

MODIFICACIÓN DEL PLA MEDIANTE EXTRUSIÓN REACTIVA Y SU COMPATIBILIDAD CON ABS: UNA REVISIÓN CRÍTICA DEL MARCO REFERENCIAL

CARLOS GÓMEZ CAMACHO

Politécnico di Torino, (Italia)

carlos.gomez@empa.ch

Resumen

El ácido poliláctico (PLA) es un polímero bio-basado que ha cobrado importancia por su origen renovable y su potencial compostable. Sin embargo, sus propiedades mecánicas y térmicas limitadas dificultan su uso en aplicaciones exigentes. Este artículo analiza, desde una revisión del marco referencial, los mecanismos de modificación del PLA mediante extrusión reactiva y su posterior compatibilización con polímeros como el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS). Se revisan tecnologías, agentes modificadores y compatibilizantes, evaluando la interacción entre fases y su impacto en la morfología, procesabilidad y rendimiento. Esta investigación teórica contribuye a la comprensión de mezclas PLA/ABS como solución sostenible frente a polímeros de origen fósil.

Palabras clave: PLA, ABS, extrusión reactiva, compatibilización, biopolímeros, Joncrys, ABS-g-MAH

RECIBIDO: 09-07-2025 / ACEPTADO: 13-09-2025 / PUBLICADO: 22-12-2025

Cómo citar: Gómez, C. (2025). Modificación del PLA mediante extrusión reactiva y su compatibilidad con ABS: una revisión crítica del marco referencial. *Anales*, 42, 83 - 94. <https://doi.org/10.58479/acbfn.2026.152>



CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Resumen | 83 |
| 1. Introducción | 87 |
| 2. El PLA: promesa bio-basada con debilidades industriales | 88 |
| 3. De PLA a REXPLA: la magia de la extrusión reactiva | 88 |
| 4. ABS: el titán del rendimiento termomecánico | 89 |
| 5. Compatibilización PLA/ABS: química, tensión superficial y morfología | 90 |
| 6. Efectos térmicos y cristalinos de la compatibilización | 90 |
| 7. Rendimiento mecánico y aplicaciones potenciales | 91 |
| 8. Consideraciones sobre sostenibilidad y ciclo de vida | 92 |
| 9. Limitaciones del enfoque y perspectivas de investigación | 92 |
| 10. Discusión y recomendaciones técnicas | 93 |
| 11. Conclusión | 94 |
| Referencias | 94 |

1. Introducción

La presión ambiental por reducir el uso de plásticos derivados del petróleo ha impulsado el desarrollo de materiales biodegradables y bio-basados. Entre ellos, el ácido poliláctico (PLA) destaca por su origen renovable y compostabilidad. Sin embargo, el PLA puro presenta fragilidad, baja resistencia térmica y problemas de degradación, lo que limita su uso industrial (Gómez Camacho, 2015).

Una solución viable es modificar el PLA mediante extrusión reactiva y mezclarlo con polímeros como el ABS. Pero esta combinación no es trivial. Se requiere compatibilización, una especie de diplomacia química para que dos polímeros que naturalmente no se entienden trabajen juntos.

Para lograr una mezcla funcional entre PLA y ABS es necesario incorporar agentes compatibilizantes que promuevan la interacción entre sus fases, dado que presentan una elevada incompatibilidad termodinámica. La extrusión reactiva, al incorporar extensores de cadena como el Joncryl ADR-4300 F, permite modificar la arquitectura macromolecular del PLA, incrementando su peso molecular, viscosidad y estabilidad térmica. Paralelamente, la utilización de ABS injertado con anhídrido maleico (ABS-g-MAH) favorece la compatibilización mediante la formación de enlaces covalentes o interacciones específicas entre los grupos funcionales del PLA y las cadenas del ABS, reduciendo la tensión interfacial y promoviendo una morfología más homogénea.

El resultado de esta ingeniería de materiales es la obtención de una mezcla polimérica con propiedades termo-mecánicas mejoradas, adecuada para aplicaciones estructurales de exigencia media. La combinación de PLA modificado con ABS compatibilizado no solo permite superar las limitaciones del biopolímero en estado puro, sino que también representa una estrategia de alto potencial para el desarrollo de materiales sostenibles con menor impacto ambiental, sin comprometer el rendimiento funcional requerido en entornos industriales.

