



**Ciencia Latina**  
Internacional

---

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2024,  
Volumen 8, Número 5.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5)

# **ESTUDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA NUEVA MEZCLA DE POLIPROPILENO COMPUESTO PARA SU USO EN MAPERA DE PUERTA**

## **STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF A NEW COMPOSITE POLYPROPYLENE BLEND FOR DOOR TRIM MAP POCKET**

**Gustavo Granados Bermejo**  
Posgrado CIATEQ, A. C., México

**Jose Manuel Rojas**  
General Motors de México

**Georgina Montes de Oca Ramírez**  
CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, México

**Mayra del Angel Monroy**  
CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada, México

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v8i5.14033](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.14033)

## Estudio de Propiedades Mecánicas de una Nueva Mezcla de Polipropileno Compuesto para su uso en Mapera de Puerta

**Gustavo Granados Bermejo<sup>1</sup>**[gus\\_granados@yahoo.com.mx](mailto:gus_granados@yahoo.com.mx)<https://orcid.org/0009-0003-7772-2394>

Posgrado CIATEQ, A. C.

México

**Jose Manuel Rojas**[josemanuel.l.rojas@gm.com](mailto:josemanuel.l.rojas@gm.com)<https://orcid.org/0000-0003-0597-0738>

General Motors de Mexico, SRL de CV

México

**Georgina Montes de Oca Ramírez**[georgina.montesdeoca@ciateq.mx](mailto:georgina.montesdeoca@ciateq.mx)<https://orcid.org/0000-0003-0115-9964>

CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada

México

**Mayra del Angel Monroy**[mayra.delangel@ciateq.com](mailto:mayra.delangel@ciateq.com)<https://orcid.org/0000-0001-8205-0949>

CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada

México

### RESUMEN

El presente trabajo está enfocado a estudiar el efecto de incorporar un polipropileno reciclado posconsumo del sector empaque y embalaje a una formulación base de polipropileno copolímero de impacto virgen utilizada para producir una mapera de automóvil y su impacto en las propiedades mecánicas, reológicas y térmicas en dicha formulación; utilizando un compatibilizante basado en polipropileno co-etileno como modificador de impacto para estudiar su efecto en la recuperación de propiedades. Se realizó un diseño experimental de mezclas de vértices extremos para generar modelos estadísticos, gráficas de trazas y de contorno que permiten explicar el efecto de la resina reciclada y compatibilizante en la formulación polimérica. Se obtuvieron correlaciones arriba de 90% para el índice de fluidez (MFI), módulo elástico a la tensión uniaxial, resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia, calores de fusión y determinación de la composición de etileno presente en la formulación; por el contrario, para el impacto Charpy, temperatura de descomposición térmica y calor de cristalización, la falta de una alta correlación encontrada sugiere realizar estudios adicionales. Se encontró, además que una formulación polimérica con alrededor del 10% de PP reciclado y aditivo compatibilizante alcanza la especificación requerida de PP virgen para la producción de una mapera de automóvil.

**Palabras clave:** polipropileno, reciclaje, compatibilizante, parte automotriz

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [gus\\_granados@yahoo.com.mx](mailto:gus_granados@yahoo.com.mx)

# Study of Mechanical Properties of a New Composite Polypropylene Blend for Door Trim Map Pocket

## ABSTRACT

The present work is focused on studying the effect of incorporating a post-consumer recycled polypropylene from the packaging sector into a base formulation of virgin impact copolymer polypropylene used to produce an automotive door trim map pocket and its impact on the mechanical, rheological, and thermal properties in said formulation. A compatibilizer based on polypropylene co-ethylene was used as an impact modifier to study its effect on property recovery. An extreme vertices experimental design was conducted to generate statistical models, trace plots, and contour plots that explain the effect of the recycled resin and compatibilizer in the polymer formulation. Correlations above 90% were obtained for melt flow index (MFI), elastic modulus under uniaxial tension, yield strength under uniaxial tension, heat of fusion, and determination of the ethylene composition present in the formulation. However, for Charpy impact, thermal decomposition temperature, and crystallization heat, the lack of a high correlation suggests the need for additional studies. It was also found that a polymer formulation with around 10% recycled PP and compatibilizing additive meets the required specification of virgin PP to produce an automotive door trim map pocket.

**Keywords:** polypropylene, mechanical recycling, impact modifier, automotive part

*Artículo recibido 08 agosto 2024  
Aceptado para publicación: 10 septiembre 2024*



## INTRODUCCIÓN

El polipropileno (PP) se ha utilizado en una diversidad de aplicaciones debido a sus excepcionales propiedades mecánicas y térmicas, rentabilidad y facilidad de procesamiento, es elegible para diversas aplicaciones desde materiales de embalaje y productos para el cliente hasta componentes automotrices y dispositivos médicos (Hossain, y otros, 2024).

El PP representa el 16% del mercado mundial de plásticos, además presenta una evolución en las tecnologías de síntesis generando opciones nuevas de producción de copolímeros de polipropileno con propiedades al impacto mejoradas (Impact Copolymer PP). En las últimas décadas el creciente uso de todo tipo de plásticos ha provocado un aumento significativo de las cantidades de residuos plásticos, lo que impacta de manera ambiental y económica. De este residuo plástico solo un pequeño porcentaje se recicla (Alsabri, Tahir, & Al-Ghamdi, 2022). La economía circular, es un modelo que busca reducir la cantidad de residuos a través de procesos de reciclaje que coadyuven en reducir el impacto ambiental y económico general durante su ciclo de vida (Galve, Elduque, Pina, & Javierre, 2022), por ejemplo, la tendencia actual para mejorar la sustentabilidad de vehículos es utilizar resinas que tengan en su composición al menos 30% de resina reciclada.

Sin embargo, en la actualidad existen varios problemas para poder utilizar resinas plásticas en vehículos, uno de ellos es las resinas recicladas por lo general presentan pesos moleculares diferentes a las resinas virgen debido a los procesos de degradación termo mecánica que origina que sus propiedades mecánicas sean menores a las de una resina virgen debido a la escisión y reticulación de la cadena polimérica (Aurrekoetxea, Sarrionandia, Urrutibeascoa, & Maspoch, 2001) y (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017). Además de que el proceso de acopio y clasificación no es 100% robusto lo cual lleva a que una resina reciclada puede tener en su composición otras resinas no necesariamente compatibles entre sí (Ragaert, Delva, & Van Geem, 2017).

Ante la necesidad de promover una economía circular en la industria automotriz es necesario estudiar el uso de resinas recicladas en la fabricación de maperas de puertas. Una de las principales propiedades del polipropileno copolímero de impacto virgen grado inyección es el alto índice de fluidez (MFI, por sus siglas en ingles) que permite un mejor moldeo por inyección de piezas automotrices y la resistencia al impacto que garantiza el desempeño mecánico de la mapera durante su vida útil.



En general, se observa que el polipropileno copolímero de impacto reciclado tiene menor resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia y menor resistencia al impacto en comparación con el virgen (Ji & Jung, 2023). Sin embargo, en la literatura se ha encontrado que la recuperación de ciertas propiedades del polipropileno puede realizarse a través del uso de aditivos compatibilizantes cuando la opción es reciclaje tipo mecánico con resinas poliméricas. Un ejemplo es la recuperación de su resistencia al impacto (Raju, 2016).

Los componentes de la mezcla deben satisfacer dos restricciones, la primera indica que las proporciones tienen que ser cantidades entre cero y uno, y la segunda condiciona a que las proporciones de los componentes sumen siempre la unidad, lo cual causa que los niveles de los componentes  $x_i$  no sean independientes entre sí. Los resultados de la experimentación se analizan para generar modelos de primer orden (Ecuación 1) o modelos cuadráticos (Ecuación 2) dependiendo del análisis de varianza. Las interacciones de componentes que son estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) se conservan, lo que resulta en un modelo cuadrático y las interacciones no significativas ( $p > 0.05$ ) se excluyen del modelo y se reduce llegando a ser de primero orden (Gutiérrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008). El coeficiente (Coef) describe el tamaño y la dirección de la relación entre un término incluido en el modelo y la variable de respuesta. El error estándar del coeficiente (EE Coef) estima la variabilidad entre las estimaciones del coeficiente que se obtendrían si se tomara las muestras de la misma población una y otra vez. El valor t (T) mide la relación entre el coeficiente y su error estándar. El factor de inflación de la varianza (FIV) indica cuánto se infla la varianza de un coeficiente debido a las correlaciones entre los predictores incluidos en el modelo, los valores altos de FIV tienen a producirse en los diseños de mezcla que tienen restricciones en los componentes (Minitab, 2024)

$$E(y) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i \quad \text{Ecuación 1}$$

$$E(y) = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde  $E(y)$  es la ecuación estimada para la respuesta,  $\beta_i$  es el coeficiente del componente,  $\beta_{ij}$  es el coeficiente de la interacción de los componentes,  $x_i$  es la proporción del componente en la mezcla,  $x_i x_j$  es el producto de las proporciones de los componentes en la mezcla y  $n$  es el número de componentes de la mezcla.



Se utiliza las gráficas de trazas y gráfica de contornos para determinar la influencia de los componentes de las mezclas en cada una de las respuestas.

Además, se determina las fracciones cristalinas ( $W_c$ ) a partir del calor experimental de fusión ( $\Delta H_m$ ), temperaturas características de fusión ( $T_{pm}$ ) obtenidas por ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) y el calor de fusión teórico ( $\Delta H_m^0$ ) mediante la siguiente fórmula (Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2004).

