



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### Uso independiente y combinado de compatibilizantes en el reciclado de mezclas heterogéneas PET/POs

### Separated and combined use of compatibilizers in the recycling of heterogeneous PET/PO mixtures

Ibarra-Palomares, M.<sup>a,b</sup>, Terán-Escobar, J.G.<sup>a</sup>, Cabello-Alvarado, C.J.<sup>c</sup>, Montes de Oca-Ramírez, G.<sup>d</sup>, Quiñones-Jurado, Z.V.<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> LyondellBasell Industries; C.P. 78395, San Luis Potosí, S.L.P., San Luis Potosí, México.

<sup>b</sup> Manufactura Avanzada; Posgrado CIATEQ A.C.; C.P. 78395, San Luis Potosí, S.L.P. México.

<sup>c</sup> Materiales Avanzados; Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA); C.P. 25294, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>d</sup> Plásticos y Materiales Avanzados; CIATEQ, Centro de Tecnología Avanzada; C.P. 52004, Lerma Estado de México, México.

[maria.ibarra@lyondellbasell.com](mailto:maria.ibarra@lyondellbasell.com); [gerardo.teran@lyondellbasell.com](mailto:gerardo.teran@lyondellbasell.com); [christian.cabello@ciqa.edu.mx](mailto:christian.cabello@ciqa.edu.mx);

[georgina.montesdeoca@ciateq.mx](mailto:georgina.montesdeoca@ciateq.mx); [zoe.quinones@lyondellbasell.com](mailto:zoe.quinones@lyondellbasell.com)\*

**Innovación tecnológica:** Importancia del uso correcto de agentes compatibilizantes en el reciclado de PET/Poliolefinas.

**Área de aplicación industrial:** Ciencia de los materiales, reciclado.

Recibido: 30 enero 2024

Aceptado: 26 agosto 2024

### Abstract

The purpose of this work is to promote the recirculation of polyester waste such as polyethylene terephthalate (PET) for packaging in a mixture with polyolefins (POs). It was proposed to study and understand the interaction of the recirculated material with two different compatibilizers, which were used individually and in combination. The compatibilizers consisted mainly of copolymers with epoxy functionality and maleic anhydride. Through differential scanning calorimetry (DSC) and melt flow index (MFI) analysis, the interaction of the coupling agents and the PET / PO recycling material was demonstrated, relating the melting behavior, crystallization and flow ability of the recycled material.

**Key words:** Recycling, Compatibilizers, Polyethylene terephthalate, Polyolefin.

## Resumen

El objetivo de este trabajo es promover la recirculación de residuos de poliéster como el polietileno tereftalato (PET) para envases en mezcla con poliolefinas (POs). Se propuso estudiar y conocer la interacción del material a recircular con dos diferentes compatibilizantes, los cuales se emplearon de manera individual y combinada. Los agentes compatibilizantes consistieron principalmente en copolímeros con funcionalidad epóxica y anhídrido maleico. Mediante análisis con calorimetría diferencial de barrido (DSC) e índice de fluidez (MFI) se demostró la interacción de los agentes de acople y el material para reciclado de PET / POs, relacionando el comportamiento de fusión, cristalización y la capacidad para fluir del material reciclado.

**Palabras clave:** Reciclado, Compatibilizantes, Polietileno Tereftalato, Poliolefina.

### 1. Introducción

La versatilidad del uso del plástico de polietileno tereftalato (PET) en la conservación de alimentos y bebidas, así como en el sector farmacéutico, lo ha posicionado en el mercado del empaque. Teniendo una estimación del mercado para el año 2023 de 67.38 mil millones de dólares y un pronóstico de crecimiento de 88.94 mil millones de dólares para el año 2028 [1].

Este material ofrece propiedades de ligereza, transparencia, rigidez, resistencia ante la abrasión y resistencia química a ácidos diluidos, aceites y alcohol. Siendo su propiedad más destacada; la capacidad de barrera al vapor de agua, oxígeno y dióxido de carbono.

Sin embargo, como es sabido, la incorrecta disposición final del empaque plástico, su abundancia, ligereza e inestabilidad fisicoquímica a la erosión ultravioleta, termo-oxidativa e hidrolítica han fomentado un problema latente de salud y ambiental.

Para el cumplimiento de Objetivos Globales de Desarrollo Sostenible (ODS), con fecha límite para el 2030, es imperante rediseñar las estructuras de los empaques, prolongar su uso y facilitar la reintegración [2].

