

Comparison of the Mechanical Properties and Thermal Analysis of Control and Recycled PLA Films

Sergio Gonzalez-Serrud¹; Javiera Sepulveda²; Nacari Marin-Calvo³; Ana C. González-Valoys⁴; Marina P. Arrieta^{5*}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Research Group—Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI), Panama, Panama

³Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid ETSII-UPM, Spain, javiera.sepulveda@upm.es, m.arrieta@upm.es

⁴Grupo de Polímeros, Caracterización y Aplicaciones (POLCA), Madrid, Spain

⁵Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Azuero, Panamá, nacari.marin@utp.ac.pa

⁶Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ana.gonzalez1@utp.ac.pa

⁷SNI-SENACYT Sistema Nacional de Investigación-Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Clayton, Ciudad del Saber Edif. 205, Panama City 0816-02852, Panama

⁸Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Tecnología e Ingeniería, Avenida Ricardo J. Alfaro, Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso, Panama City 0819-07289, Panama

Abstract— This study evaluates the mechanical properties and thermal stability of control (PLA) and recycled (rPLA) polylactic acid (PLA) films. The films were fabricated using extrusion and thermo-compression, and their mechanical properties were assessed through tensile tests following the UNE-EN ISO 527-3 standard. The thermogravimetric analysis (TGA) was conducted under nitrogen atmosphere, measuring the initial decomposition temperature ($T_5\%$) and maximum decomposition temperature (T_{max}). The results indicate that rPLA exhibits a reduction in tensile strength (σ_t) and elongation at break (ϵ_b) compared to PLA, while the elastic modulus (E_t) remains relatively unchanged. The TGA analysis reveals a decrease in thermal stability for rPLA, with its $T_5\%$ dropping from 300°C to 280°C and T_{max} decreasing from 350°C to 330°C. Additionally, rPLA shows a higher mass loss (85%) than PLA (80%) during thermal degradation. These findings suggest that while the mechanical and thermal properties of rPLA are slightly compromised due to polymer degradation during recycling, it remains a viable alternative for applications where full mechanical performance is not critical but sustainability is prioritized.

Keywords— PLA films, recycled PLA, mechanical properties, tensile strength, thermal stability.

Comparación de las propiedades mecánicas, y análisis térmico de películas de PLA control y reciclado

Sergio Gonzalez-Serrud¹; Javiera Sepulveda²; Nacari Marin-Calvo³; Ana C. González-Valoys⁴; Marina P. Arrieta^{5*}

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, sergio.gonzalez5@utp.ac.pa

²Research Group—Iniciativa de Integración de Tecnologías para el Desarrollo de Soluciones Ingenieriles (I2TEDSI), Panama, Panama

³Departamento de Ingeniería Química Industrial y del Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid ETSII-UPM, Spain, javiera.sepulveda@upm.es, m.arrieta@upm.es

⁴Grupo de Polímeros, Caracterización y Aplicaciones (POLCA), Madrid, Spain

⁵Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Azuero, Panamá, nacari.marin@utp.ac.pa

⁶Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, ana.gonzalez1@utp.ac.pa

⁷SNI-SENACYT Sistema Nacional de Investigación-Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, Clayton, Ciudad del Saber Edif. 205, Panama City 0816-02852, Panama

⁸Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Tecnología e Ingeniería, Avenida Ricardo J. Alfaro, Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso, Panama City 0819-07289, Panama

Resumen— Este estudio compara las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de películas de ácido poliláctico (PLA) control y reciclado (rPLA). Las películas se fabricaron mediante extrusión y termo-compresión, y se evaluaron mediante ensayos de tracción (UNE-EN ISO 527-3) y análisis termogravimétrico (TGA) en atmósfera de nitrógeno. Los resultados muestran que el rPLA presenta menor resistencia a la tracción (σ) y elongación a la rotura (ϵ_b) que el PLA, mientras que su módulo elástico (E) se mantiene similar. El análisis TGA revela una disminución en la estabilidad térmica del rPLA, con un $T_5\%$ reducido de 300°C a 280°C y T_{max} de 350°C a 330°C, además de una mayor pérdida de masa (85%) en comparación con el 80% del PLA. Estos hallazgos evidencian el desempeño mecánico y térmico comprometido del rPLA debido al reciclaje, pero confirman su potencial para aplicaciones sostenibles.

Palabras clave— Películas de PLA, PLA reciclado, propiedades mecánicas, resistencia a la tracción, estabilidad térmica.