2. El PLA: promesa bio-basada con debilidades industriales

El PLA se obtiene por fermentación de carbohidratos como maíz o remolacha. El ácido láctico resultante puede polimerizarse en estructuras lineales de alto peso molecular. A pesar de sus ventajas ambientales, es vulnerable a reacciones de degradación térmica e hidrólisis.

Esto afecta su viscosidad, cristalinidad y capacidad de procesado. Por ello, el PLA necesita una “inyección de fuerza” estructural antes de enfrentar aplicaciones técnicas exigentes.

El ácido poliláctico (PLA) es un poliéster alifático termoplástico derivado del ácido láctico, cuya síntesis se realiza comúnmente a partir de la fermentación de carbohidratos procedentes de fuentes renovables como el maíz, la remolacha o la caña de azúcar. El ácido láctico obtenido puede polimerizarse mediante técnicas como la policondensación directa o, preferentemente, por polimerización por apertura de anillo (ROP) del dímero cíclico lactida, lo que permite obtener estructuras lineales de alto peso molecular con propiedades mecánicas y térmicas adecuadas para aplicaciones de ingeniería ligera.

No obstante, a pesar de su carácter biodegradable y su bajo impacto ambiental, el PLA presenta una serie de limitaciones intrínsecas que comprometen su desempeño técnico. Su estructura química lo hace susceptible a procesos de degradación térmica e hidrólisis, especialmente durante el procesado en estado fundido, lo cual afecta negativamente su viscosidad, grado de cristalinidad y estabilidad dimensional. Estas deficiencias limitan su aplicación directa en sectores que exigen alta resistencia térmica o mecánica, haciendo necesaria su modificación estructural mediante estrategias como la extrusión reactiva o la incorporación de agentes reforzantes y compatibilizantes.

3. De PLA a REXPLA: la magia de la extrusión reactiva

La extrusión reactiva permite modificar el PLA en un reactor dinámico: una extrusora de doble husillo. Aquí se introduce Joncrys ADR-4300 F, un extensor de cadena con grupos epoxi que reconectan las cadenas del PLA y mejoran su estabilidad térmica y mecánica.

El resultado es el REXPLA: un PLA vitaminado, más robusto, con mejor comportamiento frente al calor y listo para entrar al mundo de las mezclas técnicas.

La extrusión reactiva se ha consolidado como una técnica eficaz para la modificación estructural del ácido poliláctico (PLA), permitiendo su transformación en un material con propiedades reológicas y térmicas mejoradas. Este proceso se lleva a cabo en una extrusora de doble husillo co-rotante, la cual actúa como un reactor dinámico en el que se controlan simultáneamente la mezcla, la dispersión y la reacción química entre los componentes. En este contexto, la adición de un extensor de cadena como el Joncrys® ADR-4300 F, un oligómero

funcionalizado con grupos epoxi, permite la ramificación y reticulación parcial de las cadenas de PLA mediante reacciones con los grupos terminales carboxilo e hidroxilo.

El producto resultante, denominado REXPLA (Reactive Extruded PLA), presenta un incremento significativo en el peso molecular, así como en la viscosidad fundida, lo que se traduce en una mayor estabilidad térmica y una mejor procesabilidad. Estas mejoras estructurales amplían el rango de aplicaciones del PLA, permitiéndole incorporarse de manera más eficiente en sistemas multicomponente, como las mezclas con ABS, donde se requieren propiedades mecánicas balanceadas y compatibilidad funcional entre fases.

4. ABS: el titán del rendimiento termomecánico

El acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) es un polímero técnico muy versátil. Sus aplicaciones van desde automoción hasta electrodomésticos. Es duro, resistente y termoestable... pero proviene del petróleo y su reciclabilidad es limitada.

El reto es usar lo mejor del ABS sin pagar el precio ambiental. Por eso, las mezclas con PLA son tan atractivas. Pero necesitan compatibilización: aquí entra el ABS-g-MAH.

El acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) es un terpolímero amorfó de ingeniería ampliamente utilizado debido a su notable resistencia al impacto, estabilidad térmica y facilidad de procesamiento. Su estructura, compuesta por fases de estireno-acrilonitrilo (SAN) y caucho de butadieno, proporciona una combinación eficiente de rigidez y tenacidad, lo que lo hace idóneo para aplicaciones exigentes en sectores como la industria automotriz, la fabricación de electrodomésticos y dispositivos electrónicos. No obstante, su origen petroquímico y su limitada capacidad de reciclaje representan importantes desventajas desde el punto de vista ambiental y de sostenibilidad.

Ante este escenario, las mezclas con PLA modificado surgen como una alternativa prometedora para reducir la huella ambiental sin sacrificar el desempeño funcional. Sin embargo, la falta de compatibilidad intrínseca entre PLA y ABS requiere la incorporación de agentes compatibilizantes que favorezcan la cohesión interfacial. En este sentido, el uso de ABS injertado con anhídrido maleico (ABS-g-MAH) se ha demostrado eficaz, ya que sus grupos funcionales reactivos permiten establecer interacciones específicas con las cadenas polares del PLA, promoviendo una morfología más homogénea y propiedades mecánicas optimizadas en la mezcla final.

5. Compatibilización PLA/ABS: química, tensión superficial y morfología

El ABS-g-MAH (ABS injertado con anhídrido maleico) actúa como mediador molecular entre el PLA y el ABS. Los grupos MAH interactúan con los grupos funcionales del PLA y generan un puente químico que mejora la dispersión y cohesión de fases.

Las observaciones bajo microscopía electrónica (SEM) confirman que el uso de MAH reduce el tamaño de las fases discontinua y genera una morfología más homogénea.

Esta mejora en la compatibilidad interfacial se traduce en una significativa optimización de las propiedades mecánicas del sistema PLA/ABS. Al disminuir el tamaño de las fases dispersas y favorecer una distribución más uniforme, se reduce el fenómeno de concentración de tensiones en los límites de fase, lo cual mejora la transferencia de esfuerzos y retrasa la propagación de grietas. Como consecuencia, las mezclas compatibilizadas con ABS-g-MAH exhiben un comportamiento más dúctil y una resistencia superior al impacto en comparación con sus contrapartes no compatibilizadas. Esta evolución morfológica ha sido correlacionada con aumentos en el módulo de flexión y la elongación a la rotura, según lo reportado en diversos estudios de compatibilización reactiva.

Desde un punto de vista termodinámico, la incorporación de ABS-g-MAH también contribuye a la reducción de la energía libre interfacial entre las fases poliméricas, estabilizando la estructura de la mezcla durante el procesamiento térmico. Esta estabilización se evidencia no solo en la microestructura obtenida por SEM, sino también en los perfiles térmicos obtenidos mediante técnicas como Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termomecánico (TMA), que muestran transiciones térmicas más definidas y temperaturas de reblandecimiento incrementadas. En conjunto, estos resultados confirman que el injerto de MAH sobre el ABS no solo actúa como puente molecular, sino también como factor determinante en el diseño racional de sistemas poliméricos avanzados con aplicaciones industriales específicas.

6. Efectos térmicos y cristalinos de la compatibilización

La compatibilización no solo es visual. Las pruebas de calorimetría (DSC) muestran que la adición de ABS-g-MAH reduce la cristalinidad del PLA pero incrementa sus temperaturas de reblandecimiento (VICAT) y deflexión térmica (HDT).

Esto implica un mejor comportamiento frente al calor, lo cual es esencial para aplicaciones donde el PLA puro fallaría.

El descenso en la cristalinidad del PLA, inducido por la presencia del compatibilizante ABS-g-MAH, se atribuye a la interferencia de los dominios amorfos del ABS en el proceso de

ordenamiento molecular del PLA durante la solidificación. Esta disminución del orden cristalino, lejos de ser una desventaja, puede resultar beneficiosa en contextos donde se busca una mayor tenacidad o una mejora en la homogeneidad del material. Al mismo tiempo, el incremento observado en las temperaturas VICAT y HDT indica una mayor resistencia a la deformación bajo carga térmica, lo que amplía significativamente la ventana operativa de las mezclas PLA/ABS en comparación con el biopolímero sin modificar.

