducción de fricción.

Al comparar estos resultados, se observa que el UHMW reduce el COF en un 39,1 % respecto al teflón y en un 18,8 % frente al Empack N-6. A su vez, el Empack N-6 presenta un 25,1 % menos de fricción que el teflón. Estos resultados permiten concluir que tanto el Empack

N-6 como el UHMW son materiales más eficientes en términos de fricción, siendo especialmente el UHMW el más adecuado para aplicaciones en las que se busca minimizar la resistencia al movimiento, como en bandas transportadoras del sector alimenticio.

Figura 13.

Gráfico de cajas y bigotes de coeficiente de fricción de los polímeros



4.3.1. Pruebas de coeficiente de fricción de los polímeros

El coeficiente de fricción estático del teflón oscila entre 0,04 y 0,1, según la tabla de propiedades proporcionada por el proveedor del material. Al analizar los datos obtenidos en la prueba, se observa que los resultados son consistentes con este rango.

$$\mu = \frac{87504,9}{563,9} = 1,55 \times 10^{-1} \quad (6)$$

El coeficiente de fricción estático del Empack N-6 se encuentra en un rango de 0,1 a 0,3, según la tabla de propiedades proporcionada por el proveedor del material. Al analizar los resultados obtenidos en la prueba, se observa que el valor experimental de $1,18 \times 10^{-1}$ [N]. Este

Este resultado reafirma la idoneidad del Empack N-6 para aplicaciones que requieren un equilibrio entre baja fricción y estabilidad mecánica.

$$\mu = \frac{71556,23}{604,65} = 1,18 \times 10^{-1} \quad (7)$$

El coeficiente de fricción del UHMW obtenido en la prueba fue de $9,34 \times 10^{-2}$ [N]. Este resultado confirma la capacidad del UHMW para reducir la resistencia al deslizamiento, lo que lo hace ideal para aplicaciones donde la baja fricción es un requisito fundamental, como en guías de deslizamiento, transportadores y piezas sometidas a movimiento constante. Su desempeño sugiere que el material no solo es eficiente en la reducción de desgaste por fricción, sino que también contribuye a una mayor vida útil de los componentes en los que se utiliza.

$$\mu = \frac{43007,08}{460,65} = 9,34 \times 10^{-2} \quad (8)$$

4.3.2. Pruebas de desgaste no abrasivo

Los resultados muestran un desgaste de $1,89 \times 10^{-4}$ cm², lo que representa el 0,034% del área de contacto inicial, confirmando que la cantidad de material perdido es mínima. Este resultado concuerda con las propiedades intrínsecas del Teflón, ya que es reconocido por su estructura molecular altamente cristalina y su bajo nivel de adhesión superficial, características que le otorgan una notable resistencia al desgaste y un coeficiente de fricción muy bajo.

$$W = \frac{55,67 - 55,47}{0,93 * 1117,38} = 1,89 \times 10^{-4} \text{ [cm}^3/\text{m]} \quad (9)$$

Por otra parte, el resultado obtenido correspondiente al desgaste volumétrico, $2,11 \times 10^{-1}$ cm³/m, equivale a un 0,21% del volumen inicial, corrobora que la pérdida de material es mínima, lo que respalda la conocida resistencia al desgaste del teflón. Esto refuerza su capacidad

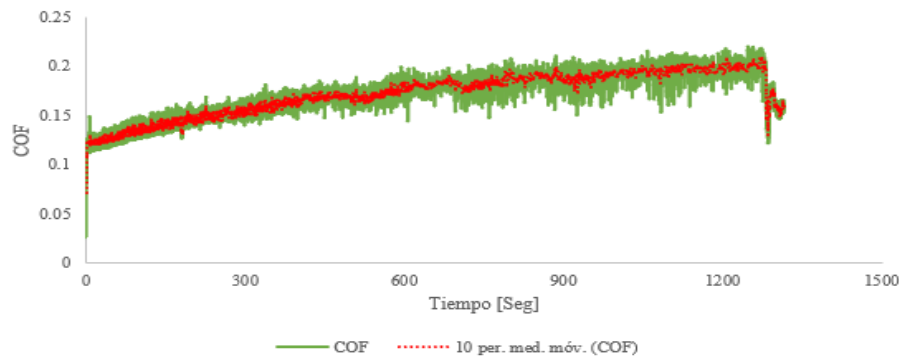
en aplicaciones donde es importante minimizar la fricción y garantizar una larga vida útil, como en superficies deslizantes o componentes sometidos a un uso constante.

$$V = \frac{55,67 - 55,47}{0,93} = 2,11 \times 10^{-1} [\text{cm}^3] \quad (10)$$

La Figura 14 muestra el comportamiento del COF a lo largo del tiempo, evidenciando la tendencia del material a incrementar su fricción conforme avanza la prueba, este análisis conjunto de las variables permite comprender mejor el desempeño tribológico del Teflón.

Figura 14.

Evolución del coeficiente de fricción del teflón durante la prueba de desgaste



La línea verde representa el valor instantáneo del coeficiente de fricción en función del tiempo, mientras que la línea roja punteada muestra el promedio móvil de diez períodos, utilizado para suavizar las variaciones bruscas y visualizar de manera más clara la tendencia general del material durante la prueba. El aumento del coeficiente de fricción se da porque el desgaste progresivo del teflón genera partículas de material que alteran la textura de la superficie, incrementando la fricción. Además, debido al calor generado por la fricción continua, el material puede experimentar una plastificación localizada, es decir, un reblandecimiento de la matriz polimérica, que aumenta el área real de contacto y, con ello, la fricción. Alternativamente, en algunas regiones, la repetición de esfuerzos mecánicos también podría inducir endurecimiento por deformación, aunque en polímeros como el teflón este efecto es menos común. En conjunto, el

aumento del COF se debe a la interacción de la generación de residuos, el reblandecimiento térmico y la evolución natural de la superficie de contacto a lo largo de la prueba (Briscoe & Stolarski, 2021).

El comportamiento de la fricción en los polímeros durante una prueba de desgaste suele presentar dos fases características: un aumento progresivo de la fricción, seguido de una caída abrupta.

Durante las primeras etapas de la prueba, el material experimenta un desgaste inicial, lo que provoca la generación de partículas o polvo de polímero en la superficie de contacto. Estas partículas pueden acumularse y formar una capa de residuos que aumenta el coeficiente de fricción, dificultando el deslizamiento y generando una especie de rugosidad superficial (Briscoe & Stolarski, 2021).

Inicialmente, el material conserva su comportamiento mecánico habitual, pero con el tiempo, el calor generado por la fricción puede provocar reblandecimiento o fusión parcial lo que da lugar a una superficie más lisa. (Bahadur & Tabor, 1984).