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} * 100 \text{ [\%]} \quad \text{Ecuación 3}$$

En la Tabla 1 se muestra los valores de entalpia de fusión teóricas y temperaturas máximas de fusión para los materiales polipropileno, polietileno y polipropileno copolímero de impacto.

Asumiendo que la entalpia total de la mezcla ( $\Delta H_m^{mezcla}$ ) es una suma ponderada de los componentes individuales.

$$\Delta H_m^{mezcla} = W_{PE} * \Delta H_m^{0PE} + W_{PP} * \Delta H_m^{0PP} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $W_{PE}$  es la fracción cristalina de polietileno,  $W_{PP}$  es la fracción cristalina de polipropileno,  $\Delta H_m^{0PE}$  es calor de fusión teórico de polietileno,  $\Delta H_m^{0PP}$  es calor de fusión teórico de polipropileno.

Se calcula el porcentaje de polietileno (%PE).

$$\%PE = \left( \frac{W_{PE}}{W_{PE} + W_{PP}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

Las propiedades reológicas y mecánicas de un PP copolímero de impacto virgen para la fabricación de mapera de puerta por proceso de inyección son: índice de fluidez  $\geq 30$  g/10 minuto, módulo elástico a la tensión uniaxial @ 23°C  $\geq 1200$  MPa, resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia @ 23°C  $\geq 24$  MPa e impacto Charpy ranurado @ 23°C  $\geq 5$  kJ/m<sup>2</sup>. Estas propiedades y valores se usan como referencia para compararlos con los resultados de mezclas variando diferentes contenidos de PP virgen, PP reciclado y compatibilizante.

Este estudio se enfoca a estudiar el efecto de incorporar polipropileno reciclado hasta un 30% a una formulación base de polipropileno copolímero de impacto virgen utilizada en la industria automotriz para la producción de mapera para puerta de vehículos y su resultado en las propiedades mecánicas, reológicas y térmicas de dicha formulación.

Este estudio parte del hecho que una mezcla polimérica basada en PP virgen y PP reciclado recupera propiedades similares al PP virgen cuando se utiliza un compatibilizante modificador de impacto tipo copolímero aleatorio de etileno-propileno. Así, se propone utilizar el diseño experimental de mezcla de vértices extremos en congruencia con trabajos previos ya que permite determinar la influencia de cada componente de una mezcla para cada una de las respuestas a estudiar (Chen , et al., 2023).

## **METODOLOGÍA**

### **Materiales**

Se estudia la influencia de tres resinas para una nueva mezcla de polipropileno compuesto. La resina reciclada ( $x_1$ ) es un polipropileno-etileno reciclado posconsumo del sector empaque y embalaje del proveedor Polisol, la resina virgen ( $x_2$ ) es una resina polipropileno copolímero de impacto (IPC) virgen AXO3BE3 donada por el proveedor ExxonMobil y el compatibilizante ( $x_3$ ) es resina de polipropileno isotáctico de unidades repetidas con distribución aleatoria de etileno de Vistamaxx 6502 con índice de fluidez de 45 g/10min (230°/2.16Kg) donado por el proveedor ExxonMobil.

### **Método.**

Se emplea un diseño de experimentos de mezclas de vértices extremos ya que el rango experimental cubre una fracción dentro del simplex. La fracción de PP reciclado se basa para poder estudiar de 0.3 a 0.5 con un margen adicional de 0.2, la porción de compatibilizante se utiliza 0.05 con un margen adicional de 0.05 y la fracción de PP virgen se adapta a que la mezcla resultante para dar un total de 1 o 100% en cada formulación. Las limitaciones del rango experimental para las fracciones se muestran en la Tabla 2, adicionalmente se analizan los elementos control (PP 100% virgen y PP 100% reciclado) mostrados en la Tabla 3.

Se usa el software de Minitab® 21.1.1 para generar el diseño de mezclas, tablas de coeficientes de regresión, tablas de resumen del modelo, gráfica de trazas (gráficas de rastreo de respuesta Cox en Minitab) y gráficas de contorno para cada una de las respuestas. Los parámetros del diseño de mezclas de vértices extremos seleccionados son: 1 grado de libertad, se amplía el diseño con punto central, se amplía el diseño con puntos axiales, 1 replica y se aleatorizan las corridas. La Tabla 4 y la Figura 1 muestran el diseño de experimentos obtenido con 9 corridas variando el contenido de PP reciclado ( $x_1$ ), PP virgen ( $x_2$ ), y compatibilizante ( $x_3$ ).





### **Preparación de mezclas**

Se utiliza un extrusor doble husillo co-rotacional Marca Useon, modelo TDD30 con secciones de mezclado dispersivo y distributivo con una L/D de 36. Todos los experimentos se llevan a cabo bajo a las mismas condiciones de proceso con una velocidad de husillo a 30RPM y con un perfil de temperatura de 120°C a 190°C a lo largo de los husillos. Se usa un dado con salida para pellet tipo espagueti (strand). El plástico fundido se pasa por una tina de enfriamiento con agua y posteriormente se corta con una peletizadora obteniendo pellets de forma cilíndrica de 3mm de diámetro y 4mm de largo. Estos pellets se utilizan para las pruebas de Índice de fluidez (MFI), para el estudio de calorimetría diferencial de barrido (DSC), para el análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) y moldeo por inyección de probetas. La Figura 2 muestra los pellets obtenidos durante la extrusión siguiendo el diseño experimental (DOE) propuesto, así como los elementos de control.

### **Preparación de Probetas**

Las probetas se fabrican por moldeo por inyección con moldes del proveedor Polisol que cumplen con las dimensiones requeridas en la ISO 294-1 utilizando una inyectora hidráulica SM50V1 con capacidad de 50 toneladas de cierre. En la Figura 3 se muestra las probetas moldeadas de cada una de las corridas del DOE y de los elementos de control. La probeta A se utiliza para las pruebas de módulo elástico a la tensión uniaxial y resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia y la probeta B se usa para la prueba de impacto Charpy ranurado.

### **Condiciones de pruebas**

El índice de fluidez (R1) se midió con un plastómetro United Test, modelo MFI 403; horno Krups, modelo OK505; balanza Ohaus, modelo PA224, siguiendo la norma ISO 1133-1:2011. Procedimiento A, temperatura: 230°C, carga: 2.16 Kg.

El módulo elástico a la tensión uniaxial (R2) se midió con una máquina universal de ensayos, marca United Test, modelo WDW-20Y, estándar ISO 527-1 / ISO 527-2 a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , probeta tipo 1A a un 1 mm/minuto.

La resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia (R3) se midió en una máquina universal de ensayos, marca United Test, modelo WDW-20Y, siguiendo la norma ISO 527-1 / ISO 527-2 a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , probeta tipo 1A a 50 mm/minuto.



El impacto Charpy ranurado (R4) se midió con Impactómetro United Test, modelo CEAST 9050, ranuradora United Test, Modelo ZQK-20, siguiendo la norma ISO 179-1:2010. Método ISO 179/1e A, Tipo de ranura: C, Energía del péndulo con ranura: 25 J.

Calor de fusión (R5 y R6) y calor de cristalización (R7) por calorimetría diferencial de barrido (DSC), se midió con equipo: TA- Instruments, modelo Q200, muestra: 5.02 mg, velocidad de calentamiento: 10 °C/min, ciclo 1: calentamiento de 40 °C a 220 °C, ciclo 2: enfriamiento de 220 °C a 40 °C y ciclo 3: calentamiento de 40 °C a 220 °C, calibración con indio metálico.

El porcentaje de polietileno (R8) presente en la formulación polimérica se calcula con el valor del calor de fusión, respuestas R5 y R6; es decir, con el calor de fusión de polietileno y con el calor de fusión de polipropileno, respectivamente. Usando las ecuaciones 3 a 5. Es conveniente aclarar que la determinación del porcentaje de polietileno en este estudio no distingue entre una fracción de polietileno inherente a las cadenas poliméricas y el polietileno presente en una mezcla física de polietileno-polipropileno.

La temperatura de descomposición pico (R9) por prueba de TGA se mide con equipo marca TA Instruments, modelo Discovery SDT 650, a una velocidad de calentamiento de 10°C/min, dentro del intervalo de temperatura de ambiente a 800°C en condiciones de atmósfera de nitrógeno.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la Tabla 5 se muestran los resultados para las respuestas R1-Índice de fluidez (MFI), R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial, R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia y R4-Impacto Charpy ranurado. Por otro lado, en la Tabla 6 se muestra los resultados para las respuestas R5-Calor de fusión 1 ( $\Delta H_{m1}$ ) y Temperatura de fusión 1, R6-Calor de fusión 2 ( $\Delta H_{m2}$ ) y Temperatura de fusión 2, R7-Calor de cristalización ( $\Delta H_c$ ), R8-Porcentaje de polietileno (PE%), R9-Temperatura de descomposición pico ( $T_{dp}$ ).