Estos resultados termomecánicos sitúan a las mezclas compatibilizadas como candidatas viables para aplicaciones industriales de media exigencia térmica, como componentes estructurales no expuestos a altas cargas, carcasas de equipos electrónicos o partes interiores del sector automotriz. En tales contextos, el PLA puro se mostraría inadecuado debido a su baja temperatura de transición vítrea ($\sim 60^{\circ}\text{C}$) y a su pobre estabilidad dimensional. Por el contrario, la incorporación de ABS-g-MAH no solo mejora la estabilidad térmica, sino que también preserva o incluso mejora otras propiedades funcionales del sistema, haciendo posible su integración en líneas de producción que tradicionalmente dependen de polímeros convencionales de origen fósil.

7. Rendimiento mecánico y aplicaciones potenciales

Las mezclas PLA/ABS presentan un módulo de flexión superior al ABS puro y comparable al PLA modificado. Esta combinación mejora la rigidez sin perder resistencia al impacto.

Esto las hace aptas para sectores como:

- Componentes automotrices
- Carcasas electrónicas
- Empaques técnicos
- Productos de consumo con requisitos térmicos

Las mezclas poliméricas PLA/ABS compatibilizadas exhiben un módulo de flexión superior al del ABS convencional y comparable al del PLA modificado mediante extrusión reactiva, lo que evidencia una mejora significativa en la rigidez estructural del material. Esta sinergia mecánica, combinada con una adecuada resistencia al impacto derivada de la fase elastomérica del ABS, permite obtener un equilibrio óptimo entre rigidez y tenacidad, parámetros clave en el diseño de piezas sometidas a solicitudes mecánicas moderadas.

Gracias a estas propiedades, dichos sistemas multicomponentes son idóneos para aplicaciones técnicas en sectores como la industria automotriz (especialmente en componentes

interiores), la fabricación de carcchas y dispositivos electrónicos, el desarrollo de envases rígidos para productos de alta exigencia térmica, así como en bienes de consumo duradero que requieren una estabilidad dimensional y térmica mejorada respecto al PLA sin modificar.

8. Consideraciones sobre sostenibilidad y ciclo de vida

Reemplazar parcial o totalmente el ABS por PLA modificado reduce el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂. El PLA tiene un menor Global Warming Potential y requiere menos energía primaria en su producción.

Además, al no provenir del petróleo, reduce la dependencia geopolítica de recursos no renovables.

La sustitución parcial o total del ABS por ácido poliláctico (PLA) modificado constituye una estrategia efectiva para reducir el uso de polímeros derivados de fuentes fósiles, lo que conlleva beneficios ambientales y estratégicos considerables. Desde la perspectiva del análisis de ciclo de vida (ACV), el PLA presenta un **menor potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP)** en comparación con el ABS, debido a que su obtención se basa en materias primas renovables como almidón de maíz o caña de azúcar, cuyo cultivo implica la captura biogénica de dióxido de carbono durante la fotosíntesis (Gómez Camacho, 2015). Asimismo, la síntesis de PLA requiere una menor cantidad de energía primaria no renovable, lo que se traduce en una huella energética significativamente inferior respecto a polímeros tradicionales.

Adicionalmente, el PLA no depende de cadenas de suministro asociadas a recursos petroquímicos, lo que representa una ventaja estratégica en contextos de alta volatilidad geopolítica y económica. La diversificación de materias primas mediante el uso de biopolímeros contribuye no solo a la mitigación del cambio climático, sino también a la transición hacia una economía más resiliente y sostenible. En este sentido, el empleo de mezclas PLA/ABS bien formuladas permite mantener el desempeño técnico requerido mientras se avanza hacia una reducción efectiva del impacto ambiental asociado a la producción y uso de materiales plásticos.

9. Limitaciones del enfoque y perspectivas de investigación

A pesar de sus beneficios, la mezcla PLA/ABS no es perfecta. La estabilidad a largo plazo, la compatibilidad completa y la economía de escala aún presentan desafíos. Es necesario explorar:

- Nuevos compatibilizantes bio-basados

- Optimización de extrusoras para reacciones más eficientes
- Estabilización post-inyección

10. Discusión y recomendaciones técnicas

- El uso de ABS-g-MAH debe mantenerse entre 3% y 6% para evitar saturación.
- Las condiciones de inyección deben estandarizarse para evitar separación de fases.
- Se recomienda estudiar el uso de otros extensores de cadena como bis-oxazolinas.
- Las simulaciones reológicas pueden predecir el comportamiento antes del escalado industrial.