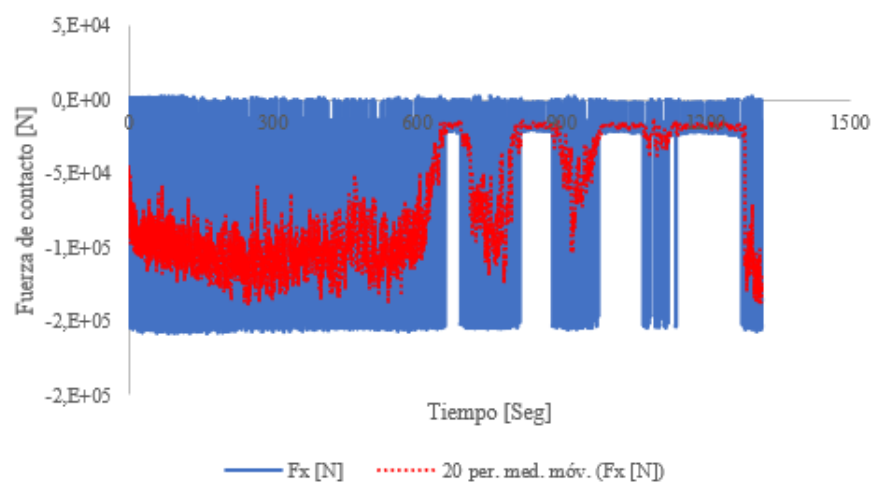
Otro factor que influye es la estabilización de la superficie de contacto. Durante las primeras fases de la prueba, las superficies pueden no estar completamente lisas, debido al proceso de preparación de superficie, lo que genera variación en la fricción. Sin embargo, con el tiempo, el sistema puede alcanzar un estado de equilibrio, en el cual la cantidad de material desgastado es suficiente para reducir la resistencia al deslizamiento y estabilizar la fricción en niveles más bajos (Ravikiran et al., 2020). El comportamiento de la fricción en los polímeros durante el desgaste responde a una combinación de factores físicos y mecánicos, como la acumulación de partículas, la formación de capas de transferencia, lo que explica tanto el aumento progresivo del coeficiente de fricción.

En la Figura 15 la tendencia general y descensos abruptos, después de aproximadamente 600 segundos, se identifican caídas abruptas en la fuerza de contacto. Esto podría deberse a la acumulación de material de desgaste o a una pérdida momentánea de contacto entre las superficies, lo cual no afecta la estabilidad del coeficiente de fricción (Hutchings & Shipway, 2017). La media móvil (curva roja) suaviza estas fluctuaciones y revela una tendencia general de disminución en la fuerza con el tiempo.

En esta prueba la línea azul representa la fuerza de contacto medida en tiempo real durante toda la prueba, mientras que la línea roja muestra el promedio móvil cada veinte puntos. A medida que avanza la prueba, se observa una variación progresiva de la fuerza, lo que sugiere un cambio en la respuesta mecánica del material. Este comportamiento puede atribuirse a fenómenos típicos de los polímeros sometidos a fricción continua, como la plastificación localizada debida al aumento de temperatura por fricción, que reduce temporalmente la rigidez superficial. También es posible que en ciertas etapas se genere un endurecimiento por deformación, donde la repetición de esfuerzos lleva a un reordenamiento molecular que incrementa la resistencia mecánica.

Figura 15.

Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del teflón



La fase de asentamiento y variabilidad inicial, en esta etapa de la prueba, se observa una alta variabilidad en la fuerza de contacto, lo que indica un período de asentamiento del material en la superficie del disco. Este comportamiento es común en ensayos tribológicos, ya que el contacto entre las superficies aún no se ha estabilizado completamente (Bhushan, 2013).

El resultado obtenido en la prueba de desgaste para el Empack N-6 arrojó un valor de $1,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$, lo que indica que el desgaste registrado representa aproximadamente un 0,093% del área original sometida a prueba la cual está dentro del límite esperado para este tipo de polímero. Esto sugiere que el Empack N-6 posee una buena resistencia al desgaste, lo que lo convierte en una opción adecuada para aplicaciones que requieren alta durabilidad y bajo coeficiente de fricción en condiciones de trabajo exigentes.

$$W = \frac{28,59 - 28,56}{0,96 * 1631,74} = 1,5 \times 10^{-5} [\text{cm}^3/\text{m}] \quad (11)$$

En la prueba de desgaste volumétrico realizada al polímero Empack N-6, se obtuvo un valor de $2,40 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{m}$, lo que representa aproximadamente un 0,084% del volumen inicial, lo que confirma que el material mantiene un comportamiento de desgaste acorde con sus propiedades técnicas. Estos resultados reflejan la resistencia del Empack N-6 al desgaste volumétrico, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales donde se requiere alta durabilidad y estabilidad en condiciones de fricción.

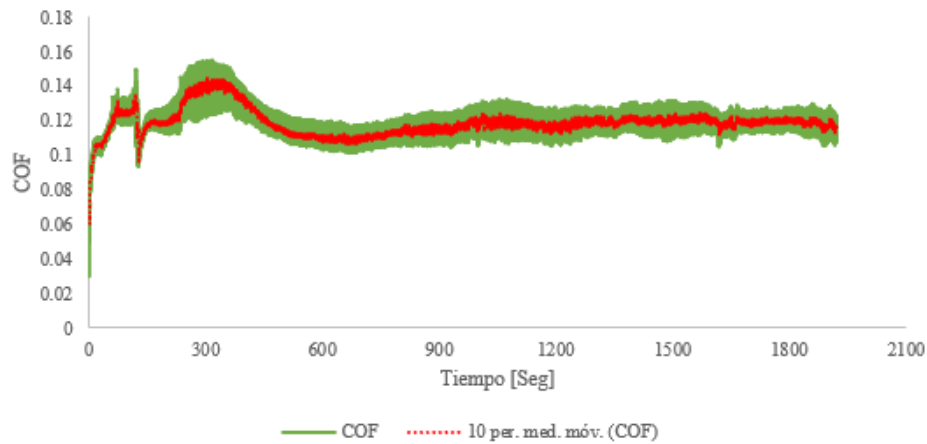
$$V = \frac{28,59 - 28,56}{0,96} = 2,40 \times 10^{-2} [\text{cm}^3] \quad (12)$$

La Figura 16 muestra cómo el COF experimenta fluctuaciones iniciales antes de estabilizarse progresivamente, lo que indica un proceso de asentamiento del material en contacto. Por otro lado, la Figura 17 evidencia cambios significativos en la fuerza de contacto, reflejando la

dinámica del sistema, la influencia de la rugosidad superficial y posibles eventos de pérdida momentánea de adherencia. El análisis conjunto de estas gráficas proporciona información de la resistencia al desgaste y el rendimiento del EMPACK N-6 en condiciones de fricción prolongada.

Figura 16.