### **Resultados R1-Índice de fluidez (MFI)**

Las Tablas 7 y 8 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R1-MFI. Se conserva las interacciones entre los componentes que si son significativos ( $p < 0.05$ ). El modelo resultante es cuadrático con una predicción robusta ya que se observa un buen ajuste con los

datos experimentales mostrando una R cuadrada de 99.83% y una R cuadrada predictiva de 99.33%. El modelo canónico ajustado de segundo orden para R1-MFI se expresa como la ecuación 6:

$$\text{MFI} = 11.42 x_1 + 34.546 x_2 + 51.09 x_3 - 34.06 x_1 x_2 - 50.9 x_1 x_3 \quad \text{Ecuación 6}$$

En la Figura 4a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que la proporción de compatibilizante (línea discontinua verde) en la mezcla cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento del MFI, lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 7). Este resultado es congruente con el hecho de que el compatibilizante es de alto MFI, es decir, el peso molecular de este compuesto es bajo teniendo una función de plastificante en el intervalo de composición analizado. Por lo contrario, a medida que la proporción de PP reciclado aumenta en la mezcla el MFI disminuye significativamente dado que el PP reciclado contiene cierta composición de polietileno y este último material presenta entrecruzamiento de las cadenas por consiguiente aumenta la viscosidad de la mezcla y tiene congruencia con lo encontrado por (Loulcheva, Proietto, Jilov, & La Mantia, 1997) y (Saikrishnan, Jubinville, Tzoganakis, & Mekonnen, 2020). En la Figura 4b se presenta la gráfica de contornos donde se aprecia que al mantener la proporción de PP reciclado y al aumentar proporción del compatibilizante en la mezcla, la variación del MFI aumenta y no es significativa.

### **Resultados R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial @ 23°C**

Las Tablas 9 y 10 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial. Se conservan las interacciones entre los componentes que si son significativos ( $p < 0.05$ ). El modelo resultante es cuadrático con una predicción robusta ya que se observa un buen ajuste con los datos experimentales mostrando una R cuadrada de 99.23% y una R cuadrada predictiva de 97.8%. El modelo canónico ajustado de segundo orden para R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial se expresa como la ecuación 7:

$$\text{Módulo elástico} = 1190.3 x_1 + 1279.8 x_2 - 2000 x_3 - 443 x_1 x_2 \quad \text{Ecuación 7}$$

En la Figura 5a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que la proporción de PP virgen en la mezcla cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento del módulo elástico a la tensión uniaxial, lo cual puede ser visto a través de los valores coeficientes del modelo (Tabla 9), como se espera ya que el PP reciclado utilizado presenta un menor modulo elástico a la tensión uniaxial.

Los valores observados de modulo elástico a la tensión uniaxial se pueden relacionar con la cristalinidad de las mezclas observado en la Tabla 6 que el calor de fusión el PP virgen es mayor que el de PP reciclado. En general, las mezclas estudiadas tienen cristalinidades diferentes en función de la proporción del PP virgen/PP reciclado y tiene congruencia con lo encontrado por (Behalek, Seidl, & Habr, 2016) y (Saikrishnan, Jubinville, Tzoganakis, & Mekonnen, 2020). Por lo contrario, a medida que la proporción de compatibilizante aumenta en la mezcla el módulo elástico a la tensión uniaxial disminuye considerablemente, debido que el compatibilizante utilizado por su bajo peso molecular (MFI alto) y está influyendo en la mezcla como un agente plastificante mejorando las interacciones fisicoquímicas entra las fases PP/PE. También esta tendencia observada es posible visualizarla en la gráfica de contornos (Figura 5b).

### **Resultados R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia@ 23°C**

Las Tablas 11 y 12 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia. Se descartan las interacciones entre los componentes que no son significativos ( $p > 0.05$ ). El modelo resultante es lineal con una predicción robusta ya que se observa un buen ajuste de los datos experimentales mostrando una R cuadrada de 96.79% y una R cuadrada predictiva de 91.42%. El modelo canónico de primer orden ajustado para R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia se expresa en la ecuación 8.

$$\text{Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia} = 23.748 x_1 + 25.065 x_2 - 0.08 x_3 \quad \text{Ecuación 8}$$

En la Figura 6a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que la proporción de PP virgen en la mezcla cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento de la resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia, lo cual puede ser visto a través de los coeficientes del modelo (Tabla 11), como se espera ya que el PP virgen utilizado presenta una mayor resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia que el PP reciclado. La resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia se relaciona con el peso molecular y con la cristalinidad de los polímeros, tal como se observa en los datos experimentales obtenidos mostrados en la Tabla 6, comparando el calor de fusión del PP virgen que es mayor respecto al PP reciclado. En general, se puede decir que las mezclas estudiadas tienen cristalinidades diferentes en función de la proporción del PP virgen/PP reciclado en congruencia con lo reportado por (Behalek, Seidl, & Habr, 2016) y (Saikrishnan, Jubinville, Tzoganakis, & Mekonnen, 2020). Por lo contrario, a

medida que la proporción de compatibilizante aumenta en la mezcla, la resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia disminuye considerablemente como se observa en la Figura 6, debido a que el compatibilizante utilizado tiene un bajo peso molecular (MFI alto), esta muestra una influencia en la mezcla como un agente plastificante mejorando las interacciones fisicoquímicas entre las fases PP/PE tanto en el PP virgen como en el PP reciclado. Esta tendencia también es observada en la gráfica de contornos (Figura 6b).

#### **Resultados R4-Impacto Charpy ranurado @ 23°C**

Las Tablas 13 y 14 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R4-Impacto Charpy ranurado. Se descartan las interacciones entre los componentes que no son significativos ( $p > 0.05$ ). El modelo resultante es lineal con un porcentaje de variación de la respuesta R cuadrada de 67.87% que explica que tan bien se ajusta el modelo a los datos y a diferencia de los resultados anteriores el impacto Charpy ranurado tiene una predicción baja mostrando una R cuadrada predictiva de 5.60%. Para incrementar la R cuadrada predictiva es necesario realizar mayor número de réplicas de las mezclas poliméricas. El modelo canónico ajustado de primer orden para R4-Impacto Charpy ranurado se expresa en la ecuación 9.

$$\text{Impacto Charpy} = 4.584 x_1 + 6.254 x_2 + 22.71 x_3 \quad \text{Ecuación 9}$$

En la Figura 7a se presenta la gráfica de trazas observando que el aumento en la proporción de compatibilizante en la mezcla tiene una influencia más significativa sobre el incremento en la resistencia al impacto Charpy ranurado, lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 13) donde el valor de  $x_3$  (compatibilizante) es significativa mayor a los valores de  $x_1$  (reciclado) y  $x_2$  (virgen). En la Figura 7b se presenta la gráfica de contornos donde se aprecia que al mantener la proporción de PP reciclado y al aumentar la proporción del compatibilizante en la mezcla hay un aumento del impacto Charpy ranurado en cada punto observado. En este caso el compatibilizante utilizado mejora la adhesión entre las fases de etileno/propileno en la mezcla tanto para el PP virgen como para el PP reciclado, dado que el compatibilizante presenta en su estructura y composición ambas fracciones de etileno/propileno, como lo encontrado en la literatura (Raju, 2016).

### Resultados de R5-Calor de fusión 1 ( $\Delta H_{m1}$ )

Las Tablas 15 y 16 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R5- $\Delta H_{m1}$ . Se conserva la interacción entre los componentes que si son significativos ( $p < 0.05$ ). El modelo resultante es cuadrático con una predicción robusta ya que se observa un buen ajuste con los datos experimentales mostrando una R cuadrada de 99.72% y una R cuadrada predictiva de 98.78%. El modelo canónico ajustado de segundo orden para R5- $\Delta H_{m1}$  se expresa como la ecuación 10:

$$\Delta H_{m1} = 13.195 x_1 + 0.45 x_2 - 2.44 x_3 + 18.43 x_1 x_3 \quad \text{Ecuación 10}$$

En la Figura 8a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que el valor más significativo es la proporción de  $x_1$  (PP reciclado) ya que cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento del  $\Delta H_{m1}$ , lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 15). Así mismo, la proporción del PP reciclado muestra una fuerte interacción con la proporción del compatibilizante; lo cual se puede ver a través de los valores de los coeficientes del modelo dado que  $x_1$  tiene un valor de 13.195 y la interacción  $x_1 x_3$  tiene un valor de 18.43. Esto es debido a que la temperatura de fusión 1 en la experimentación de DSC, que muestra la Tabla 6 y Gráfica 9, mantiene un rango entre 123°C a 127°C la cual corresponde al polietileno de acuerdo con la literatura reportada en Tabla 1 (Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2004), además en la Tabla 6 y Figura 9 se observa que el PP virgen contiene un  $\Delta H_{m1}$  de 0 J/g, es decir, tiene una cantidad de polietileno lo suficientemente baja para no ser cuantificado como un pico endotérmico bien definido en el DSC, esto explica por qué al aumentar la proporción de PP reciclado en la mezcla el  $\Delta H_{m1}$  también aumenta ya que el contenido de polietileno aumenta también. En la Figura 8b (gráfica de contornos) se observa que en las proporciones de PP reciclado de hasta el 40% correspondiente al punto centroide las interacciones  $x_1 x_3$  no tiene un efecto significativo en  $\Delta H_{m1}$ . Sin embargo, la interacción  $x_1 x_3$  arriba del 40% de PP reciclado tiene un impacto significativo en  $\Delta H_{m1}$ .

### Resultados de R6-Calor de fusión 2 ( $\Delta H_{m2}$ )

Las Tablas 17 y 18 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R6- $\Delta H_{m2}$ . Se descartan las interacciones entre los componentes que no son significativos ( $p > 0.05$ ).