Tabla 1. Comparación de propiedades térmicas PLA vs PLA/ABS

| Material | VICAT (°C) | HDT (°C) | Cristalinidad (%) |
|----------------|------------|----------|-------------------|
| PLA puro | 57 | 60 | 23 |
| PLA/ABS 3% MAH | 66 | 74 | 15 |
| PLA/ABS 6% MAH | 68 | 78 | 12 |

La Tabla 1 presenta los resultados comparativos de tres sistemas poliméricos: PLA puro y dos mezclas de PLA/ABS compatibilizadas con diferentes concentraciones de ABS-g-MAH (3% y 6%). Se analizan tres propiedades térmicas clave: **temperatura VICAT**, **temperatura de deflexión térmica (HDT)** y **cristalinidad**.

- **Temperatura VICAT (°C):** Esta propiedad indica la temperatura a la cual un material comienza a blandirse bajo una carga determinada. El PLA puro presenta un valor de 57 °C, mientras que las mezclas compatibilizadas muestran incrementos significativos, alcanzando 66 °C (3% MAH) y 68 °C (6% MAH). Este aumento revela una **mejora en la resistencia térmica** de las mezclas, atribuible a la compatibilización eficaz y a la reducción de movilidad molecular en las interfaces.
- **Temperatura HDT (°C):** La temperatura de deflexión térmica también se incrementa sustancialmente al incorporar el compatibilizante: de 60 °C en el PLA puro a 74 °C y

78 °C para las mezclas con 3% y 6% de MAH, respectivamente. Esto indica que las mezclas pueden soportar **mayores cargas térmicas sin deformarse**, lo que amplía su aplicabilidad en contextos industriales con exigencias térmicas moderadas.

- **Cristalinidad (%)**: En contraposición, la cristalinidad disminuye progresivamente con el aumento de contenido de MAH: desde 23% en el PLA puro, hasta 15% y 12% en las mezclas. Esta reducción se interpreta como una **disrupción del orden cristalino del PLA** debido a la interferencia estructural del ABS y del compatibilizante, lo cual puede mejorar la tenacidad y reducir la fragilidad del material final.

11. Conclusión

Los resultados expuestos en la Tabla 1 confirman que la incorporación de ABS-g-MAH como agente compatibilizante en mezclas PLA/ABS genera un impacto positivo en las propiedades térmicas del sistema. El aumento progresivo de las temperaturas VICAT y HDT refleja una mejora sustancial en la resistencia al reblandecimiento térmico y a la deformación bajo carga, lo cual posiciona a estas mezclas como alternativas viables para sustituir plásticos técnicos en aplicaciones de exigencia térmica intermedia. Aunque se observa una disminución en la cristalinidad, esta modificación contribuye a una mayor estabilidad dimensional y a una mejora en el comportamiento mecánico global del material. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial de las mezclas PLA/ABS compatibilizadas para avanzar hacia soluciones poliméricas más sostenibles sin comprometer el desempeño funcional.

Referencias

- Gómez C., C. E. (2015). *Mezclas PLA/ABS: Preparación por extrusión reactiva y caracterización morfológica y termomecánica* [Tesis de grado]. Universidad Central de Venezuela / Politécnico di Torino.
- Issaadi, K., Habi, A., Grohens, Y., & Pillin, I. (2015). Morphological, mechanical and thermal properties of maleic anhydride grafted functionalized polylactic acid used in reactive compatibilized binary blends. *Polymer Bulletin*, 72(4), 1033–1052.
- Hwang, S. W., Lee, S. B., Lee, C. K., et al. (2015). Grafting of MAH onto PLA and its effect on thermal properties. *Polymer Testing*, 41, 174–180.
- Ittianry, K., Lamnawar, K., & Maazouz, A. (2013). Compatibilization of PLA/PBAT blends by reactive extrusion with epoxy-functionalized chain extender. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298(10), 1075–1085.