Evolución del coeficiente de fricción del EMPACK N-6 durante la prueba de desgaste



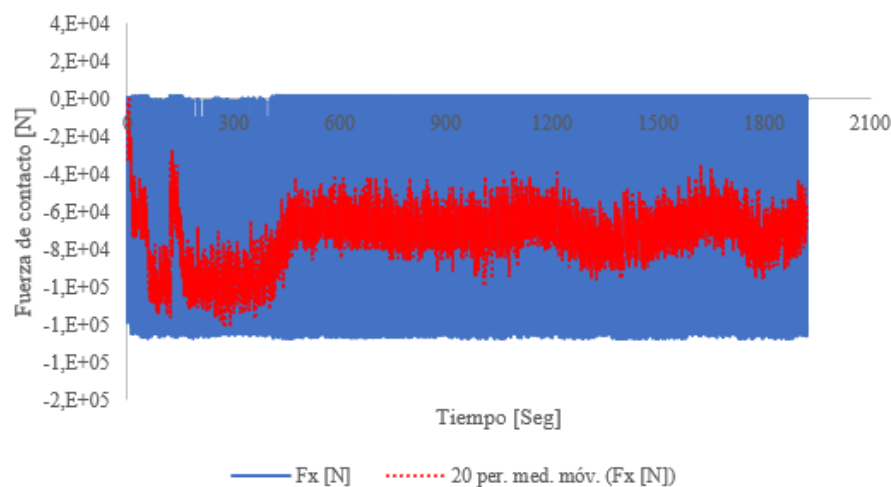
Se evidencia un comportamiento inicial de incremento rápido del coeficiente de fricción, seguido por una estabilización prolongada. Este aumento inicial puede explicarse por el asentamiento de las superficies de contacto, donde las irregularidades superficiales se nivelan bajo la acción mecánica, generando fricción adicional. Posteriormente, al alcanzar un estado más uniforme y estable en la interfase, el coeficiente de fricción tiende a mantenerse relativamente constante. Este comportamiento sugiere que el material EMPACK N-6, tras una primera etapa de acomodación, alcanza un equilibrio tribológico. Se observa una estabilización superficial típica de materiales con buena resistencia mecánica y a la fatiga, donde el desgaste genera una capa de transferencia que facilita un deslizamiento más uniforme y predecible a lo largo de la prueba.

El comportamiento del coeficiente de fricción (COF) del EMPACK N-6 durante la prueba de desgaste muestra una tendencia inicial de variabilidad pronunciada, lo que indica un período de asentamiento en el contacto entre las superficies. Durante los primeros 300 segundos, se observan

fluctuaciones significativas en el COF, posiblemente debido a la adaptación del material y la formación inicial de una película de transferencia. Posteriormente, el coeficiente de fricción tiende a estabilizarse en torno a un valor constante, con pequeñas oscilaciones que podrían estar asociadas a la rugosidad superficial y la interacción con partículas desprendidas durante la prueba. La línea roja, que representa el promedio móvil de 10 periodos, refleja esta tendencia general (Briscoe & Stolarski, 2021), indicando que el EMPACK N-6 mantiene un comportamiento estable a lo largo del tiempo, lo cual es un factor clave en su desempeño tribológico.

Figura 17.

Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del Empack N-6



Al inicio la fuerza de contacto fluctúa considerablemente, lo cual es característico de la etapa de asentamiento entre las superficies (Bhushan, 2013). Conforme avanza la prueba, las fluctuaciones disminuyen y la fuerza se estabiliza, indicando que el material desarrolla una respuesta más uniforme. Según Stachowiak y Batchelor (1993), esta estabilización puede deberse a un fenómeno de endurecimiento por deformación: el material, al ser sometido a esfuerzos repetidos, incrementa localmente su resistencia, mejorando su capacidad de soportar cargas sin deformarse excesivamente. El comportamiento observado apunta que el EMPACK N-6 desarrolla

una superficie más consolidada y resistente a medida que avanza el ensayo, favoreciendo un contacto más estable y controlado.

Se observa una serie de fluctuaciones que reflejan la compleja interacción entre las superficies en contacto durante la prueba de desgaste. En los primeros instantes, se observó una caída abrupta en la fuerza, lo que podría estar asociado con la fase de asentamiento y el ajuste inicial del material. A medida que avanzó la prueba, la fuerza tiende a estabilizarse con fluctuaciones moderadas, indicativas de la formación y posible ruptura de la película de transferencia. Sin embargo, la presencia de variaciones bruscas apunta momentos de pérdida de adherencia o deslizamiento intermitente (stick-slip), un fenómeno común en procesos tribológicos (Stachowiak y Batchelor, 1993). La curva de promedio móvil en rojo ayuda a visualizar una tendencia más clara, mostrando que, si bien la fuerza varía, sigue un patrón relativamente estable con el tiempo. Estos resultados permiten comprender mejor el desempeño del EMPACK N-6 bajo condiciones de fricción y desgaste, brindando información clave para su aplicación en entornos donde la estabilidad de la fuerza es un factor determinante.

El desgaste del UHMW se evaluó comparando la masa del material antes y después de la prueba, considerando la carga aplicada y la distancia de deslizamiento. El resultado obtenido, $7,2 \times 10^{-5} \text{cm}^2$, representa aproximadamente un $2,5 \times 10^{-4} \%$ del volumen original del material, lo que indica una pérdida de material mínima, lo que confirma la alta resistencia al desgaste de este polímero. Este comportamiento refuerza su capacidad en aplicaciones donde se requiere alta durabilidad y un desempeño óptimo en condiciones de fricción constante.

$$W = \frac{25,42 - 25,32}{0,93 * 1601,59} = 7,2 \times 10^{-5} \text{ [cm}^3/\text{m]} \quad (13)$$

El análisis del desgaste volumétrico del UHMW se realizó midiendo la diferencia de masa antes y después de la prueba, ajustándola según la densidad del material. El valor obtenido,

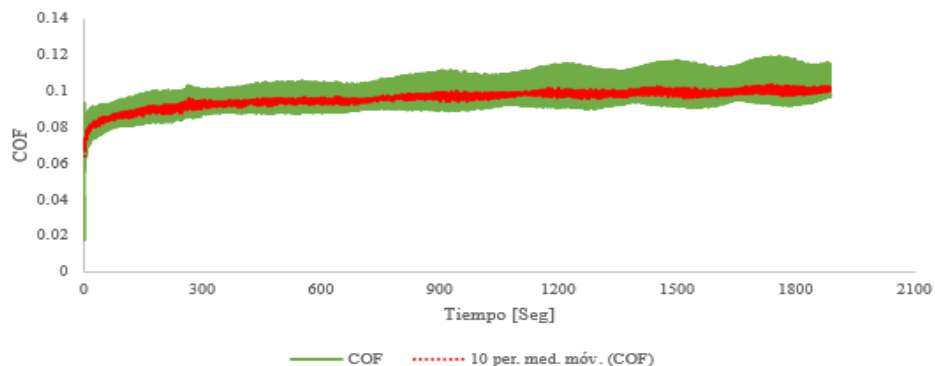
$1,15 \times 10^{-1} \text{ cm}^3/\text{m}$, con un porcentaje de $4 \times 10^{-3} \%$ de su volumen original, indicando una poca pérdida de material y confirmando la excelente resistencia al desgaste de este polímero. Estas propiedades hacen del UHMW una opción ideal para aplicaciones donde se requiere minimizar la fricción y garantizar una larga vida útil, como en componentes sometidos a uso constante y condiciones de alta exigencia.