El modelo resultante es lineal con una predicción robusta mostrando una R cuadrada de 97.38% y una R cuadrada predictiva de 95.75%. El modelo canónico de primer orden ajustado R6- $\Delta H_{m2}$  se expresa como la ecuación 11.

$$\Delta H_{m2} = 58.31 x_1 + 82.84 x_2 + 7.3 x_3 \quad \text{Ecuación 11}$$

En la Figura 10a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que el componente más significativo es la proporción de  $x_2$  (PP virgen) ya que cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento del  $\Delta H_{m2}$ , lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 17). Esto es debido a que la temperatura de fusión 2 en la experimentación de DSC, que muestra la Tabla 6 y Figura 9, mantiene un rango entre 162°C a 166°C atribuido al polipropileno de acuerdo con la Tabla 1 (Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2004). Si consideramos que el calor de fusión de la mezcla ( $\Delta H_m^{mezcla}$ ) es la suma ponderada de los componentes individuales (R5 + R6 de la Tabla 6), entonces el PP reciclado tiene un  $\Delta H_m^{PP\text{ reciclado}}$  total de 71.33 J/g que corresponden a  $\Delta H_m^{PE}$  de 14.91 J/g y  $\Delta H_m^{PP}$  de 56.42 J/g, por lo cual en su composición contiene polietileno y propileno, mientras que, el PP virgen tiene un  $\Delta H_m^{PP\text{ virgen}}$  total de 87.81 J/g que corresponden a  $\Delta H_m^{PE}$  de 0 J/g y  $\Delta H_m^{PP}$  de 87.81 J/g, por lo cual se verifica que la composición es prácticamente polipropileno. En la Figura 10b (gráfica de contornos) se observa que manteniendo la proporción de PP reciclado y aumentando el contenido de compatibilizante en la mezcla lleva a una disminución de la fracción propileno y aumento de la fracción polietileno; lo cual se refleja en la disminución del  $\Delta H_{m2}$ , en congruencia con lo reportado por (Ji & Jung, 2023). Esto significa que en mezclas PP virgen/PP reciclado el compatibilizante utilizado tiene un efecto en la cristalinidad.

### **Resultados de R7-Calor de cristalización ( $\Delta H_c$ )**

De acuerdo con los resultados obtenidos de DSC, en la Figura 11 se observa solo un proceso exotérmico bien definido para la mayoría de los materiales con algunas excepciones donde se observa un hombro difícil de deconvolucionar, por lo que en este trabajo solo se considera un  $\Delta H_c$  ya que no es posible separar el  $\Delta H_c$  de la fracción polietileno, del  $\Delta H_c$  de la fracción propileno.

Las Tablas 19 y 20 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R7- $\Delta H_c$ . Se descartan las interacciones entre los componentes que no son significativos ( $p > 0.05$ ).



El modelo resultante es lineal con una predicción aceptable ya que se observa un buen ajuste con los datos experimentales mostrando una R cuadrada de 87.76% y R cuadrada predictiva de 80.01%. El modelo canónico de primer orden ajustado para R7- $\Delta H_c$  se expresa en la ecuación 12:

$$\Delta H_c = 92.48 x_1 + 93.8 x_2 + 4.8 x_3 \quad \text{Ecuación 12}$$

En la Figura 12a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que el componente más significativo es la proporción de  $x_2$  (PP virgen) ya que cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento de  $\Delta H_c$ , lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 19). Esto es debido a que el PP reciclado tiene un  $\Delta H_c$  de 92.40 J/g, mientras que, el PP virgen tiene un  $\Delta H_c$  de 94.80 J/g (Tabla 6) lo que indica es que el PP virgen tiende a tener una cristalinidad mayor que el PP reciclado, en congruencia con lo reportado por (Behalek, Seidl, & Habr, 2016), dado que este último presenta un mayor contenido de fracción polietileno. Puesto que, el PP virgen mayormente contiene PP que puede ser isotáctico, lo que significa que los grupos de metilo están orientados en la misma dirección a lo largo de la cadena polimérica y esto permite que la cadena de PP empaquen en forma más ordenada favoreciendo la cristalización, mientras que el PP reciclado contiene más fracción polietileno. Dado que polietileno presenta una estructura molecular más simple, pero con mayor flexibilidad, lo que disminuye la tendencia a formar cristales comparado con el polipropileno. Es decir, la proporción de PP virgen tiende a dominar el proceso de cristalización en la mezclas. En la Figura 12b (gráfica de contornos) se observa que al mantener la proporción de PP reciclado y al aumentar la proporción del compatibilizante en la mezcla el  $\Delta H_c$  disminuye. Esto indica que el compatibilizante está promoviendo la interacción entre la fase de PE y PP, lo que lleva a una mezcla más homogénea pero también interfiere en el proceso de cristalización del PP, reduciendo la cristalinidad general.

### **Resultados de R8- Porcentaje de polietileno (PE%)**

Las Tablas 21 y 22 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R8-PE%. Se conservan las interacciones entre los componentes que si son significativos ( $p < 0.05$ ) tal como la interacción  $x_1 x_3$  (PP reciclado y compatibilizante). El modelo resultante es cuadrático con una predicción robusta ya que se observa un buen ajuste con los datos experimentales mostrando una R cuadrada de 99.85% y una R cuadrada predictiva de 98.19%.





El modelo canónico de segundo orden ajustado para R8-PE% se expresa como la ecuación 13:

$$PE\% = 0.14547 x_1 + 0.00638 x_2 - 0.0197 x_3 - 0.0524 x_1 x_2 + 0.2713 x_1 x_3 \quad \text{Ecuación 13}$$

En la Figura 13a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que el componente más significativo es la proporción de  $x_1$  (PP reciclado) ya que cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento de PE%, adicionalmente en la Tabla de coeficientes del modelo (Tabla 21) se observa que interacción más significativa es la  $x_1 x_3$  (PP reciclado y compatibilizante). En la Figura 13b se presenta la gráfica de contornos donde se aprecia que al mantener la proporción de PP reciclado y al aumentar la proporción del compatibilizante en la mezcla hay un ligero aumento del porcentaje polietileno en cada punto observado, ya que, el compatibilizante también contiene etileno y propileno, por lo cual al aumentar la proporción del compatibilizante se aumenta también la proporción de etileno en la mezcla.

#### **Resultados de R9- Temperatura de descomposición pico ( $T_{dp}$ )**

Las Tablas 23 y 24 muestran los resultados de los coeficientes de regresión estimados del modelo para R9- $T_{dp}$ . Se descartan las interacciones entre los componentes que no son significativos ( $p > 0.05$ ). El modelo resultante es lineal con un porcentaje de variación de la respuesta R cuadrada de 83.85% que explica que tan bien se ajusta el modelo a los datos y una predicción baja mostrando una R cuadrada predictivo de 55.24%. Para incrementar la R cuadrada predictiva es necesario realizar mayor número de réplicas de las mezclas poliméricas. El modelo canónico de primer orden ajustado para R9- $T_{dp}$  se expresa como la ecuación 14.

$$T_{dp} = 460.96 x_1 + 455.53 x_2 + 445.95 x_3 \quad \text{Ecuación 14}$$

En la Figura 14a se presenta la gráfica de trazas donde se observa que el componente más significativo es la proporción de  $x_1$  (PP reciclado) ya que cuando aumenta tiene una influencia más significativa en el incremento de  $T_{dp}$ , lo cual puede ser visto también a través de los coeficientes del modelo (Tabla 23) Esto es debido a que el PP reciclado tiene una  $T_{dp}$  de 459.76 °C, mientras que, el PP virgen tiene una  $T_{dp}$  de 455.02 °C, que muestra la Tabla 6 y Figura 15, lo que indica es que el PP reciclado es más estable térmicamente. Una menor  $T_{dp}$  del PP virgen es debido a que en su composición es mayormente PP y que los carbonos terciarios de PP en la cadena principal son más susceptibles al ataque térmico, lo

que permiten una descomposición y ruptura más fácil de la cadena principal. Como se ha descrito anteriormente, el PP reciclado contiene cierta composición de polietileno y está actuando como estabilizador térmico, tal como lo reporta (Saikrishnan, Jubinville, Tzoganakis, & Mekonnen, 2020). En la Figura 14b se presenta la gráfica de contornos donde se aprecia que al mantener la proporción de PP reciclado y al aumentar la proporción del compatibilizante en la mezcla, hay una ligera disminución de la temperatura de descomposición pico en cada punto observado. Por otro lado, la diferencia entre  $T_{dp}$  de PP reciclado respecto al PP virgen es de 4.74 °C, lo cual es muy pequeña para considerarla como un efecto significativo.

### **Análisis de contenido de PP reciclado con los modelos predictivos**

Utilizando las ecuaciones de los modelos canónicos ajustados para las respuestas R1-R6 se pueden analizar diferentes contenidos de PP virgen, PP reciclado y compatibilizante. Estos resultados se presentan en la Tabla 25. De manera general, cuando se mantiene un contenido de PP reciclado y se incrementa el contenido de compatibilizante se predice un aumento en el MFI (R1), una disminución de módulo de Young (R2), una disminución del esfuerzo de la cedencia (R3), un incremento del impacto Charpy ranurado (R4), y una disminución tanto del calor de fusión de la fracción polietileno (R5) como de la fracción polipropileno (R6).

### **ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS.**

**Tabla 1** Temperaturas características y valores de entalpía de fusión teóricas para la fracción cristalina.

<b>Material</b>	<b>(J/g)</b>	<b>(°C)</b>	<b>(J/g)</b>	<b>(°C)</b>
LDPE	293	105-120		
HDPE	293	130-140		
PP Homopolímero	207	160-165		
PP copolímero de impacto*	68.68-104.80	164.20-167.42	95.31-100.9	129.5-134.33

(Ehrenstein, Riedel, & Trawiel, 2004) y (Granta MI, 2023)\*.