A pesar de que el plástico PET es reciclable, durante el procesamiento de termo-formado, su estructura química cambia, sufriendo reacciones de hidrólisis y rompimiento de cadenas poliméricas, lo cual conlleva al detrimento de propiedades y a restringir su uso a un posterior procesamiento.

Entre las propiedades a controlar para el reciclaje del PET se encuentran; el peso molecular, viscosidad, punto de fusión, temperatura de transición vítrea, cristalinidad y propiedades mecánicas [3].

Para evitar el deterioro de las propiedades a partir del procesamiento térmico, inicialmente se debe considerar reducir el contenido de humedad por debajo del 0.02% en relación con la masa del PET. De lo contrario se promoverá la hidrólisis, incluso ligeramente por encima de la temperatura de transición vítrea, lo cual incrementará cuando el PET se encuentre fundido [4].

Para la recirculación del PET mezclado con otros plásticos, como los son frecuentemente las poliolefinas (POs), al ser estos termoplásticos de mayor consumo comercial e incluso por que dentro de la diversidad de empaques es común encontrarlos laminados al PET, es requerido el uso de agentes de acople que posean diferente funcionalidad

química para lograr promover su compatibilidad.

Los compatibilizantes pueden actuar por afinidad química o mediante la interacción intra-molecular, tal como, poliolefinas lineales o complejas injertadas con diversos grupos polares, por ejemplo: copolímeros de etileno y ácido acrílico (EAA), copolímeros de etileno y ácido metacrílico (EMAA), o también los compatibilizantes con funcionalidades reactivas dan origen a formar enlaces con las moléculas del plástico a reciclar, mediante reacciones *in situ*, como el polietileno injertado con anhídrido maleico (MA-g-PE), el polipropileno injertado con anhídrido maleico (MA-g-PP), etc. [5].

Así mismo, para corregir las características del peso molecular, reología y disminuir la dificultad que implica el proceso de moldeo del PET se encuentran los aditivos que reparan la unión de las cadenas poliméricas, al contener al menos 2 funcionalidades, por ejemplo; del tipo dianhídrido piromelítico (PMDA), glicidil metacrilato (GMA), isocianato y otros aditivos extensores de cadena que reactivan la unión de los hidroxilo y carbonilo de las extremidades de las cadenas del PET [6].

Debido a que la variación y diversidad de cada lote de plástico que se requiere reciclar suele ser muy amplia, se ha promovido el lograr la mayor integración de polímeros reciclados mediante el uso de mezclas de diferentes compatibilizantes. No obstante, es poca la información que se conoce de los inconvenientes o efectos secundarios que pudiera propiciar el mezclado de compatibilizantes.

Por lo que, es necesario explorar la interacción del material a reciclar con los agentes de acople de manera individual y combinada para determinar el efecto sobre la miscibilidad de polímeros incompatibles y

sus propiedades finales. En este trabajo se estudió la integración entre material de reciclaje de PET y POs con dos diferentes agentes de acople, los cuales consistieron en copolímeros de poliolefina con resina epóxica y anhídrido maleico.

El estudio se validó analizando la energía requerida para desarrollar la transición de fusión y el porcentaje de cristalinidad, propiedades que fueron determinadas por calorimetría diferencial de barrido (DSC) e indirectamente la modificación del tamaño de las moléculas fue analizada midiendo el valor del índice de fluidez (MFI).

## 2. Materiales

Los agentes de acople usados como compatibilizantes de poliéster y poliolefina fueron POLYBATCH® CA 100W y CA 10063 NAT proporcionados por LyondellBasell, estos materiales consistieron principalmente en copolímeros basado en regiones con poliolefinas y otras regiones con grupos funcionales reactivos como resina epóxica (C-EP) y anhídrido maleico (C-MA), respectivamente. El material para el reciclado se recolectó desde el desecho pos-industrial de un material laminado de PET y POs.

## 3. Métodos experimentales

### 3.1. Proceso de reciclado mecánico

El material para reciclar de PET/POs (MR) se molió usando un equipo Piovan Granulation RSP modelo 15/30 para reducir el tamaño hasta 3/4 in. Posteriormente, el material fue secado a 80 °C durante 12 h para reducir la humedad. El procesamiento térmico del MR y sus mezclas con los compatibilizantes (ver las composiciones en Tabla 1), se realizó en un extrusor de doble tornillo marca Werner and Pfleiderer modelo ZSK 30 con diámetro de 30 mm, L/D 29.1 y 200 rpm, donde el perfil de temperatura fue de 240 °C a lo largo de la extrusión y 250 °C a la salida del dado.