$$V = \frac{25,427 - 25,32}{0,93} = 1,15 \times 10^{-1} [\text{cm}^3] \quad (14)$$

En las Figura 18 y Figura 19 se observa el comportamiento del UHMW a lo largo del tiempo, reflejando cómo su coeficiente de fricción (COF) evoluciona de manera progresiva, estabilizándose tras una fase inicial de asentamiento. Paralelamente, la fuerza de contacto (F_x) muestra fluctuaciones constantes, evidenciando los esfuerzos a los que el material es sometido durante la prueba.

Figura 18.

Evolución del coeficiente de fricción del UHMW durante la prueba de desgaste



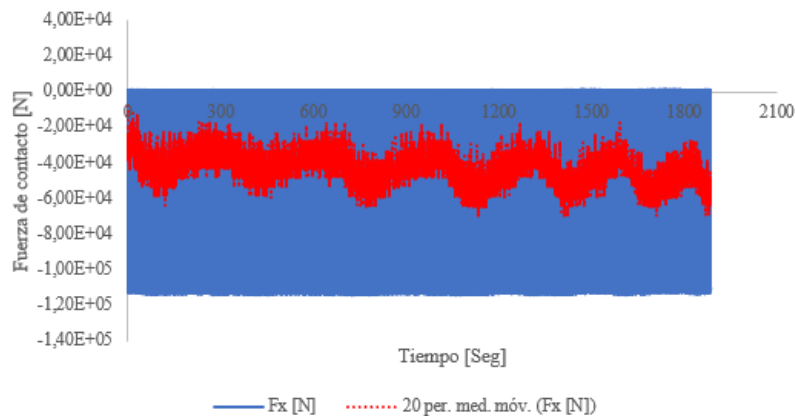
Se observó un incremento moderado del coeficiente de fricción lo que quiere decir que la superficie del polímero sufrió un ajuste inicial por desgaste y compactación de material. Según Stachowiak y Batchelor (1993), este aumento gradual pudo deberse a un endurecimiento superficial por deformación plástica localizada, donde las zonas sometidas a mayor esfuerzo se

tornaron más resistentes, estabilizando así la fricción en niveles ligeramente superiores pero constantes.

El comportamiento del coeficiente de fricción (COF) del UHMW durante la prueba de desgaste reflejó una fase inicial de asentamiento en la que el COF aumentó rápidamente, seguida de una estabilización progresiva a lo largo del tiempo. Según Bhushan (2013), tras un breve periodo de adaptación, el material mantuvo una fricción relativamente constante, lo que indica una buena resistencia al desgaste y una capacidad de autolubricación efectiva. La dispersión observada en la curva indica fluctuaciones menores debido a la interacción entre la superficie del material y las condiciones de contacto, lo que es común en pruebas de fricción prolongadas (Stachowiak & Batchelor, 1993). Estos resultados refuerzan el uso del UHMW en aplicaciones donde se requiere baja fricción y alta durabilidad.

Figura 19.

Variación de la fuerza de contacto en el tiempo durante la prueba de desgaste del UHMW



La fuerza de contacto se mantiene relativamente estable con ligeras variaciones, mostrando una interacción mecánica consistente entre las superficies. Según Dowson y Higginson (1977), las fluctuaciones moderadas pueden atribuirse a la generación de micro deformaciones y compactación progresiva del material, lo que conlleva a un endurecimiento superficial leve por

deformación plástica, sin evidencia de plastificación masiva. Esto explica por qué la fuerza de contacto no disminuye abruptamente, sino que conserva un patrón oscilante y controlado.

En la fase inicial de la prueba, se observaron cambios bruscos que según Bhushan (2013), pueden deberse a la adaptación del material y a la conformación de la superficie en contacto. A medida que avanza la prueba, la fuerza tiende a estabilizarse con oscilaciones periódicas, lo que sugiere un régimen de desgaste progresivo pero controlado.

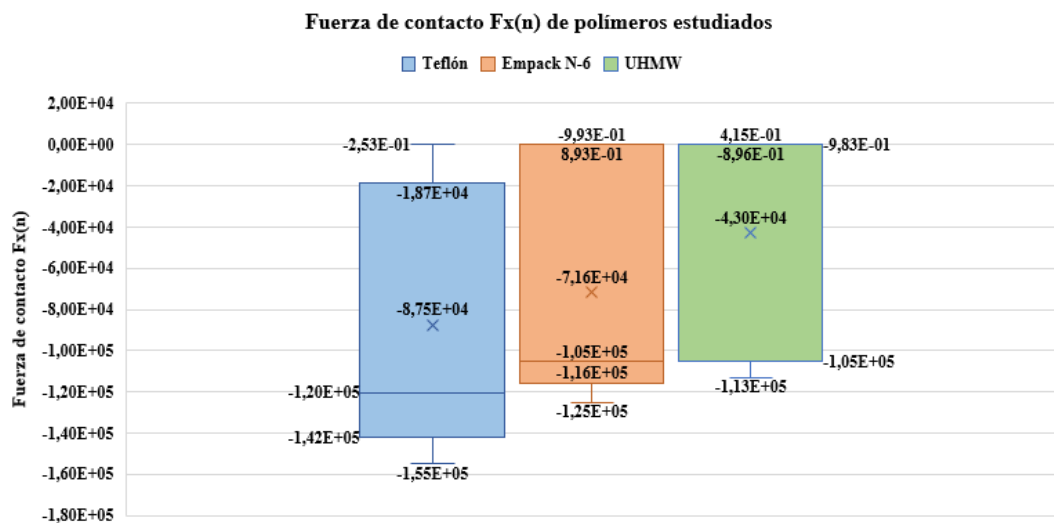
Al analizar estos resultados, es fundamental recordar que el desempeño tribológico de un material no solo depende de sus propiedades intrínsecas, sino también de factores externos que pueden influir en las mediciones. La planicidad de la geometría juega un papel crucial, ya que cualquier irregularidad puede alterar la distribución de fuerzas y afectar la precisión de los datos obtenidos. Asimismo, los sistemas de agarre utilizados en las pruebas deben garantizar una fijación estable para evitar deslizamientos o movimientos no deseados que puedan distorsionar los resultados. Además, es importante considerar si la estimación de desgaste se realiza en un entorno controlado o si proviene del deterioro progresivo del material en condiciones reales de uso. Estos factores deben ser tenidos en cuenta para interpretar adecuadamente los valores obtenidos y tomar decisiones acertadas en la selección del polímero más adecuado para cada aplicación.