**Tabla 2** Límites de los componentes de la mezcla

<b>Componente</b>	<b>Inferior</b>	<b>Superior</b>
$x_1$ -PP Reciclado	0.1	0.7
$x_2$ -PP Virgen	0	1
$x_3$ -Compatibilizante	0	0.1

**Tabla 3** Elementos de control

Etiqueta	$x_1$ -PP Reciclado	$x_2$ -PP Virgen	$x_3$ -Compatibilizante
C1 - 16040	1	0	0
C2 - 16041	0	1	0

**Tabla 4** Diseño Vértices Extremos de Mezclas

StdOrder	RunOrder	Etiqueta	$x_1$ -PP Reciclado	$x_2$ -PP Virgen	$x_3$ -Compatibilizante
E1	5	16031	0.10	0.900	0.000
E2	6	16032	0.10	0.800	0.100
E3	9	16033	0.70	0.300	0.000
E4	4	16034	0.70	0.200	0.100
E5	7	16035	0.40	0.550	0.050
E6	8	16036	0.25	0.725	0.025
E7	2	16037	0.25	0.675	0.075
E8	1	16038	0.55	0.425	0.025
E9	3	16039	0.55	0.375	0.075

**Tabla 5** Resultados reológicos y mecánicos

Etiqueta	R1 (g/10min)	R2 (MPa)	R3 (MPa)	R4 (kJ/m <sup>2</sup> )
16031	29.3	1236	25.01	5.92
16032	30.9	904	22.65	8.64
16033	10.9	1114	24.30	5.36
16034	11.6	832	21.44	6.27
16035	17.6	995	23.24	6.24
16036	22.4	1105	23.78	5.93
16037	22.9	915	22.72	6.27
16038	14.2	1037	23.73	6.21
16039	14.1	903	22.66	6.84
16040	6.3	1107	25.50	5.01
16041	32.1	1356	25.88	5.17

R1-Índice de fluidez (MFI), R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial, R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia y R4-Impacto Charpy ranurado

**Tabla 6** Resultados térmicos DSC y TGA

<b>Etiqueta</b>	<b>R5 (J/g)</b>	<b>(°C)</b>	<b>R6 (J/g)</b>	<b>°C</b>	<b>R7 (J/g)</b>	<b>R8 (%)</b>	<b>R9 (°C)</b>
16031	1.68	123.00	79.86	164.33	92.99	1.46%	456.49
16032	1.63	123.28	72.29	164.94	84.59	1.57%	454.25
16033	9.41	126.51	65.07	162.97	92.37	9.27%	459.29
16034	10.58	126.54	58.21	162.03	84.56	11.38%	458.95
16035	5.71	125.91	71.83	163.57	91.49	5.32%	457.34
16036	3.78	125.17	74.81	163.76	91.44	3.45%	456.61
16037	3.87	125.38	71.09	163.14	86.58	3.70%	457.09
16038	7.69	126.26	67.63	163.02	91.30	7.44%	457.55
16039	7.60	126.24	62.42	162.36	84.07	7.92%	457.44
16040	14.91	126.97	56.42	162.29	92.40	15.73%	459.76
16041	-	-	87.81	165.91	94.80	0.00%	455.02

R5-Calor de fusión 1 ( $\Delta H_{m1}$ ) y Temperatura de fusión 1, R6-Calor de fusión 2 ( $\Delta H_{m2}$ ) y Temperatura de fusión 2, R7-Calor de cristalización ( $\Delta H_c$ ), R8-Porcentaje de polietileno (PE%), R9-Temperatura de descomposición pico ( $T_{dp}$ )

**Tabla 7** Coeficientes de regresión estimados para R1-Índice de fluidez (proporciones del componente)

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
x1-Reciclado	11.420	1.400	*	*	19.10
x2-Virgen	34.546	0.636	*	*	6.69
x3-Compatibilizante	51.090	6.580	*	*	7.86
x1-Reciclado*x2-Virgen	-34.060	4.020	-8.48	0.001	23.90
x1-Reciclado*x3-Compatibilizante	-50.900	14.700	-3.45	0.026	8.68

**Tabla 8** Resumen del modelo para R1-Índice de fluidez

<b>S</b>	<b>R-cuadrado</b>	<b>R-cuadrado (ajustado)</b>	<b>PRESS</b>	<b>R-cuadrado (pred)</b>
0.438774	99.83%	99.65%	11.7999	97.33%

**Tabla 9** Coeficientes de regresión estimados para R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial (proporciones del componente)

<b>Término</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
x1-Reciclado	1190.3	38.5	*	*	13.60
x2-Virgen	1279.8	20.2	*	*	6.30
x3-Compatibilizante	-2000.0	127.0	*	*	2.74
x1-Reciclado*x2-Virgen	-443.0	127.0	-3.5	0.017	22.10



**Tabla 10** Resumen del modelo para R2-Módulo elástico a la tensión uniaxial

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
14.3688	99.23%	98.78%	2972.88	97.80%

**Tabla 11** Coeficientes de regresión estimados para R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	23.748	0.231	*	*	2.10
x2-Virgen	25.065	0.179	*	*	2.12
x3-Compatibilizante	-0.080	1.870	*	*	2.54

**Tabla 12** Resumen del modelo para R3-Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.218906	96.79%	95.73%	0.769629	91.42%

**Tabla 13** Coeficientes de regresión estimados para R4-Impacto Charpy ranurado (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	4.584	0.638	*	*	2.10
x2-Virgen	6.254	0.494	*	*	2.12
x3-Compatibilizante	22.710	5.160	*	*	2.54

**Tabla 14** Resumen del modelo para R4-Impacto Charpy ranurado

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.605150	67.87%	57.16%	6.45562	5.60%

**Tabla 15** Coeficientes de regresión estimados para R5-Calor de fusión 1 (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	13.195	0.312	*	*	3.88
x2-Virgen	0.450	0.227	*	*	3.46
x3-Compatibilizante	-2.440	3.250	*	*	7.83
x1-Reciclado*x3-Compatibilizante	18.430	7.030	2.62	0.047	8.03

**Tabla 16** Resumen del modelo para R5-Calor de fusión 1

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.217542	99.72%	99.55%	1.03929	98.78%

**Tabla 17** Coeficientes de regresión estimados para R6-Calor de fusión 2 (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	58.31	1.31	*	*	2.10
x2-Virgen	82.84	1.01	*	*	2.12
x3-Compatibilizante	7.30	10.6	*	*	2.54

**Tabla 18** Resumen del modelo para R6-Calor de fusión 2

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
1.23948	97.38%	96.50%	14.9191	95.75%

**Tabla 19** Coeficientes de regresión estimados para R7-Calor de cristalización (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	92.48	1.61	*	*	2.10
x2-Virgen	93.80	1.24	*	*	2.12
x3-Compatibilizante	4.80	13	*	*	2.54

**Tabla 20** Resumen del modelo R7-Calor de cristalización

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
1.52308	87.76%	83.69%	22.7392	80.01%

**Tabla 21** Coeficientes de regresión estimados para R8-Porcentaje de polietileno (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	0.14547	0.00610	*	*	19.11
x2-Virgen	0.00638	0.00278	*	*	6.69
x3-Compatibilizante	-0.01970	0.02880	*	*	7.86
x1-Reciclado*x2-Virgen	-0.05240	0.01760	-2.98	0.041	23.91
x1-Reciclado*x3-Compatibilizante	0.27130	0.06450	4.21	0.014	8.68

**Tabla 22** Resumen del modelo para R8- Porcentaje de polietileno

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.0019180	99.85%	99.70%	0.0001757	98.19%

**Tabla 23** Coeficientes de regresión estimados para R9-Temperatura de descomposición pico (proporciones del componente)

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
x1-Reciclado	460.96	0.717	*	*	2.10
x2-Virgen	455.53	0.555	*	*	2.12
x3-Compatibilizante	445.95	5.800	*	*	2.54

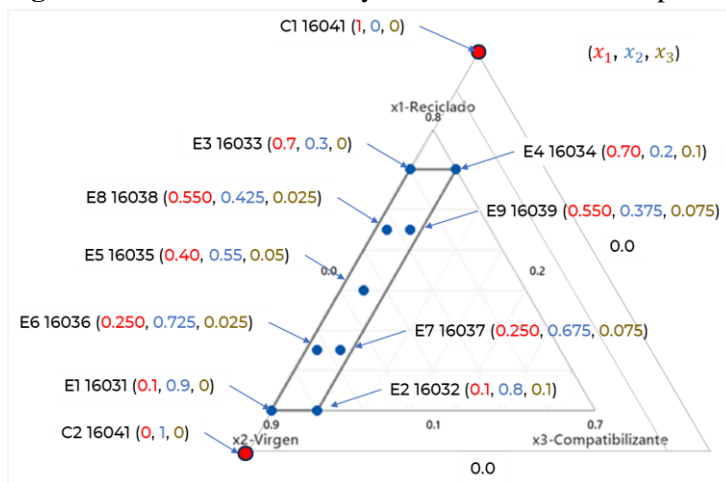
**Tabla 24** Resumen del modelo R9-Temperatura de descomposición pico

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	PRESS	R-cuadrado (pred)
0.680293	83.85%	78.46%	7.69567	55.24%