La alimentación a la extrusora se realizó mediante un alimentador Schenck process.

**Tabla 1.** MR y mezclas MR con diferentes porcentajes en peso de agentes de acople (C-EP y C-MA).

Blend	MR (%)	C-EP (%)	C-MA (%)
MR	100	0	0
1EP	97	3	0
2EP	95	5	0
1MA	97	0	3
2MA	95	0	5
EP-MA	92	5	3

### 3.2. Análisis térmico

El análisis térmico para encontrar la temperatura de fusión y porcentaje de cristalinidad del MR, así como de las mezclas compatibilizadas se realizó a través de calorimetría diferencial de barrido (DSC), en un equipo Perkin Elmer modelo 4000 con un sistema de enfriamiento de gas nitrógeno. Muestras de 8 mg fueron pesadas en crisoles de aluminio y como referencia se usaron crisoles vacíos. Las muestras fueron estabilizadas a 30 °C, seguido una rampa de temperatura a una velocidad de 10 °C / min hasta 230 °C fue establecida. Se realizaron tres ciclos bajo las mismas condiciones, calentamiento–enfriamiento–calentamiento, el primer ciclo para borrar la historia térmica del material, el segundo para desarrollar la cristalización y el último para estudiar la transición de fusión.

El porcentaje de cristalinidad de cada elemento fue calculado como se indica (Ec.1).

$$\text{Cristalinidad} = \frac{\Delta H_E}{\Delta H_T} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde  $\Delta H_E$  es la entalpia de fusión experimental para PET o POs y  $\Delta H_T$  es la entalpia de fusión teórica del POs y PET considerando un 100% de cristalinidad. Los valores teóricos para  $\Delta H_T$  fueron 293 J/g y 130 J/g para POs y PET, respectivamente [7].

La deconvolución de picos presentes en las endotermas se procesaron con ajuste a la función de Gauss por medio del software OriginPro 2023b.

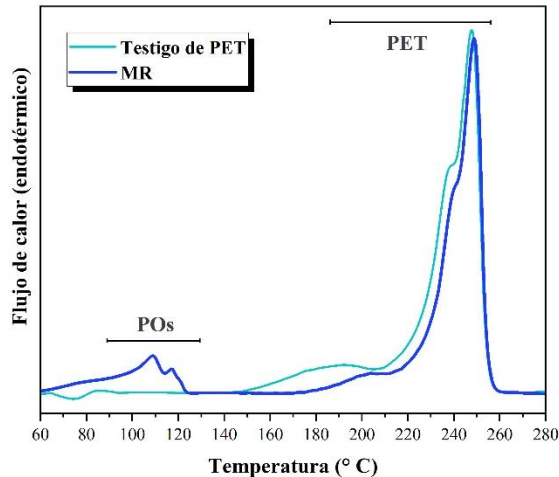
### 3.3. Índice de fluidez

El índice de fluidez del material se determinó por medio de la norma ASTM D1238 en un plastómetro de extrusión Tinius Olsen modelo MP1200 utilizando una carga de 2.16 Kg y una temperatura de 260 °C. Para hacer las pruebas el material fue previamente secado hasta alcanzar un valor de humedad menor a 0.02%.

## 4. Resultados

### 4.1 Propiedades Térmicas

Con base en los cambios de transición térmica obtenidos por el análisis de DSC, en la Figura 1 se muestra al material reciclado (MR) con línea azul fuerte. Se observaron dos montículos endotérmicos segregados a diferentes temperaturas, este fenómeno indicó que MR era un material conformado por compuestos inmiscibles química y estructuralmente [8], [9]. La transición endotérmica entre las temperaturas 170 – 260 °C se relacionó con poliéster tereftalato de polietileno (PET), tal como se presentó con el testigo de PET virgen (línea azul claro). Adicionalmente, la transición por debajo de la temperatura a 127 °C se atribuyó a la presencia de poliolefinas (POs) porque correspondió a su bajo punto fusión [10]. La baja intensidad de estas últimas indicó menor cantidad en masa de la fracción de POs en MR.



**Figura 1.** Termogramas de la transición de fusión del MR (línea azul fuerte) y un testigo de PET virgen (línea azul clara).