La Figura 20 ofrece una visión clara y comparativa de la fuerza de contacto (F_x) la cual es la componente de fuerza generada por el contacto en la superficie en los polímeros estudiados. Se observa que el teflón experimentó las fuerzas de contacto más extremas, con un promedio de $-87,50 \times 10^4$ N y un rango de variabilidad considerablemente amplio, lo que indica una respuesta menos estable bajo las condiciones de prueba. En contraste, el Empack N-6 mostró una distribución más concentrada, con una fuerza promedio de $-7,16 \times 10^4$ N, lo que sugiere un

comportamiento más predecible y uniforme. Esta diferencia representa una reducción del 18,2 % en comparación con el Teflón. Por otro lado, el UHMW presentó valores intermedios con un promedio de $-4,30 \times 10^4$ N, lo que representa una diferencia de 50,8 % con respecto al teflón y un 39,9 % menos que el Empack N-6, reflejando así un desempeño más controlado en términos de fuerza de contacto. Estos resultados permitieron evaluar la resistencia y estabilidad de cada material en condiciones de fricción.

Figura 20.

Gráfico de cajas y bigotes de fuerza de contacto de los polímeros



Diversos estudios han corroborado que las propiedades tribológicas de los polímeros, como el coeficiente de fricción (COF) y la resistencia al desgaste, están estrechamente relacionadas con su dureza y estructura molecular. Los resultados obtenidos en cuanto a la fuerza de contacto y resistencia al desgaste de los polímeros analizados pueden justificarse a partir de la dureza intrínseca de cada material. Como lo indica Budinski y Budinski (2010), los materiales con menor dureza tienden a exhibir un coeficiente de fricción más bajo debido a su capacidad de deformarse plásticamente, lo cual reduce la energía disipada por fricción. Este comportamiento se observa en el UHMW, cuya baja dureza favorece una menor fuerza de contacto, alineándose con lo reportado

por Friedrich y Schlarb (2008), quienes encontraron que los polímeros semicristalinos como el UHMW muestran excelente desempeño tribológico en condiciones de carga media. En contraste, el teflón, a pesar de tener buena resistencia química y un bajo coeficiente de fricción, presenta una variabilidad significativa en la fuerza de contacto, posiblemente atribuida a su menor dureza y cohesión interna. Asimismo, el Empack N-6 demostró un comportamiento más predecible, lo que coincide con los hallazgos de Wypych (2016), quien resalta que la poliamida 6 presenta una buena combinación de dureza y resistencia al desgaste, haciéndola ideal para aplicaciones donde se busca durabilidad sin comprometer estabilidad.

4.4. Scratch test

En el ensayo de Pin on disk para realizar las pruebas de resistencia al rayado bajo el ensayo de Scratch test en los polímeros seleccionados bajo la norma ASTM D7027 se realizaron los siguientes cálculos para la selección del polímero adecuado.

4.4.1. Fuerza crítica de rayado de los polímeros

Los datos obtenidos en esta prueba para los tres polímeros (Teflón, UHMW y Empack N-6) resultaron ser iguales debido a que se les aplicó la misma fuerza en la misma área de rayado, lo que garantizó que las condiciones experimentales fueran consistentes para los materiales. La fuerza crítica de rayado de 6,20 [N/cm²] para los tres polímeros indica que presentan una resistencia similar al rayado, lo que implica que pueden soportar fuerzas externas sin experimentar daños superficiales significativos. Según Hutchings y Shipway (2017), este comportamiento es notable en aplicaciones donde los materiales están sujetos a desgaste constante, como en bandas transportadoras, donde la resistencia al rayado y la fricción es crucial para asegurar la durabilidad y el rendimiento de las piezas en contacto continuo. La similitud en los resultados refleja que, bajo

las mismas condiciones de prueba, los tres polímeros reaccionan de manera comparable ante la acción de un agente que intenta generar un surco en su superficie.

4.4.2. *Desgaste por rayado de los polímeros*

El desgaste por rayado del Teflón, con un valor de $3,35 \times 10^{-10}$ [cm²/N], indica la cantidad de material que se pierde cuando es sometido a una fuerza determinada. Este resultado confirma que, que el teflón presenta una notable resistencia al rayado, incluso en condiciones de contacto prolongado. A pesar de que, con el tiempo, puede presentar algún grado de desgaste superficial, su estructura molecular altamente estable y su bajo coeficiente de fricción lo hacen especialmente apto para aplicaciones donde se requiere minimizar la fricción y maximizar la durabilidad.

$$K = \frac{0,21}{563.994 \times 1117,39} = 3,35 \times 10^{-10} [\text{cm}^2/\text{N}] \quad (15)$$

El resultado calculado para el EMPACK N-6 fue de $2,43 \times 10^{-11}$ [cm²/N] lo que indica una alta resistencia al desgaste superficial bajo condiciones de carga prolongada. El bajo desgaste del polímero indica un buen desempeño frente al rayado y la fricción, desarrollando una superficie estable y resistente al daño mecánico. Esto lo hace ideal para aplicaciones donde se requiere durabilidad y bajo desgaste, como en sistemas de transporte o bajo cargas repetitivas.

$$K = \frac{0,02}{604.652 \times 1631,74} = 2,43 \times 10^{-11} [\text{cm}^2/\text{N}] \quad (16)$$

Para el caso del UHMW según el resultado obtenido representa un nivel bajo de pérdida de material bajo condiciones de carga y fricción prolongadas. Este valor indica que el UHMW presenta una buena resistencia al rayado, atribuida a su alta tenacidad y a su capacidad para absorber impactos sin fracturarse. Si bien su tasa de desgaste es mayor que la del EMPACK N-6, se mantiene dentro de rangos aceptables para aplicaciones industriales exigentes.

$$K = \frac{0,11}{460.651 \times 1601,59} = 1,56 \times 10^{-10} [\text{cm}^2/\text{N}] \quad (17)$$

Con base en los resultados obtenidos se concluye que el EMPACK N-6 presenta el mejor desempeño frente al desgaste superficial, evidenciando una mayor resistencia al rayado y una superficie más estable bajo condiciones de carga prolongada. El UHMW también mostró un buen comportamiento, destacándose por su capacidad de absorción de impactos y su resistencia mecánica, aunque con una tasa de desgaste ligeramente superior. Por su parte, el teflón, si bien ofrece un bajo coeficiente de fricción y una estructura molecular estable, fue el material que presentó mayor pérdida relativa de material. Finalmente, estos resultados aprueban que el EMPACK N-6 es la opción más adecuada para aplicaciones que requieren alta durabilidad, bajo desgaste y eficiencia en condiciones de fricción continua.