I. INTRODUCCIÓN

El poli ácido láctico (PLA) es un polímero biodegradable y biocompatible derivado de recursos renovables como el maíz, la remolacha y el trigo. Este material ha ganado relevancia en diversas industrias debido a sus propiedades mecánicas comparables a las de polímeros petroquímicos, aunque presenta una elongación relativamente baja [1], [2]. La creciente preocupación ambiental ha impulsado la investigación en métodos de reciclaje del PLA, buscando reducir su impacto ecológico y promover una economía circular [1], [3]. El reciclaje mecánico se presenta como una alternativa viable; sin embargo, es fundamental evaluar cómo este proceso afecta las propiedades mecánicas y térmicas del material. Estudios previos indican que el PLA reciclado puede experimentar una disminución en su peso molecular, lo que podría comprometer su resistencia mecánica y estabilidad térmica [2], [4]. No obstante, investigaciones también sugieren

que, mediante la incorporación de aditivos o la optimización de los procesos de reciclaje, es posible mejorar o mantener las propiedades deseadas del PLA reciclado [3], [4], [5].

Este estudio tiene como objetivo comparar las propiedades mecánicas y la estabilidad térmica de películas de PLA control y reciclado. Para ello, se fabricaron películas mediante extrusión y termo-compresión, seguidas de ensayos de tracción según la norma UNE-EN ISO 527-3 y análisis termogravimétrico (TGA) para evaluar la estabilidad térmica. Los resultados obtenidos proporcionarán información sobre la viabilidad del uso de PLA reciclado en diversas aplicaciones industriales, contribuyendo al desarrollo de materiales más sostenibles y funcionales.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Este estudio utilizó poli ácido láctico (PLA), Ingeo™ Biopolymer 2003D, de la marca Nature Works (EE.UU.): Se fabricaron dos tipos de films, PLA control (PLA) y PLA reprocesado (rPLA). El rPLA se obtuvo mediante un proceso de extrusión para simular el reprocesamiento industrial. Ambos materiales fueron transformados en películas mediante termocompresión [6].

Las películas se fabricaron utilizando una prensa de platos calientes. Previamente, el material se secó a 60°C durante 12 horas para eliminar la humedad residual. Luego, se procesaron ocho gramos de material a 180°C aplicando un ciclo de presión progresivo: 3 MPa por 1 minuto, 5 MPa por 1 minuto y 10 MPa por 2 minutos. Finalmente, las películas se enfriaron a temperatura ambiente bajo presión controlada para evitar deformaciones [2], [5].

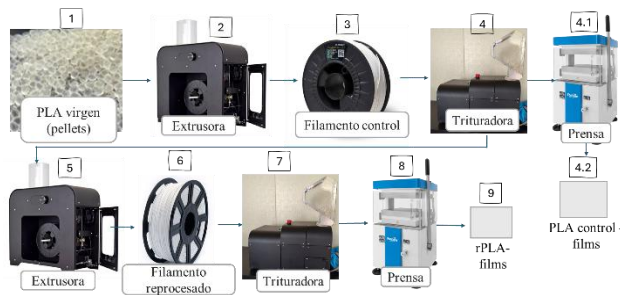


Fig 1. Proceso de manufactura para fabricar los films PLA y rPLA.

B. Ensayo de propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de las películas se evaluaron mediante ensayos de tracción conforme a la norma UNE-EN ISO 527-3, utilizando una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X 100 N. Se empleó una velocidad de ensayo de 5 mm/min con muestras de $5 \times 50 \text{ mm}^2$ y una longitud de agarre de 20 mm. Se midieron el módulo elástico (E_t), la resistencia a la tracción (σ_t) y la elongación a la rotura (ϵ_b). Se realizaron al menos cinco repeticiones para cada formulación [5], [7].

C. Análisis termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica de las películas se analizó mediante análisis termogravimétrico (TGA) en un TGA 2050 Thermogravimetric Analyzer (TA Instruments) bajo atmósfera de nitrógeno. Las muestras, con una masa aproximada de 10 mg, fueron sometidas a un calentamiento desde 40°C hasta 800°C a una tasa de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Se determinaron la temperatura inicial de degradación ($T_{5\%}$), la temperatura máxima de degradación (T_{max}) y la pérdida de masa en función de la temperatura [8].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados y posteriormente su análisis y discusión.

A. Propiedades mecánicas

A continuación, se presentan una gráfica donde se observan las propiedades mecánicas obtenidas y posteriormente su respectiva discusión de los resultados.

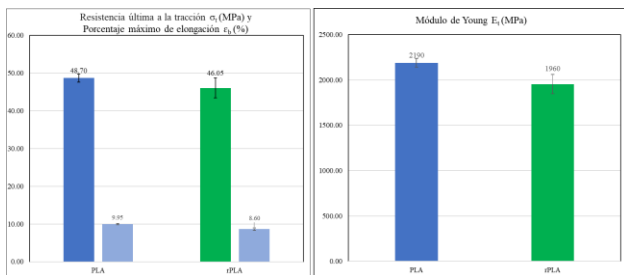


Fig 2. Propiedades mecánicas del PLA control y rPLA.