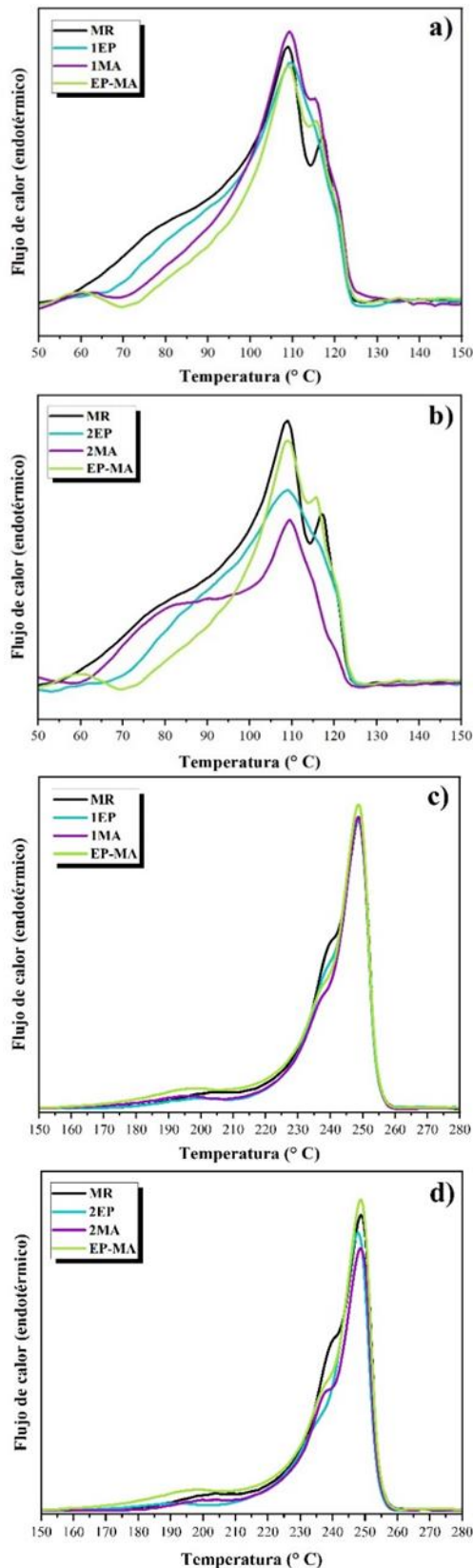
Los termogramas de la Figura 2 corresponden al comportamiento térmico del proceso de fusión de MR y de las mezclas con los agentes de acople C-EP y C-MA después de su procesamiento térmico mediante extrusión. Para una mejor apreciación, la región de las POs y el PET se presentan en secciones separadas. Dentro de la región térmica de las POs (Figura 2a y 2b), se observaron dos picos de endotermias de fusión para MR (línea oscura) a 108.8 y 117.1 °C atribuidos a la presencia de poliolefinas de polietileno de baja densidad (LDPE) con temperatura de fusión cercana a los 110 °C y polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) con temperatura de fusión a 120 °C [11], [12]. Aunque ambas resinas son poliolefinas y son químicamente semejantes, muestran incompatibilidad en su reorganización durante la cristalización, atribuida a una baja afinidad de la interface entre las POs por diferencias en la distribución y longitud de sus ramificaciones [13].

La incorporación del compatibilizante C-EP a MR en ambas concentraciones (1EP y 2EP, línea azul) propicio la unificación de picos en la fracción de POs. Así mismo, el agente C-MA a alta concentración (2MA, línea morada) desarrolló una asociación de picos

con un valor máximo parecido al del LDPE (110 - 112 °C), diferenciándose en la formación de un hombro ancho, previo al pico máximo antes señalado. Con respecto a la mezcla de MR combinada con ambos agentes EP-MA (línea color verde), no se logró la asociación de los endotermas respectivos en POs. Por tanto, la integración de POs en las mezclas 1EP, 2EP y 2MA se vieron favorecidas por los compatibilizantes, por tanto, la inclusión de forma independiente de estos agentes da lugar a una mayor interacción de la interface, favoreciendo el reacomodo estructural y propiciar una co-cristalización [9]. Con relación a las interacciones de los aditivos compatibilizantes en la fracción del PET, se obtuvieron ligeras diferencias en la forma del pico de fusión comprendido entre 170 a 260 °C (Figura 2-c y 2-d). Específicamente, en el hombro entre los 230 – 245 °C, del cual ha sido reportado como un endoterma de pre-fusión que corresponde a la fusión de cristales pequeños o imperfectos del poliéster, asociados mayormente a la zona amorfa [14], [15]. Por lo que, en general se observó que el uso de compatibilizantes atenúa la formación de estas zonas desordenadas en el PET.

