

Evaluación mecánica y estructural de mezclas PP/POE para aplicaciones automotrices tipo dust boot

A.R. Trinidad Martinez¹, C.A Poblano Salas²

¹Posgrados CIATEQ A.C., Av. del Retablo 150, Col. Constituyentes FOVISSSTE, Querétaro, Gro., 76150, México.

²CIATEQ A.C., Av. Del Retablo 150, Col. Constituyentes FOVISSSTE, Querétaro, Gro., 76150, México.

Resumen - En este trabajo se evaluó el desempeño mecánico y estructural de mezclas de elastómero de poliolefina (POE) y polipropileno (PP) como posible alternativa a materiales termoplásticos vulcanizados (TPV) utilizados en la fabricación de componentes automotrices tipo *dust boot* (cubiertas para sistemas de amortiguación). Se analizaron formulaciones POE/PP 50/50 y 70/30 mediante ensayos de tracción (ASTM D638) para obtener curvas esfuerzo-deformación y determinar parámetros hiperelásticos Neo-Hookeanos por mínimos cuadrados. Dichos parámetros se implementaron en simulaciones por elementos finitos de un componente *dust boot* (gaiter o cubierta) bajo condiciones de rebound (extensión). Experimentalmente, el TPV de referencia presentó un esfuerzo máximo de 14.87 ± 2.04 MPa, mientras que las formulaciones 70/30 y 50/50 presentaron 10.21 ± 0.37 MPa y 15.40 ± 0.40 MPa, respectivamente. Los resultados de simulación mostraron que la formulación 70/30 presentó una distribución de esfuerzos más próxima a la obtenida con el TPV de referencia, mientras que la formulación 50/50 presentó mayores concentraciones locales de esfuerzo. En conjunto, los resultados muestran que la respuesta estructural del *dust boot* depende de la interacción entre las propiedades mecánicas del material y la geometría del componente.

Índice de Términos - PP/POE, Neo-Hookeano, elementos finitos, *dust boot*, elastómeros termoplásticos.

I. INTRODUCCIÓN

Los componentes tipo *dust boot* (cubiertas de amortiguadores) utilizados en sistemas automotrices están sometidos continuamente a ciclos severos de compresión y extensión, por lo que requieren materiales capaces de soportar grandes deformaciones sin perder estabilidad geométrica ni capacidad de recuperación elástica. Debido a ello, el comportamiento mecánico de este tipo de componentes puede describirse mediante modelos hiperelásticos, los cuales permiten relacionar la deformación con la respuesta mecánica del material bajo

condiciones altamente no lineales (Holzapfel, 2021; Hossain & Steinmann, 2022).

Actualmente, los elastómeros termoplásticos vulcanizados (TPV) son utilizados en este tipo de aplicaciones debido a su comportamiento mecánico y funcional bajo condiciones dinámicas de operación. Asimismo, existe interés en mezclas basadas en polipropileno y elastómeros olefinicos debido a sus propiedades mecánicas y características de procesamiento y manufactura (Bhattacharya et al., 2020; Gahleitner et al., 2022). En estos sistemas multifásicos, la interacción entre la fase rígida proporcionada por el PP y la fase elastomérica aportada por el POE influye sobre la rigidez, capacidad de deformación y respuesta mecánica del material. Sin embargo, la evaluación de una formulación destinada a un componente deformable no debe limitarse únicamente a sus propiedades obtenidas mediante ensayos uniaxiales, debido a que la geometría y las condiciones de carga del componente pueden modificar la distribución local de esfuerzos y deformaciones (Ehrenstein & Riedel, 2021; Zhang et al., 2024).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño mecánico y estructural de las formulaciones POE/PP 50/50 y 70/30 en comparación con un TPV de referencia utilizado en aplicaciones tipo *dust boot*, mediante caracterización experimental y simulación por elementos finitos aplicada a una geometría representativa del componente. La caracterización experimental permitió establecer las diferencias en rigidez, resistencia y capacidad de deformación de los materiales, mientras que a través de la simulación fue posible analizar la influencia de dichas propiedades sobre la respuesta estructural del componente bajo condiciones de grandes deformaciones. Con base en lo anterior, se planteó como hipótesis que la proporción POE/PP influye tanto en la respuesta mecánica del material como en el comportamiento estructural del *dust boot*. En particular, se espera que las diferencias en rigidez y capacidad de deformación de las formulaciones 50/50 y 70/30 produzcan diferentes distribuciones de esfuerzo al implementarse en la geometría del componente. La comparación experimental y numérica con el TPV de referencia

permite determinar el grado de correspondencia de cada formulación con el comportamiento del material utilizado como referencia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

Los materiales empleados en este trabajo fueron el elastómero de poliolefina (POE) VERSIFY 3401y el polipropileno ESENTTIA 40H92N (PP). Se prepararon dos formulaciones POE/PP: 50/50, constituida por 50 % de VERSIFY 3401 y 50 % de ESENTTIA 40H92N, y 70/30, constituida por 70 % de VERSIFY 3401 y 30 % de ESENTTIA 40H92N. Como material de referencia se utilizó Elastoprene, el cual es un elastómero termoplástico vulcanizado (TPV) empleado comúnmente en aplicaciones automotrices.

Para mantener la consistencia de las materias primas durante el estudio, todas las muestras se prepararon utilizando material proveniente de un único lote para cada materia prima. Se empleó el mismo lote de VERSIFY 3401, el mismo lote de ESENTTIA 40H92N y el mismo lote de Elastoprene durante la preparación de las probetas evaluadas. Por lo tanto, la variabilidad entre diferentes lotes de materia prima no fue evaluada en el presente estudio.