La evaluación de las propiedades mecánicas de las películas de PLA y rPLA reveló diferencias entre ambos materiales. El

análisis de tracción mostró que el rPLA presentó una menor resistencia a la tracción y elongación a la rotura en comparación con el PLA control, mientras que el módulo elástico se mantuvo relativamente estable. Específicamente, el PLA exhibió una resistencia a la tracción de 48.70 MPa, mientras que el rPLA disminuyó a 46.05 MPa. La elongación a la rotura también se redujo de 10.0 % en el PLA a 8.6 % en el rPLA, lo que indica una menor ductilidad del material reciclado. Sin embargo, el módulo elástico mostró una variación mínima, con valores de 2190 MPa para el PLA y 1960 MPa para el rPLA, sugiriendo que la rigidez del material no se ve significativamente afectada por el reprocesamiento.

B. Análisis termogravimétrico (TGA)

A continuación, se presentan una gráfica donde se observan las propiedades mecánicas obtenidas y posteriormente su respectiva discusión de los resultados.

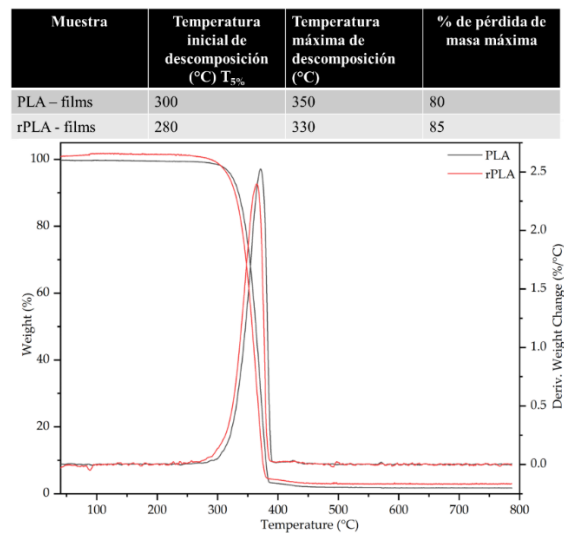


Fig. 3. Resultados del análisis termogravimétrico del PLA control y rPLA.

El análisis termogravimétrico (TGA) permitió evaluar la estabilidad térmica de los materiales en función de la temperatura. Los resultados mostraron que el rPLA experimenta una degradación térmica a temperaturas más bajas en comparación con el PLA virgen. La temperatura inicial de descomposición ($T_{5\%}$) del PLA fue de 300°C , mientras que en el rPLA se redujo a 280°C , lo que indica una disminución en la estabilidad térmica atribuida a la degradación molecular durante el proceso de reciclado. De manera similar, la temperatura máxima de degradación (T_{max}) descendió de 350°C en el PLA a 330°C en el rPLA. Además, el rPLA presentó una mayor pérdida de masa durante la degradación térmica, alcanzando un 85 % en comparación con el 80 % registrado en el PLA, lo que confirma su menor resistencia a temperaturas elevadas.

Estos resultados evidencian que el reprocesamiento del PLA afecta tanto sus propiedades mecánicas como su estabilidad térmica [9], [10]. La reducción en la resistencia a la tracción y

en la elongación a la rotura sugiere una disminución en la integridad estructural del polímero tras el reciclaje, mientras que la menor estabilidad térmica indica una mayor susceptibilidad a la degradación térmica [11]. Sin embargo, la mínima variación en el módulo elástico sugiere que la rigidez del material no se ve comprometida de manera significativa, lo que podría permitir su uso en aplicaciones donde no se requiera alta resistencia mecánica, pero sí una estructura estable. Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar los procesos de reciclaje para minimizar la degradación del PLA y garantizar su viabilidad en aplicaciones sostenibles. La disminución en la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas debe ser considerada en el desarrollo de estrategias para mejorar la calidad del rPLA, como la adición de estabilizantes térmicos o modificaciones en el proceso de extrusión para reducir la degradación del polímero [12], [13], [14].

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio evidencian que el reprocesamiento del PLA induce modificaciones estructurales que impactan negativamente su desempeño mecánico y térmico. La reducción en la resistencia a la tracción y en la elongación a la rotura del rPLA indica una degradación en la integridad molecular del polímero, posiblemente atribuida a la ruptura de cadenas macromoleculares durante los ciclos de procesamiento térmico y mecánico. A pesar de esta degradación, el módulo elástico mostró variaciones mínimas, lo que sugiere que la rigidez global del material se mantiene relativamente estable tras el reprocesado.