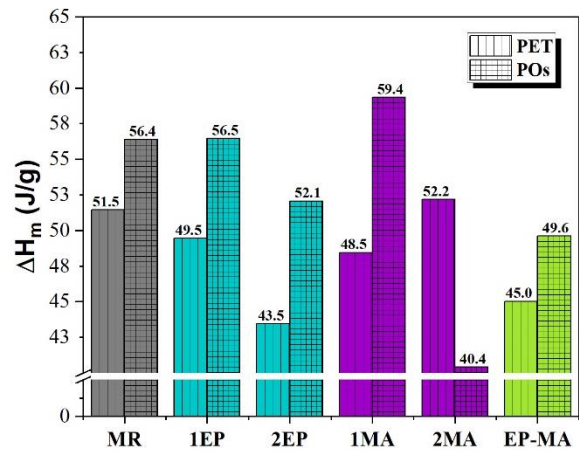
#### 4.1.1 Energía de fusión

La energía requerida para el desarrollo de la transición de fusión en MR y sus mezclas con agentes de acople se presenta en la Figura 3. Para las mezclas compatibilizadas de MR en la transición de fusión de la fracción del PET, a excepción de la mezcla 2MA, se presentó un descenso de energía respecto al de la fusión en MR sin compatibilizantes.



**Figura 2.** Termogramas de la fusión para material reciclado PET/POs (MR). MR a baja concentración

de C-EP y C-MA (a/c) y a alta concentración de C-EP y C-MA (b/d).



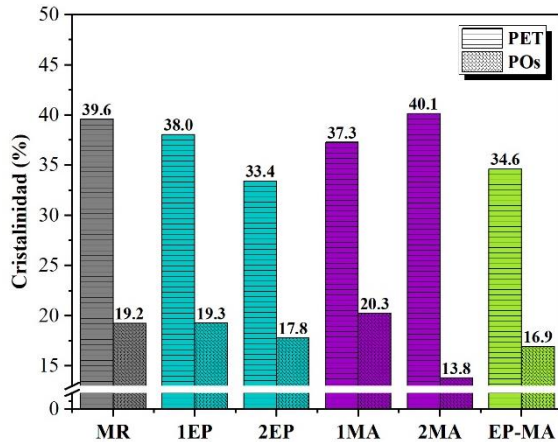
**Figura 3.** Diferencias en la energía empleada para desarrollar la fusión ( $\Delta H_m$  en J/g) en MR y sus mezclas con aditivos C-EP y C-MA.

En relación a la fracción de las POs solo se requirió mayor energía para lograr la fusión en la mezcla 1MA, no obstante, a mayor concentración de este compatibilizante en 2MA se presentó la energía de fusión más baja. Por tanto, la combinación de compatibilizantes y su uso de forma independiente, pero en una alta concentración tienden a reducir el consumo de energía para lograr la fusión del MR.

#### 4.1.2 Cristalinidad

El cambio en la cristalinidad de los polímeros durante el reciclado es una de las características de mayor sensibilidad, la cual se ve influenciada por el rompimiento de cadenas y su posterior reordenamiento de cadenas.

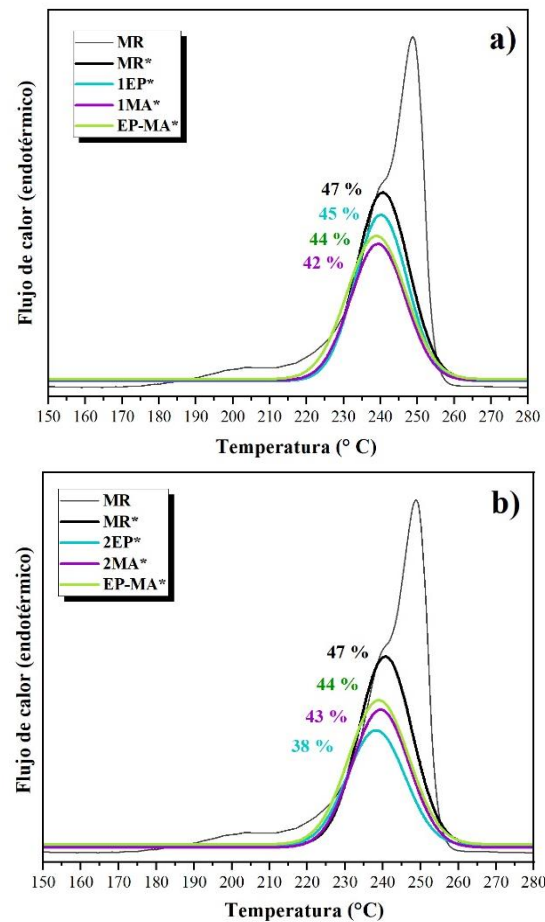
En la Figura 4 se puede observar el cambio en el porcentaje de cristalinidad de los componentes POs y PET del material MR y de las mezclas compatibilizadas con C-EP y C-MA.