**Tabla 25** Estimaciones de las respuestas con 10% PP reciclado y 30% PP reciclado.

Reciclado	Virgen	Compatibilizante	R1 (g/10min)	R2 (MPa)	R3 (MPa)	R4 (kJ/m <sup>2</sup> )	R5 (J/g)	R6 (J/g)	R5+R6 (J/g)
10%	90%	0%	29.1	1231	24.9	6.0	3.3	80.4	83.7
10%	85%	5%	29.9	1069	23.6	6.9	3.1	76.6	79.7
10%	80%	10%	30.6	907	22.4	7.7	2.9	72.8	75.7
30%	70%	0%	20.5	1160	24.6	5.7	8.1	75.5	83.6
30%	65%	5%	21.0	1003	23.4	6.5	7.7	71.7	79.4
30%	60%	10%	21.6	845	22.1	7.3	7.3	67.9	75.2

**Figura 1** Elementos del DOE y elementos de control representado en Diseño simplex





**Figura 2** Pellets de las corridas del DOE y de los elementos de control

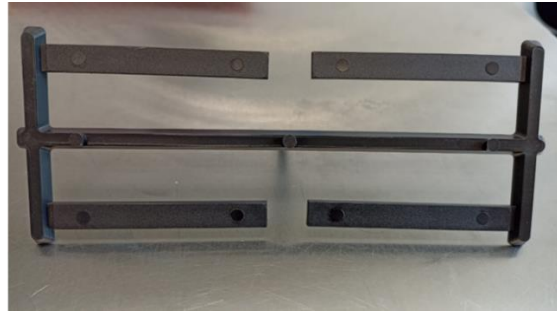


**Figura 3** Pellets de los elementos del DOE y elementos de control

a) Probeta A para pruebas de tensión

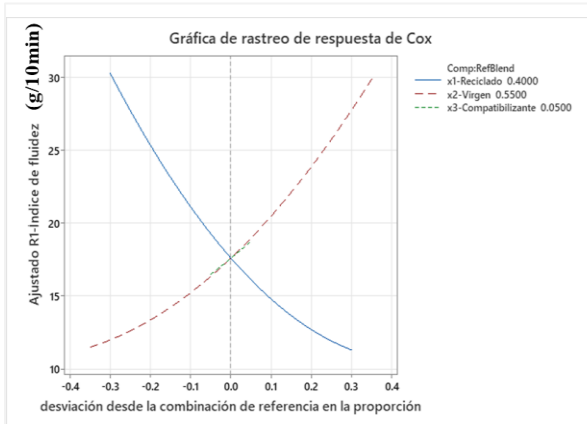


b) Probeta B para impacto Charpy ranurado

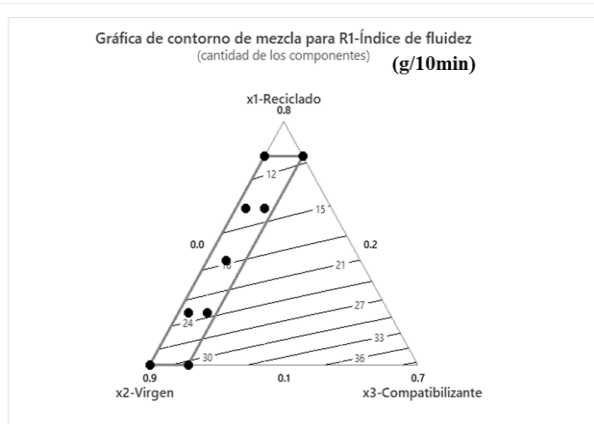


**Figura 4** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Índice de fluidez

a)

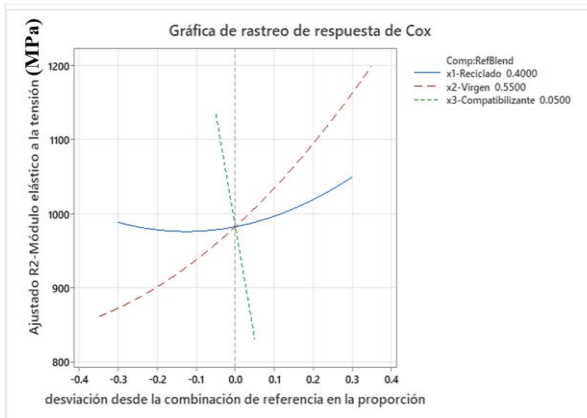


b)

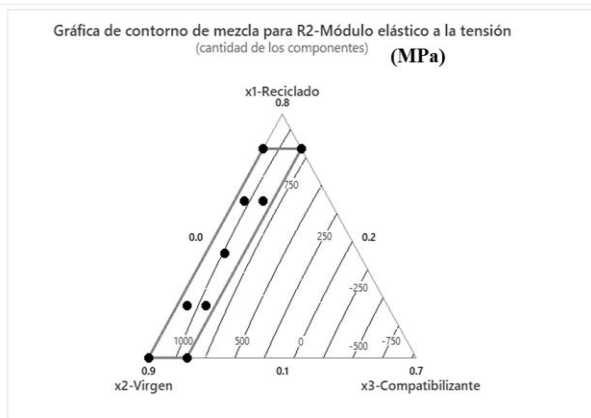


**Figura 5** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Módulo elástico a la tensión uniaxial

a)

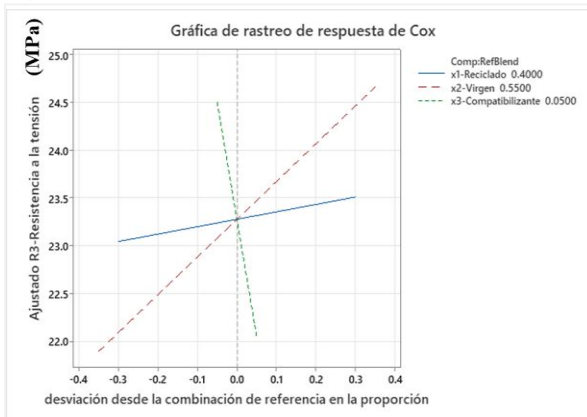


b)

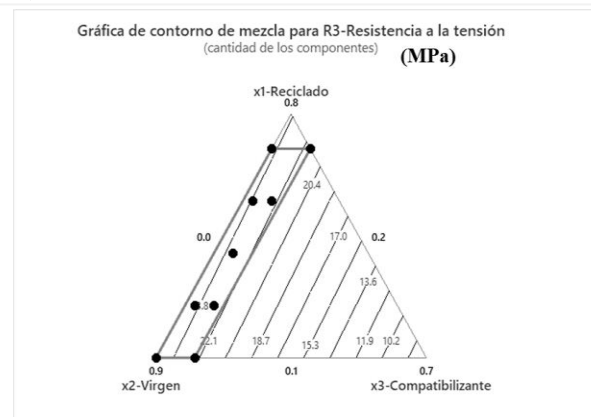


**Figura 6** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia

a)

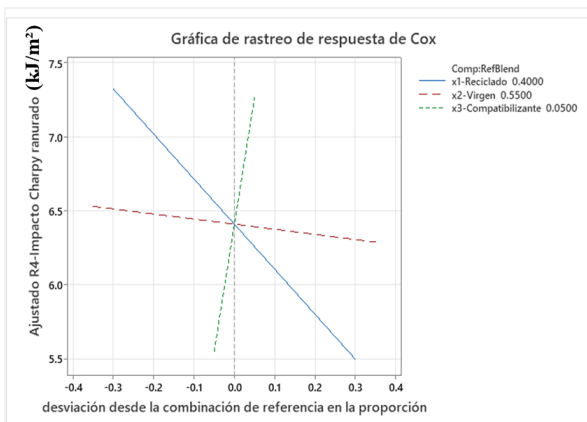


b)

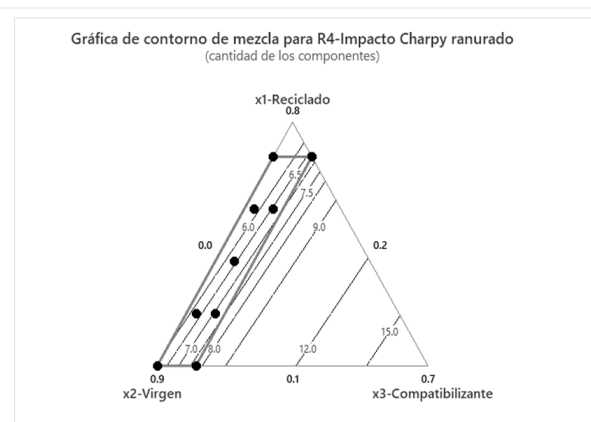


**Figura 7** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Impacto Charpy

a)

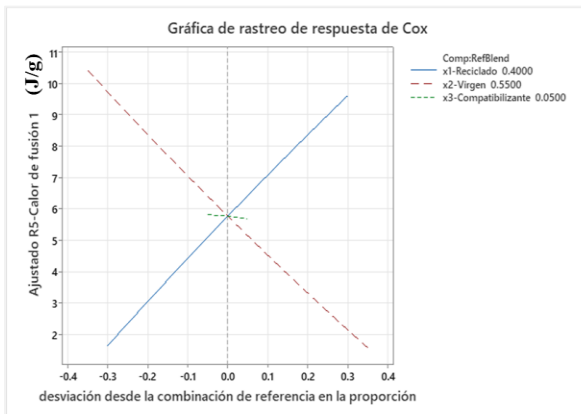


b)