4.5. Análisis de polímeros basado en prueba de desgaste y resistencia al rayado.

En la Tabla 2 se presenta un análisis comparativo de los tres polímeros de uso comercial Teflón, Empack N-6 y UHMW evaluando su coeficiente de fricción, desgaste, desgaste volumétrico y resistencia al rayado. Estos parámetros permiten comprender el comportamiento de cada material bajo condiciones de fricción y carga, lo que resulta clave para determinar el rendimiento en bandas transportadoras en la industria alimenticia.

Para aplicaciones en bandas transportadoras, es clave interpretar correctamente cada parámetro. Un coeficiente de fricción bajo, así como menores valores de desgaste superficial y volumétrico, indican mayor eficiencia y durabilidad. En cambio, una fuerza crítica de rayado alta refleja mejor resistencia al daño, y un desgaste por rayado bajo señala mayor protección frente a esfuerzos mecánicos. Esta evaluación facilita la elección del material más adecuado según la exigencia del uso.

Tabla 2.*Comparación de polímeros con base al desgaste y resistencia al rayado*

Polímero	Mejor cuando el valor es más bajo				Mejor cuando el valor es más alto
	Coefficiente de fricción	Desgaste [cm ²]	Desgaste volumétrico [cm ³]	Desgaste por rayado [cm ² /N]	Fuerza crítica de rayado [N/cm ²]
TEFLÓN	$1,55 \times 10^{-1}$	$1,89 \times 10^{-4}$	$2,11 \times 10^{-1}$	$3,35 \times 10^{-10}$	6,2
EMPACK N-6	$1,18 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$2,40 \times 10^{-2}$	$2,43 \times 10^{-11}$	6,2
UHMW	$9,34 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-5}$	$1,15 \times 10^{-1}$	$1,56 \times 10^{-10}$	6,2

A partir de los resultados obtenidos en la comparación de los polímeros evaluados, se concluye que el UHMW presenta el menor coeficiente de fricción ($9,34 \times 10^{-2}$), siendo superior al Empack N-6 y al teflón en términos de reducción de resistencia al movimiento y eficiencia energética. Sin embargo, en el análisis de desgaste volumétrico, el teflón mostró la menor pérdida de material ($2,11 \times 10^{-1} \text{ cm}^3$), superando tanto al UHMW como al Empack N-6, lo que confirma su reconocida resistencia al desgaste, como se señala en el Handbook of Polymers de Wypych (2016), donde se describe al teflón (PTFE) como uno de los materiales con menor coeficiente de desgaste en aplicaciones de fricción continua. Por otro lado, el Empack N-6, a pesar de tener un coeficiente de fricción intermedio, presentó el menor desgaste superficial ($1,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$), mostrando mejor desempeño que el UHMW y el teflón en condiciones de contacto superficial prolongado, en línea con lo investigado por Biron (2018) en su estudio de poliamidas, donde se destaca la resistencia al desgaste de los polímeros base Nylon.

En cuanto a la resistencia al rayado, aunque los tres materiales mostraron valores similares en fuerza crítica ($6,2 \text{ N/cm}^2$), el teflón registró el menor desgaste por rayado ($3,3 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{N}$), confirmando su capacidad de mantener la integridad superficial frente a cargas puntuales. Otro estudio relevante es la investigación Tribología con énfasis en polímeros: fricción, resistencia al rayado y al desgaste (Brostow, 2003). Su revisión fue importante porque proporciona bases fundamentales sobre la tribología en la ciencia de materiales, específicamente aplicada a polímeros, además de explicar metodologías para determinar la fricción estática y dinámica. El estudio de Brostow respalda que los polímeros evaluados son viables para reducir significativamente los coeficientes de rayado y desgaste, fortaleciendo así la elección de materiales como el Empack N-6, el UHMW y el teflón según las condiciones de operación.

Por tanto, en una evaluación integral, el UHMW es el mejor para minimizar fricción, el teflón sobresale en resistencia al rayado y desgaste volumétrico, y el Empack N-6 destaca en minimizar el desgaste superficial, siendo la selección del material dependiente de las necesidades específicas de la aplicación industrial.

Como se observó en los resultados experimentales, los polímeros Teflón, Empack N-6 y UHMW presentan comportamientos tribológicos diferenciados en términos de fricción y desgaste. El teflón exhibió un coeficiente de fricción notablemente bajo, característico de su estructura molecular altamente inerte, tal como reporta Bhushan (2013), aunque también mostró una mayor propensión al desgaste, en concordancia con lo mencionado por Hutchings (1992). Por su parte, el Empack N-6 presentó una resistencia mecánica elevada y un desempeño intermedio en fricción, resultado que coincide con lo descrito por Zmitrowicz (2006) respecto a polímeros basados en nylon modificados. Finalmente, el UHMW destacó por su alta resistencia al desgaste y un coeficiente de fricción superior, corroborando estudios de Briscoe y Sinha (2002) que atribuyen

este comportamiento a su elevada cristalinidad y robustez estructural. Estos patrones de comportamiento proporcionan una base sólida para la comparación detallada que se realiza a continuación.

El análisis tribológico de los polímeros de uso comercial Teflón, Empack N-6 y UHMW permitió evaluar sus propiedades de fricción y desgaste bajo condiciones controladas. Los resultados obtenidos se comparan con estudios previos para contextualizar su desempeño y aplicaciones en la industria.

Estudios previos han reportado que el teflón presenta un coeficiente de fricción extremadamente bajo debido a su estructura molecular que minimiza las interacciones intermoleculares (Bhushan, 2013). Los resultados de este estudio confirman dicha propiedad, observándose un coeficiente de fricción inferior al de los otros polímeros evaluados. Sin embargo, se detectó un desgaste significativo, lo cual concuerda con investigaciones previas que indican que la debilidad mecánica del teflón puede limitar su uso en aplicaciones de alta carga (Hutchings, 1992).

En el caso del Empack N-6, los ensayos mostraron un comportamiento intermedio en términos de fricción y desgaste. Investigaciones previas han demostrado que el Empack N-6 presenta una mayor resistencia mecánica y un coeficiente de fricción superior al del Teflón, pero menor que el del UHMW (Zmitrowicz, 2006). Estos hallazgos se alinean con los obtenidos en este estudio, donde el Empack N-6 mostró una buena resistencia al desgaste en comparación con el Teflón, aunque con un coeficiente de fricción levemente mayor. Esto apunta que es una opción viable para aplicaciones donde se requiera una mayor resistencia mecánica sin comprometer en exceso la fricción.