**Figura 4.** Porcentaje de Cristalinidad del Material Reciclado (MR) y sus mezclas con aditivos C-EP y C-MA.

El porcentaje de cristalinidad presentado por la fracción de PET dentro de las mezclas compatibilizadas fue descendente, excepto para 2MA, la cual se mantuvo ligeramente superior a MR sin compatibilizar. Por lo que, podría relacionarse la afectación en la cristalinidad del PET por acción de los compatibilizantes. Únicamente, se observó un efecto positivo en la disminución del hombro ancho asociado con cristales imperfectos embebidos en las zonas amorfas del PET (endoterma de pre-fusión, ver Figura 2), la cual con ambos compatibilizantes esta zona se redujo.

En la Figura 5 se presenta el porcentaje que apporto este hombro en cada una de las endotermas. Un porcentaje del 47% de la endoterma total en MR fue observado, con la adición de C-EP fue disminuyendo a razón del aumento en la concentración hasta alcanzar 38%, casi menor al 10% de cristales imperfectos. Con respecto a la adición de C-MA a MR, la disminución fue similar a ambas concentraciones. No obstante, aunque la mezcla 2MA tuvo una disminución de defectos del 43%, su porcentaje de cristalinidad fue el más alto de todos los compuestos con un 40.1%, lo que sitúa a 2MA como la mezcla que más favorece la homogeneidad cristalina del PET.



**Figura 5.** Deconvolución del hombro del PET en MR\*, a baja concentración de C-EP\* y C-MA\* (a) y a alta concentración de C-EP\* y C-MA\* (b).

En relación con el porcentaje de cristalinidad de las POs, las mezclas mostraron similitud en la disminución de la cristalinidad. Las mezclas con baja concentración de C-EP y C-MA se mantuvieron similares a MR, a altas concentraciones el porcentaje de cristalinidad de POs descendió, mientras la adición de ambos compatibilizantes en la mezcla EP-MA, también descendió.

Si bien, la adición de compatibilizantes de forma individual pudo facilitar el reacomodo para la compatibilidad de cristalización en las mezclas 1EP, 2EP y 2MA, su porcentaje cristalino no incremento y se favoreció a las zonas amorfas de las fases de POs.

#### 4.2 Índice de Fluidéz

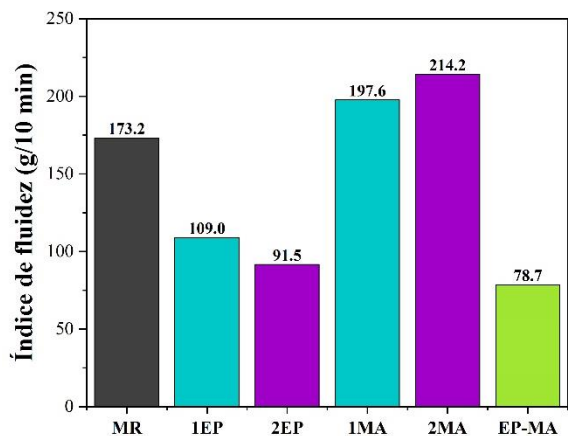
El valor del índice de fluidéz (MFI) de MR y de las distintas mezclas con compatibilizantes se muestra en la Figura 6. Este análisis permitió observar la modificación en el tamaño de las cadenas del plástico, ya que un incremento en el índice de fluidéz se relaciona a la reducción del tamaño de cadenas por efecto de la degradación y a la reducción de la viscosidad.