El análisis termogravimétrico confirmó una disminución en la estabilidad térmica del rPLA, evidenciada por una reducción en la temperatura inicial de descomposición (T_s) y en la temperatura de degradación máxima (T_{max}). Este comportamiento puede atribuirse a la reducción del peso molecular y a la generación de estructuras de menor estabilidad térmica como consecuencia del reprocesamiento. Asimismo, la mayor pérdida de masa observada en el rPLA sugiere una menor resistencia a la degradación térmica en comparación con el PLA control.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Este estudio recibió apoyo financiero del Ministerio de Ciencia e Innovación de España (MICINN) a través del proyecto PID2021-123753NA-C32, gestionado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033, y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) bajo el programa “Una manera de hacer Europa” de la Unión Europea. Además, contó con el respaldo de los proyectos TED2021-129920A-C43 y CNS2022-136064, financiados por la Unión Europea a través de NextGenerationEU/PRTR. S. González expresa su agradecimiento a la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), al programa de Maestría en

Ciencias de la Ingeniería Mecánica, al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología AIP (CEMCIT AIP) y a la Dirección de Relaciones Internacionales de la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] M. P. Arrieta, E. Fortunati, F. Dominici, J. López, and J. M. Kenny, “Bionanocomposite films based on plasticized PLA-PHB/cellulose nanocrystal blends,” *Carbohydr Polym*, vol. 121, pp. 265–275, 2015.
- [2] M. P. Arrieta, “Films de PLA y PLA-PHB plastificados para su aplicación en envases de alimentos. Caracterización y análisis de los procesos de degradación,” Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2015.
- [3] P. K. Bajpai, I. Singh, and J. Madaan, “Development and characterization of PLA-based green composites,” *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 52–81, Jan. 2014, doi: 10.1177/0892705712439571.
- [4] M. P. Arrieta, J. López, S. Ferrándiz, and M. A. Peltzer, “Characterization of PLA-limonene blends for food packaging applications,” *Polym Test*, vol. 32, no. 4, pp. 760–768, 2013, doi: doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.03.016.
- [5] Á. Agüero et al., “Plasticized Mechanical Recycled PLA Films Reinforced with Microbial Cellulose Particles Obtained from Kombucha Fermented in Yerba Mate Waste,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 2, p. 285, 2023.
- [6] V. Siracusa, I. Blanco, S. Romani, U. Tylewicz, P. Rocculi, and M. D. Rosa, “Poly(lactic acid)-modified films for food packaging application: Physical, mechanical, and barrier behavior,” *J Appl Polym Sci*, vol. 125, no. S2, Sep. 2012, doi: 10.1002/app.36829.
- [7] Á. Agüero Rodríguez, “Desarrollo y caracterización de materiales sostenibles con subproductos de la industria del lino para aplicaciones de envasado bajo el marco de la economía circular,” Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València, Valencia, 2020.
- [8] L. Aliotta, V. Gigante, M.-B. Coltelli, P. Cinelli, A. Lazzeri, and M. Seggiani, “Thermo-Mechanical Properties of PLA/Short Flax Fiber Biocomposites,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 18, p. 3797, Sep. 2019, doi: 10.3390/app9183797.
- [9] V. C. Agbakoba, N. Webb, E. Jegede, R. Phillips, S. P. Hlangothi, and M. J. John, “Mechanical Recycling of Waste PLA Generated From 3D Printing Activities: Filament Production and Thermomechanical Analysis,” *Macromol Mater Eng*, vol. 309, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.1002/mame.202300276.
- [10] S. Chaitanya, I. Singh, and J. Il Song, “Recyclability analysis of PLA/Sisal fiber biocomposites,” *Compos B Eng*, vol. 173, p. 106895, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.05.106.
- [11] D. Fico, C. Esposito Corcione, M. R. Acocella, D. Rizzo, V. De Carolis, and A. Maffezzoli, “Thermal stabilization of recycled PLA for 3D printing by addition of charcoal,” *J Therm Anal Calorim*, vol. 148, no. 23, pp. 13107–13119, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10973-023-12525-2.
- [12] R. Khankrua, S. Pivsa-Art, H. Hiroyuki, and S. Suttiruengwong, “Effect of chain extenders on thermal and mechanical properties of poly(lactic acid) at high processing temperatures: Potential application in PLA/Polyamide 6 blend,” *Polym Degrad Stab*, vol. 108, pp. 232–240, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2014.04.019.
- [13] M. Murariu, Y. Paint, O. Murariu, F. Laoutid, and P. Dubois, “Tailoring and Long-Term Preservation of the Properties of PLA Composites with ‘Green’ Plasticizers,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 22, p. 4836, Nov. 2022, doi: 10.3390/polym14224836.
- [14] D. Jubinville, C. Tzoganakis, and T. H. Mekonnen, “Recycled PLA – Wood flour based biocomposites: Effect of wood flour surface modification, PLA recycling, and maleation,” *Constr Build Mater*, vol. 352, p. 129026, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129026.