El UHMW demostró una notable resistencia al desgaste, corroborando estudios anteriores que destacan su estructura altamente cristalina y su capacidad para resistir condiciones abrasivas (Briscoe y Sinha, 2002). Los resultados indican que este polímero tiene el coeficiente de fricción más alto entre los evaluados, lo que se puede atribuir a su mayor rigidez molecular y a la interacción con las superficies de contacto. A pesar de ello, su durabilidad lo hace idóneo para aplicaciones en las que se requiera una baja tasa de desgaste, como en componentes de transporte y maquinaria industrial.

Los resultados obtenidos en este estudio están en concordancia con la literatura revisada y destacan la importancia de seleccionar el polímero adecuado según la aplicación industrial específica. Si bien el teflón es óptimo para reducir la fricción, su desgaste acelerado puede ser una limitante. El Empack N-6 ofrece un balance entre fricción y resistencia mecánica, mientras que el UHMW sobresale en términos de durabilidad a costa de un mayor coeficiente de fricción.

Tabla 3.

Comparación de polímeros y pruebas para bandas transportadoras

Polímero	Dureza	Resistencia al desgaste	Resistencia al rayado
Teflón	Baja	Baja	Media
UHMW	Media	Media	Media
Empack N-6	Alta	Alta	Media

Con base en los resultados expuestos en la Tabla 3 se observa que el teflón presenta baja dureza y resistencia al desgaste, lo cual limita su rendimiento en aplicaciones donde existe fricción o contacto constante. A pesar de ello, su resistencia media al rayado y su reconocido bajo coeficiente de fricción (Wypych, 2016) pueden ser ventajosos en entornos donde se priorice el deslizamiento y la resistencia química por encima de la resistencia mecánica. Este comportamiento

es típico del teflón, un material ampliamente utilizado en aplicaciones donde se requiere antiadherencia o exposición a agentes químicos agresivos.

En contraste, el Empack N-6, clasificado como un polímero de alta dureza y con alta resistencia al desgaste, destaca como el material más robusto del grupo, especialmente útil en sistemas de transporte sometidos a cargas elevadas o ciclos repetitivos de uso. Su desempeño coincide con las propiedades descritas por Biron (2018), quien señala que las poliamidas, como el Nylon 6 base del Empack N-6, ofrecen excelentes prestaciones mecánicas y resistencia a la abrasión. Aunque su resistencia al rayado es media, similar a la del teflón, sigue siendo adecuada para la mayoría de las aplicaciones industriales y lo convierten en una opción adecuada para bandas transportadoras sin exigencia extrema de contacto puntual.

Por otro lado, el UHMW se posiciona como una opción equilibrada, con dureza media, resistencia media al desgaste y al rayado, lo que lo hace ideal en contextos donde se requiere un buen compromiso entre desempeño mecánico y deslizamiento eficiente. Su coeficiente de fricción y resistencia al rayado, descritos también por Brinson (2015) permiten un buen desempeño en aplicaciones con fricción constante; sin embargo, estas propiedades no lo hacen adecuado para su uso en bandas transportadoras, donde se requieren otras características mecánicas más exigentes.

En función de las propiedades comparadas, el Empack N-6 representa la mejor alternativa para condiciones de alta fricción, carga y desgaste, gracias a su elevada dureza y resistencia mecánica. Para aplicaciones que requieren bajo coeficiente de fricción y buen deslizamiento, el UHMW se presenta como la opción más adecuada. Finalmente, el Teflón, aunque limitado en resistencia mecánica, puede ser útil en sistemas donde la resistencia química, baja adherencia y moderada resistencia al rayado sean más relevantes que la robustez estructural.

5. Conclusiones

El análisis comparativo de los polímeros evaluados mostró diferencias significativas en su comportamiento frente al desgaste, la fricción y el rayado. El UHMW destacó por presentar el coeficiente de fricción más bajo, siendo aproximadamente un 40 % inferior al del teflón y un 20 % menor que el del Empack N-6, lo que lo posicionó como un material favorable para aplicaciones donde se requiere minimizar la fricción y el calor generado por el deslizamiento.

En términos de desgaste, el UHMW mostró una pérdida de material cerca de un 60 % menor que el teflón, aunque ligeramente superior, en un 20 %, al Empack N-6. En cuanto al desgaste volumétrico, su desempeño es intermedio ya que perdió alrededor de un 45 % menos material que el teflón, pero casi un 80 % más que el Empack N-6, lo cual representa una limitación en condiciones de alta exigencia mecánica.

Por otro lado, la resistencia al rayado, evaluada mediante la fuerza crítica, fue similar entre los tres materiales, lo que indica que esta propiedad no varía significativamente con la composición del polímero en las condiciones ensayadas. Con respecto al desgaste por rayado, el UHMW muestra una tasa de pérdida de material por abrasión que es aproximadamente un 50 % menor que la del teflón, y aunque supera al Empack N-6 en este aspecto, sigue mostrando un desempeño competitivo frente a la abrasión. Estos resultados respaldan la elección del UHMW como una alternativa para aplicaciones industriales donde se priorizan propiedades como baja fricción, buena resistencia al desgaste y tolerancia al rayado, tanto superficial como volumétrico, ideal para aplicaciones de alta exigencia mecánica.

En general, los resultados obtenidos permiten concluir que el Empack N-6 se posiciona como la opción óptima para aplicaciones en bandas transportadoras, gracias a su alta dureza y

sobresaliente resistencia tanto al desgaste como al rayado superficial. Estas características lo convierten en un material altamente duradero y confiable en condiciones exigentes. Por otro lado, el UHMW ofrece un rendimiento equilibrado con propiedades medias en todos los parámetros evaluados, lo que puede ser conveniente para ciertos usos específicos. El teflón, aunque presenta una dureza y resistencia al desgaste más bajas, mantiene una resistencia media al rayado, ubicándose como una alternativa funcional pero menos robusta en comparación con el Empack N-6.

6. Recomendaciones

Futuras investigaciones podrían centrarse en la mejora de estos polímeros mediante la adición de refuerzos o modificaciones químicas para mejorar su comportamiento tribológico. Se recomienda profundizar en el análisis de los polímeros utilizados, considerando condiciones más específicas de operación y nuevas formulaciones que mejoren sus propiedades.

Dado que el estudio de polímeros es un campo en constante evolución, se sugiere realizar investigaciones adicionales en tres líneas específicas, como formulaciones para mejorar la resistencia mecánica de los polímeros, la evaluación en entornos reales de uso para validar su desempeño bajo condiciones de operación más exigentes y finalmente potenciar sus propiedades para obtener materiales más eficientes, duraderos y adaptables a necesidades industriales específicas.

Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing and Materials. (2020). *Standard test method for tensile properties of plastics* (ASTM D638). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- Archard, J. F. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2015). *ASTM D2240-15e1: Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2240-15E01>
- ASTM International. (2021). *Standard test methods for conveyor belts (ASTM D378)*. <https://doi.org/10.1520/f2114-02>
- Bahadur, S. y Tabor, D. (1984). El desgaste del politetrafluoroetileno relleno. *Desgaste: Revista internacional sobre la ciencia y la tecnología de la lubricación por fricción y el desgaste*, 98 , 1–13. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90213-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90213-8)
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de polímeros*. Universidad de Alicante. <https://doi.org/10.1016/b978-1-895198-50-8.50007-2>
- Bhushan, B. (2013). *Principles and Applications to Tribology*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118403020>
- Biron, M. (2018). *Thermoplastics and thermoplastic composites*. Elsevier.
- Brinson, H. F., & Brinson, L. C. (2015). Characteristics, applications and properties of polymers. En *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity* (pp. 57–100). Springer US.

- Briscoe, B. J., & Sinha, S. K. (2002). *Tribology of Polymeric Solids and Composites*. Elsevier.
<https://doi.org/10.1002/9780470017029.ch10>
- Briscoe, B. J., & Stolarski, T. A. (2021). Friction and wear of polymeric materials: Surface interactions and material transfer. *Wear*, 376-377, 1245-1260.
https://www.researchgate.net/publication/355453181_Friction_and_Wear_of_Polymers_and_Polymer_Composites
- Bucaille, J. L., Gauthier, C., Felder, E., & Schirrer, R. (2006). The influence of strain hardening of polymers on the piling-up phenomenon in scratch tests: Experiments and numerical modelling. *Wear: An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 260(7–8), 803–814. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.04.007>
- Budinski, K. G., & Budinski, M. K. (2010). *Engineering Materials: Properties and Selection* (9th ed.). Pearson.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Campo, E. A. (2008). Polymeric Materials and Properties. *Selection of Polymeric Materials*, 1–39. <https://doi.org/10.1016/b978-081551551-7.50003-6>
- Davis, J. R. (2004). *Tensile testing* (2nd ed.). ASM International.
- Dowson, D., & Higginson, R. (1977). *Elucidation of the Contact Mechanics of Lubricated Surfaces*. Tribology Series, 10, 29-46. [10.3390/lubricants8050051](https://doi.org/10.3390/lubricants8050051)
- Dumne, S. S., Rajiv, Dr. B., & Jaybhaye, Dr. M. D. (2022). Experimental Investigation of EN24 Steel Against OHNS Under Wet Sliding Conditions by Using Pin-On-Disc. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 1148–1158. <https://doi.org/10.46254/in02.20220345>

Friedrich, K., & Schlarb, A. K. (2008). *Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings*. Elsevier.

García, J. R., & López, R. (2017). *Properties and applications of engineering polymers*. Springer.

García, J. R., López, M. A., & Hernández, P. D. (2003). *Diseño y construcción de una máquina para ensayos de desgaste tipo espiga-disco* [Tesis de grado, Universidad de El Salvador].

Repositorio

Institucional

UES. https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1776/1/DISEÑO_Y_CONSTRUCCIÓN_DE_UNA_MÁQUINA_PARA_ENSAYOS_DE_DESGAST.pdf

Granta Design. (2023). CES EduPack [Software de bases de datos de materiales]. ANSYS, Inc. <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>

Hutchings, I. M. (1992). Tribology: friction and wear of engineering materials. *Materials & Design*, 13(3), 187. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(92\)90241-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(92)90241-9)

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribología: Fricción y desgaste de materiales de ingeniería* (2.^a ed.). Butterworth-Heinemann.

ISO - International Organization for Standardization. (2024). ISO. <https://www.iso.org>

Lansdown, A. R. (2004). *Lubrication and lubricants: A tribological approach*. Wiley.

Laza, J.M., & Pérez, L. (2014). *Introducción y conceptos generales*. Disponible en: https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/43964/mod_resource/content/1/Tema_1_Introduccion_y_conceptos_generales_2.pdf.

Luengo López, O. (2008). *Estudio tribológico de fricción y desgaste en capas de aleación NiP*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41799195.pdf>.

Material selection. (s.f.). The Free Encyclopedia. En Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Material_selection

Matuz, B. (2025). “¿Por Qué Elegir Bandas Transportadoras Sanitarias para la Industria Alimentaria?” - Bandas Transportadoras Industriales. *Bandas y Transportadores Industriales Matuz*. https://bandasmatuz.com/por-que-elegir-bandas-transportadoras-sanitarias-para-la-industria-alimentaria/?utm_source=chatgpt.com

Miranda Moreno, G. (2021). Propuesta de proyecto de creación de un centro de investigación y desarrollo tribológico dentro de la facultad de mecánica en la escuela superior politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/16155/1/25T00425.pdf>.

Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2021). Física universitaria: Volumen 1 (Trad. A. C. López García, J. L. Mendoza García, & A. R. Pérez Santoyo) [Libro electrónico]. OpenStax. <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1>

Ølholm Larsen, T., Løgstrup Andersen, T., Thorning, B., & Vigild, M. E. (2009). Pin-on-disk apparatus for tribological studies of polymeric materials. *Industrial Lubrication and Tribology*, 61(4), 203–208. <https://doi.org/10.1108/00368790910960039>

Ramírez Restrepo, R. (2013). Modelación y simulación de la lubricación elastohidrodinámica en engranajes rectos. Universidad del Norte. Disponible en: <https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9084/124205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Ravikiran, A., Sharma, R., & Gupta, M. (2020). Effect of temperature on polymer tribology: A review on friction and wear behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 5678-5692.

- Serrano, N. (2010). Estudio de la resistencia al rayado en función de la dirección de deslizamiento sobre polímeros de Nylon 6. Universidad Politécnica de Cartagena. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/10317/1818/1/pfc3412.pdf>.
- Sperling, L. H. (2006). *Introduction to physical polymer science* (4th ed.). Wiley-Interscience.
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (1993). Preface. *Engineering TriBology*, VII. [https://doi.org/10.1016/s0167-8922\(08\)70573-x](https://doi.org/10.1016/s0167-8922(08)70573-x)
- Vargas, J. (2019). *Adaptación de tres prácticas de laboratorio dirigido a la enseñanza del concepto de fuerza de fricción a niños invidentes del colegio Luis Angel Arango I.E.D.* <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/56372/jorgeparravargas.2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vizuite Alcocer, A. H. (2010). *Diseño, construcción e implementación de un módulo didáctico; con un sistema de posicionamiento de una banda transportadora controlado por medio de un PLC y TD-200 para el laboratorio de la unidad académica de ciencias de la ingeniería y aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <https://repositorio.utc.edu.ec/>
- Wypych, G. (2016). *Handbook of polymers* (2nd ed.). ChemTec Publishing.
- Zmitrowicz, A. (2006). *Wear Patterns and Laws of Wear – A Review*. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 44(2), 219-253.