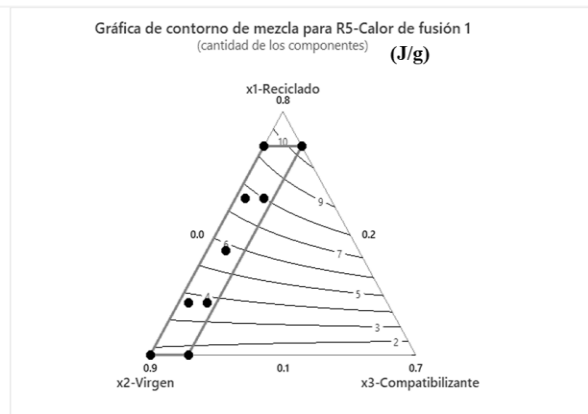


**Figura 8** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Calor de fusión 1

a)

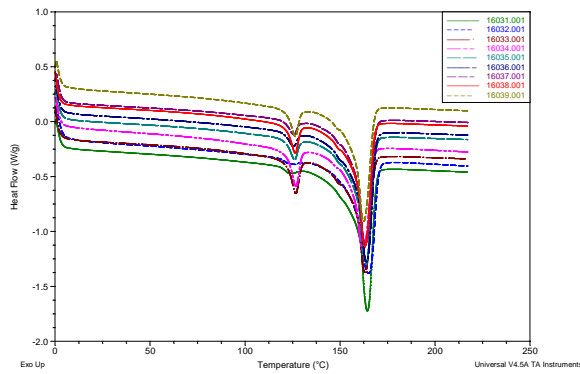


b)

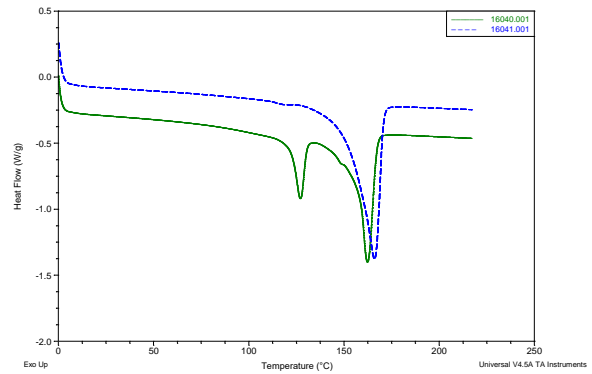


**Figura 9** Termogramas por DSC de calores de fusión a) elementos DOE, b) elementos de control

a)

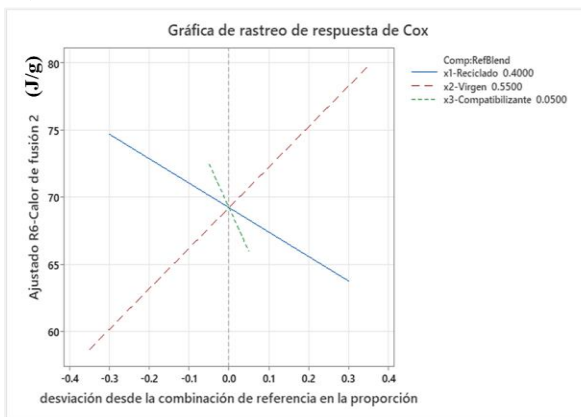


b)

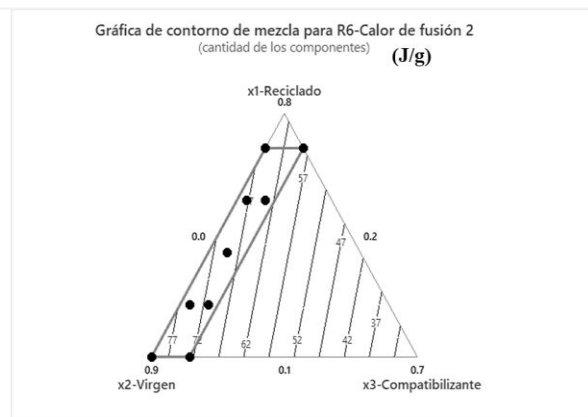


**Figura 10** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Calor de fusión 2

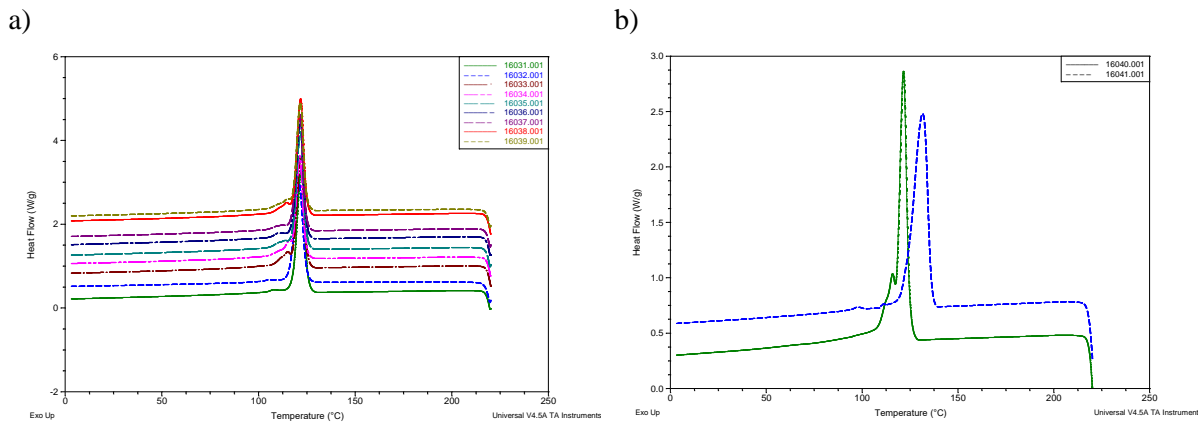
a)



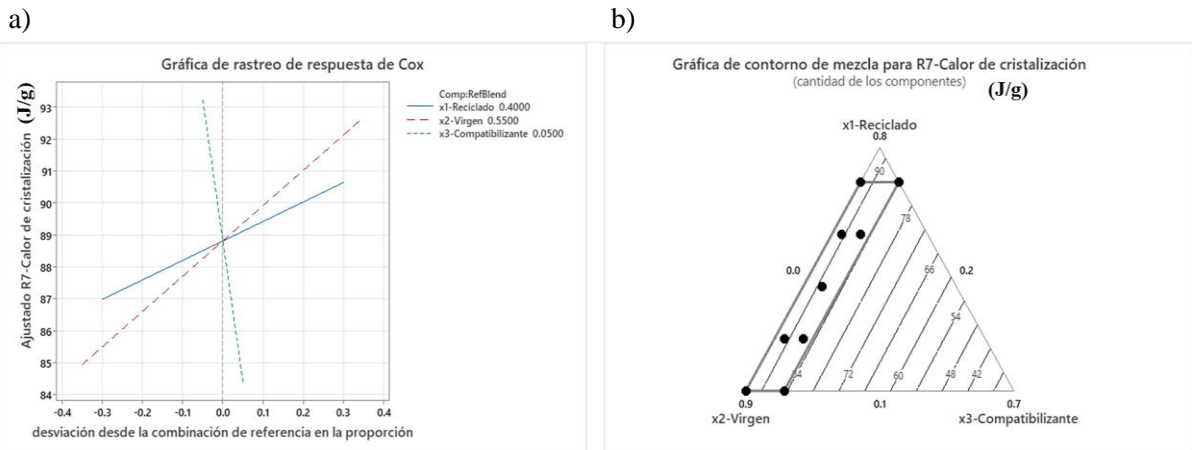
b)



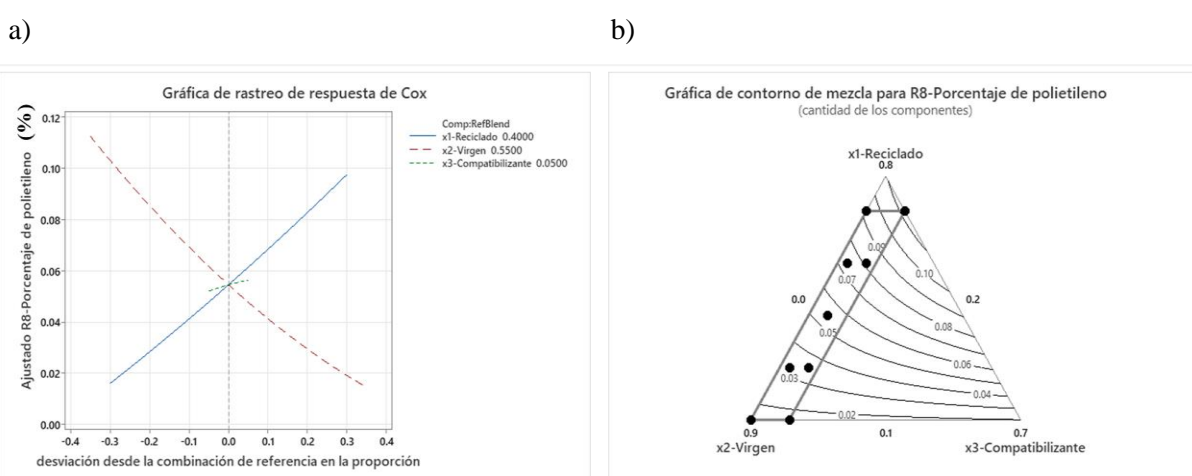
**Figura 11** Termogramas por DSC de calores de cristalización a) elementos DOE, b) elementos de control