La adición de C-EP a MR produjo un aumento de la viscosidad del material plástico a razón del aumento de la concentración de C-EP, un decremento del MFI de 38 y 47 % fue observado para 1EP y 2EP, respectivamente. Por otra parte, el compatibilizante C-MA tuvo un efecto inverso sobre MR al reducir la viscosidad, puesto que se incrementó la fluidéz en 14 y 23.7 % para 1MA y 2MA, respectivamente. La combinación de aditivos en EP-MA mostró una disminución del MFI del 55% respecto a MR, caracterizándose como la mezcla con la mayor viscosidad.

El aumento en la viscosidad de las mezclas 1EP, 2EP y EP-MA, fue provocada por un aumento del peso molecular, este fue el resultado del desarrollo de reacciones de injerto del compatibilizante C-EP en el PET del MR. La química del compatibilizante C-EP contiene una zona reactiva con grupos epoxi, estos pueden reaccionar y unirse a los grupos carbonilo e hidroxilo finales del PET [16],[17]. Por tanto, se confirma el compatibilizante (C-EP) posee la capacidad de generar entrecruzamientos de cadenas poliméricas.

Por otra parte, el compatibilizante C-MA también es capaz de reaccionar con la estructura del poliéster, este agente de acople contiene grupos reactivos de compuesto anhídrido maleico con capacidad para enlazarse con los grupos hidroxilo en las cadenas terminales del PET [18]. A diferencia

del compatibilizante C-EP con capacidad de reaccionar con las dos funcionalidades del PET (grupos carboxilo e hidroxilo), el C-MA solo reacciona con los grupos hidroxilo, que además a muy altas temperaturas puede ocurrir reversibilidad de la reacción, por lo que, esta desventaja para reaccionar del C-MA con el PET produce menor entrecruzamiento. En cuanto al papel que desarrollan ambos compatibilizantes con la fracción de las POs, se mejora la miscibilidad de las cadenas de las diferentes poliolefinas. El aumento de fluidéz en 1MA y 2MA se debe a la compatibilidad obtenida entre las POs incluidas en el C-MA y su interacción y acomodo con MR. La mezcla EP-MA, tuvo un aumento de la viscosidad, a pesar de contener agente C-MA, por lo que la combinación de ambos compatibilizantes con MR tuvo un comportamiento más relacionado a C-EP.



**Figura 6.** Índice de fluidéz del Material Reciclado (MR) y sus mezclas con aditivos C-EP y C-MA.

#### 5. Conclusiones

La compatibilización de mezclas de PET y POs con fases inmiscibles fue posible. El empleo de la técnica por DSC y MFI permitió observar la diferencia en interacción que hubo entre un material de desecho (MR) basado en PET / POs con los agentes de acople C-EP y C-MA. Ambos compatibilizantes, con químicas diferentes, desarrollaron



comportamientos que permitieron explorar la integración de las fases inmiscibles.

La adición del aditivo compatibilizante C-EP reacciona con el PET formando injertos que promueven el entrecruzamiento, así mismo, la interacción entre las POs de C-EP y MR logran compatibilizarse. Por consiguiente, este compatibilizante podría proporcionar mejor procesabilidad para integrar nuevamente a MR en la cadena de valor.

C-MA reacciona, pero en menor grado con PET. Logrando compatibilización de las POs presentes en C-MA y MR solo a la concentración alta. A falta del mecanismo de entrecruzamiento y la factibilidad en promover reversibilidad en la reacción de injerto, no se logra mitigar la degradación del MR bajo un proceso de reciclado.

Finalmente, en la combinación de ambos compatibilizantes EP-MA, la reactividad de C-EP predomina al de MA, ya que la compatibilidad lograda es comparada a 2EP.