**Figura 12** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Calor de cristalización

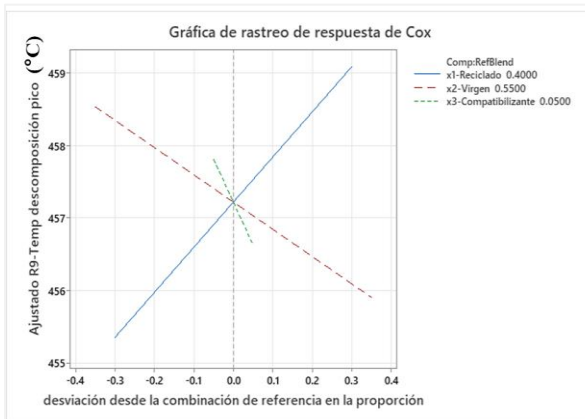


**Figura 13** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Porcentaje de polietileno

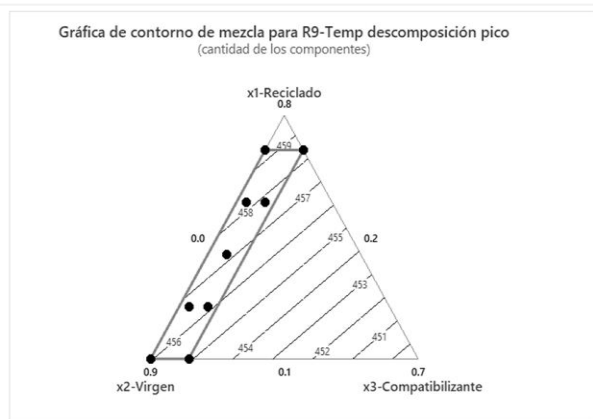


**Figura 14** a) Gráfica de trazas y b) Gráfica de contornos para Temperatura descomposición pico

a)

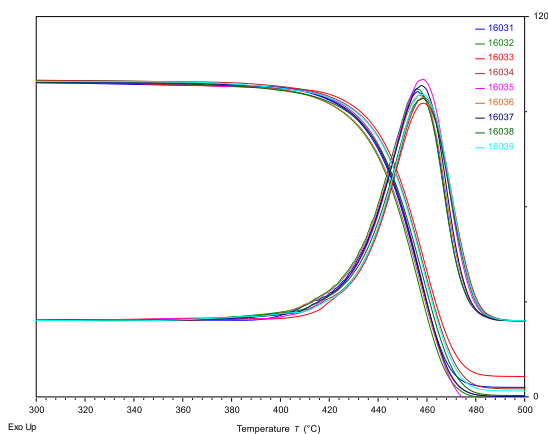


b)

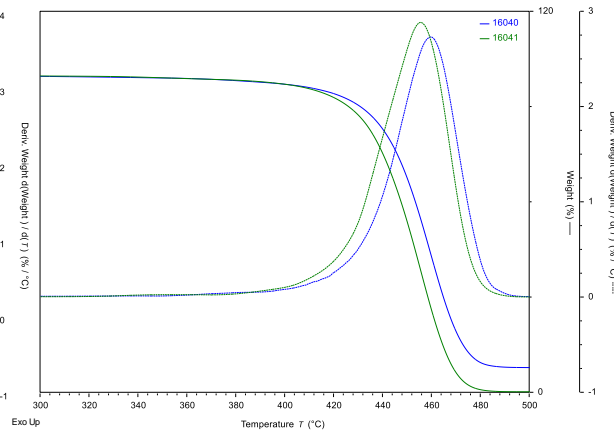


**Figura 15** Termogramas por TGA de temperatura de descomposición pico a) elementos DOE, b) elementos de control

a)



b)



## CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo proporcionan un marco de referencia del uso de PP reciclados provenientes del sector de empaque y embalaje y su aplicación en el sector automotriz. También proporciona una comprensión de cómo los componentes individuales de la mezcla actúan en conjunto entre sí para su uso en aplicaciones futuras dentro del sector automotriz como lo es el map pocket del interior de la puerta.

El ajuste de los modelos canónicos a los datos experimentales encontrados en los diseños de mezclas de vértices extremos es robusto y arriba de 96% para índice de fluidez (MFI), módulo elástico a la tensión uniaxial, resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia, calores de fusión ( $\Delta H_{m1}$  y  $\Delta H_{m2}$ ) y

porcentaje de polietileno (PE%); ajuste arriba de 83% para calor de cristalización ( $\Delta H_c$ ) y temperatura de descomposición pico ( $T_{dp}$ ) y con ajuste del 67% para Impacto Charpy ranurado.

La predicción de los modelos canónicos encontrados es robusta y arriba de 91% para índice de fluidez (MFI), módulo elástico a la tensión uniaxial, resistencia a la tensión uniaxial a la cedencia, calores de fusión ( $\Delta H_{m1}$  y  $\Delta H_{m2}$ ) y porcentaje de polietileno (PE%); predicción del 80% para calor de cristalización ( $\Delta H_c$ ), predicción del 55% para la temperatura de descomposición pico ( $T_{dp}$ ) y finalmente una predicción del 5.6% para el impacto Charpy ranurado. Así, trabajo futuro será el incrementar el número de replicas experimentales para mejorar el ajuste y la predicción de los modelos canónicos en los variables de respuesta  $T_{dp}$  e impacto Charpy ranurado.

En las mezclas estudiadas de PP reciclado-PP virgen demuestra el efecto de adicionar un agente compatibilizante de bajo peso molecular que influye como un plastificante disminuyendo la viscosidad de la mezcla y por lo tanto el MFI contrarrestando el efecto que tiene la fracción polietileno reciclado presente cuya degradación térmica favorece la reticulación de las cadenas poliméricas (aumento de la viscosidad). Así mismo, el compatibilizante tiene una influencia en las propiedades termodinámicas y mecánicas en la mezcla favoreciendo las interacciones fisicoquímicas entre las fracciones polietileno /propileno mejorando la adhesión de dichas fracciones visto a través del incremento en la resistencia del impacto Charpy ranurado y del efecto mostrado en la disminución de la cristalinidad que se aprecia en las respuestas de los calores de fusión de la mezcla.

Los resultados mecánicos y reológicos de las mezclas obtenidas con el 10% de PP reciclado son similares a los requerimientos mínimos actuales para resinas PP virgen en la fabricación de maderas de puertas, sin embargo, dichas mezclas no cumplen con la tendencia actual de sustentabilidad de vehículos que es utilizar resinas que tengan en su composición al menos 30% de resina reciclada. Las mezclas obtenidas con el 30% PP reciclado pueden ser usadas en la fabricación de moldes nuevos de madera de puerta considerando que tiene un menor índice de fluidez y esto puede afectar al llenado del componente, lo cual puede requerir un incremento de espesor y reducciones de altura de las proyecciones.



## **Agradecimientos**

Agradezco al CONAHCYT por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto, a General Motors de México por su apoyo en la realización del posgrado, al Ing. Reynaldo Godinez Uribe y al Mtro. Luis Manuel Hurtado Orozco por su aprobación en la realización del posgrado, a Rocío Vázquez de ExxonMobil de México por la donación de resinas vírgenes, a la Dra. María Dolores Baeza Alvarado por la caracterización físico-química de muestras, a Norma Montalvo González y al Ing. Jose Miguel Arriaga Merced a la caracterización del impacto Charpy ranurado.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Alsabri, A., Tahir, F., & Al-Ghamdi, S. (2022). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. *Materials Today: Proceedings*, 56, Part 4., 2245-2251. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>.
- Aurrekoetxea, J., Sarrionandia, M. A., Urrutibeascoa, I., & MasPOCH, M. L. (2001). Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. *Journal of Materials Science*, 36(11), 2607-2613. doi:10.1023/A:1017983907260
- Behalek, L., Seidl, M., & Habr, J. (2016). Possibility to detect degraded recycled material in the moulded parts from PP. *MM Science Journal*, 989-993.
- Chen , H., Chen , B., Li , J., Yan , H., Zeng , Y., & Chen , J. (2023). Optimization of Vat-Polymerization binder formulation for 3D printing ceramic slurry using D-optimal mixture experimental design. *Composites Part B: Engineering*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110777>
- Ehrenstein, G., Riedel, G., & Trawiel, P. (2004). *Thermal analysis of plastics : theory and practice*. Ohio, USA: Munich: Hanser.
- Galve, J. E., Elduque, D., Pina, C., & Javierre, C. (2022). Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene: A Comparison with Alternative Virgin Materials. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9(3), 919-932. doi:10.1007/s40684-021-00363-2
- Granta MI. (2023). Granta MI- Material Intelligence 2023 R1. Obtenido de <https://www.ansys.com/products/materials/granta-mi>





Gutiérrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). ANÁLISIS Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS. México, D.F.: MCGRAW-HILL.

Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. Discover Nano, 19(1), 2. doi:10.1186/s11671-023-03952-z

Ji, H., & Jung, H. (2023). Effect of the multiple injection process on the structural and mechanical properties of PP impact copolymers focusing on the deformation of ethylene-propylene copolymer. Polymer Testing, 124,. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108051>

Loultcheva, M., Proietto, M., Jilov, N., & La Mantia, F. (1997). Recycling of high density polyethylene containers. Polymer Degradation and Stability, 77-81. doi:[https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(96\)00230-3](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(96)00230-3)

Minitab. (2024). Soporte Minitab. Obtenido de Tabla Coeficientes para Analizar diseño de mezcla: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/how-to/mixtures/analyze-mixture-design/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/coefficients-table/>

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management, 69, 24-58. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Raju, F. (2016). Recycling of Polymers : Methods, Characterization and Applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/9783527689002>

Saikrishnan, S., Jubinville, D., Tzoganakis, C., & Mekonnen, T. (2020). Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling. Polymer Degradation and Stability, 182. doi <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390>.