## 6. Referencias

- [1] “Pet Packaging Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2023 - 2028) Source: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/pet-packaging-market>”, Mordor Intelligence.
- [2] Senado de la República, “Acuerdo nacional para la nueva economía del plástico en México”, el 5 de diciembre de 2019, *Senado de la República, México*.
- [3] Y. Celik, M. Shamsuyeva, y H. J. Endres, “Thermal and Mechanical Properties of the Recycled and Virgin PET—Part I”, *Polymers (Basel)*, vol. 14, núm. 7, p. 1326, mar. 2022, doi: 10.3390/polym14071326.
- [4] C. A. Finch, “Plastics recycling products and processes Edited by R. J. Ehrig Hanser Publishers, Munich, 1992. pp. xiii + 289, price DM98.00. ISBN 3-446- 15882-0”, *Polym Int*, vol. 30, núm. 3, pp. 426–426, ene. 1993, doi: 10.1002/pi.4990300329.
- [5] R. Muthuraj, M. Misra, y A. K. Mohanty, “Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review”, *J Appl Polym Sci*, vol. 135, núm. 24, p. 45726, jun. 2018, doi: 10.1002/app.45726.
- [6] B. Liu y Q. Xu, “Effects of Bifunctional Chain Extender on the Crystallinity and Thermal Stability of PET”, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, vol. 01, núm. 06, pp. 9–15, 2013, doi: 10.4236/msce.2013.16002.
- [7] C. Guerrero, T. Lozano, V. González, y E. Arroyo, “Properties and morphology of poly(ethylene terephthalate) and high-density polyethylene blends”, *J Appl Polym Sci*, vol. 82, núm. 6, pp. 1382–1390, nov. 2001, doi: 10.1002/app.1975.
- [8] S. K. Taghavi, H. Shahrajabian, y H. M. Hosseini, “Detailed comparison of compatibilizers MAPE and SEBS-g-MA on the mechanical/thermal properties, and morphology in ternary blend of recycled PET/HDPE/MAPE and recycled PET/HDPE/SEBS-g-MA”, *Journal of Elastomers & Plastics*, vol. 50, núm. 1, pp. 13–35, feb. 2018, doi: 10.1177/0095244317698738.
- [9] J. Runt y J. Huang, “Polymer blends and copolymer”, en *Handbook of thermal analysis and calorimetry: applications to polymers and plastics*, 1a ed., vol. 3, S. Cheng, Ed.,

- Amsterdam, The Netherlands: ELSEVIER, 2002, 8, pp. 273–294.
- [10] O. Delgadillo-Velázquez, S. G. Hatzikiriakos, y M. Sentmanat, “Thermorheological properties of LLDPE/LDPE blends”, *Rheol Acta*, vol. 47, núm. 1, pp. 19–31, ene. 2008, doi: 10.1007/s00397-007-0193-8.
- [11] A. G. Pedroso y D. S. Rosa, “Mechanical, thermal and morphological characterization of recycled LDPE/corn starch blends”, *Carbohydr Polym*, vol. 59, núm. 1, pp. 1–9, ene. 2005, doi: 10.1016/j.carbpol.2004.08.018.
- [12] N. T. Dintcheva, N. Jilov, y F. P. La Mantia, “Recycling of plastics from packaging”, *Polym Degrad Stab*, vol. 57, núm. 2, pp. 191–203, ago. 1997, doi: 10.1016/S0141-3910(96)00232-7.
- [13] R. A. Shanks, “Concepts and classification of compatibilization processes”, en *Compatibilization of Polymer Blends*, A. r. Ajitha y T. Sabu, Eds., Elsevier, 2020, 2, pp. 31–56. doi: 10.1016/B978-0-12-816006-0.00002-5.
- [14] Y. Celik, M. Shamsuyeva, y H. J. Endres, “Thermal and Mechanical Properties of the Recycled and Virgin PET—Part I”, *Polymers (Basel)*, vol. 14, núm. 7, p. 1326, mar. 2022, doi: 10.3390/polym14071326.
- [15] P. Szymczak, D. Dziadowiec, J. Andrzejewski, y M. Szostak, “The Efficiency Evaluation of the Reactive Extrusion Process for Polyethylene Terephthalate (PET). Monitoring of the Industrial Foil Manufacturing Process by In-Line Rheological Measurements”, *Applied Sciences*, vol. 13, núm. 6, p. 3434, mar. 2023, doi: 10.3390/app13063434.
- [16] S. Coba-Daza *et al.*, “Unlocking Superior Properties in Polypropylene/Polyethylene Terephthalate (Pp/Pet) Blends Using Reactive Compatibilization”, *SSRN*, pp. 1–22, 2023.
- [17] K. Bocz, F. Ronkay, K. E. Decsov, B. Molnár, y G. Marosi, “Application of low-grade recycle to enhance reactive toughening of poly(ethylene terephthalate)”, *Polym Degrad Stab*, vol. 185, p. 109505, mar. 2021, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109505.
- [18] N. Kalfoglou, “Comparison of compatibilizer effectiveness for PET/HDPE blends”, *Polymer (Guildf)*, vol. 36, núm. 23, pp. 4453–4462, 1995, doi: 10.1016/0032-3861(95)96853-Z.