Las mezclas se prepararon mediante extrusión de doble husillo corrotante, empleando temperaturas de procesamiento comprendidas entre 160 y 185 °C y una velocidad de tornillos de 60 rpm (Figura 1). Durante el procesamiento se realizó la plastificación del material y la dispersión de la fase elastomérica. Posteriormente, el material extruido fue enfriado en un baño de agua, pelletizado y acondicionado a temperatura ambiente antes de su procesamiento mediante moldeo por inyección. Este procedimiento permitió obtener pellets con composición homogénea como insumo para la etapa posterior de moldeo por inyección, de tal forma que fue posible mantener condiciones de procesamiento consistentes entre las formulaciones evaluadas.



Fig. 1 Extrusora de doble husillo corrotante marca Collin usada para mezclar el material. (Elaboración Propia, 2026.)

B. Moldeo por inyección de probetas

Las probetas de ensayo se fabricaron mediante moldeo por

inyección conforme a la geometría Tipo I establecida en la norma ASTM D638, [para cada material fueron fabricadas 5 probetas](#). El proceso se realizó utilizando una presión de inyección de 480 bar, una presión de post-presión de 225 bar, un tiempo de post-presión de 0.701 s y un tiempo de enfriamiento de 45 s. Las probetas obtenidas fueron posteriormente utilizadas para la caracterización mecánica mediante ensayos de tracción uniaxial. Las probetas presentaron estabilidad dimensional y ausencia de defectos visibles significativos, condición importante para la caracterización mecánica del material (Callister & Rethwisch, 2021; Baird & Collias, 2022).

La Figura 2 muestra las características de las probetas obtenidas mediante moldeo por inyección para la realización de los ensayos de tensión. Las dimensiones establecidas por la norma ASTM D638 permiten mantener uniformidad dimensional y repetibilidad experimental durante la caracterización mecánica.

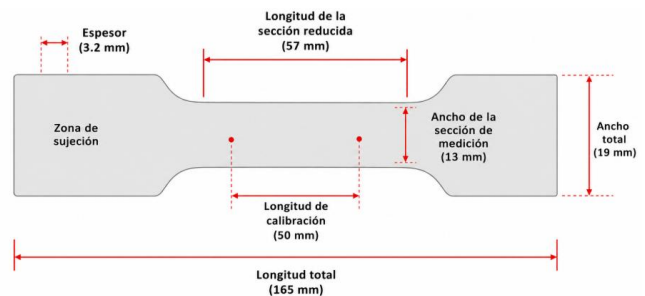


Fig. 2 Geometría de probeta Tipo I utilizada conforme a la norma ASTM D638. (Elaboración Propia, 2026.)

C. Ensayos mecánicos de tracción

La caracterización mecánica de las mezclas se realizó mediante pruebas de tracción uniaxial a una velocidad de 50 mm/min y a una temperatura de 23 ± 2 °C, empleando 5 probetas Tipo I fabricadas conforme a la norma ASTM D638 para cada material estudiado. A partir de los datos de fuerza y desplazamiento registrados durante las pruebas se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación de cada formulación, las cuales permitieron describir y comparar el comportamiento mecánico de los materiales. Posteriormente, dichas curvas fueron utilizadas para la calibración del modelo constitutivo Neo-Hookeano empleado en las simulaciones numéricas (Callister & Rethwisch, 2021; Osswald & Hernández-Ortiz, 2018). Durante los ensayos, el sistema de adquisición y el software asociado al equipo de tracción registraron y procesaron los datos experimentales de cada probeta. A partir de estos registros, el software proporcionó las curvas esfuerzo-deformación y los parámetros mecánicos empleados en este estudio: módulo de tracción (E_0), esfuerzo máximo (σ_m) y deformación a la rotura (ϵ_p).

Los valores de esfuerzo y deformación ingenieril empleados en este estudio fueron obtenidos directamente mediante el software asociado al equipo de ensayo. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el software procesa los datos

registrados durante el ensayo para determinar las magnitudes de la curva esfuerzo–deformación y las propiedades mecánicas correspondientes. En particular, el esfuerzo ingenieril (σ) se determina a partir de la fuerza aplicada (F) y el área transversal inicial de la probeta (A_0), de acuerdo con la Ecuación (1) (Instron, 2026)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

De manera similar, la deformación ingenieril (ε) fue obtenida directamente mediante el software del equipo a partir del cambio de longitud registrado durante el ensayo respecto a la longitud inicial de referencia (L_0), como se expresa en la Ecuación (2). Por lo tanto, las Ecuaciones (1) y (2) representan las relaciones utilizadas por el sistema para el procesamiento de los datos experimentales y no cálculos realizados manualmente en este estudio

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

A partir de las curvas esfuerzo–deformación obtenidas durante los ensayos, se consideraron tres propiedades mecánicas reportadas por el software del equipo: el módulo elástico en tracción (E_t), el esfuerzo máximo (σ_m) y la deformación a la ruptura (ε_p). El módulo de tracción representa la rigidez del material en la región elástica de la curva esfuerzo–deformación y es calculado a partir de la pendiente obtenida en dicha zona; el esfuerzo máximo corresponde al mayor valor de esfuerzo registrado durante el ensayo, mientras que la deformación a la ruptura corresponde a la deformación registrada en el momento de la ruptura de la probeta y se obtiene comparando la longitud final con la inicial en cada probeta.

Para el análisis de los resultados se utilizaron los cinco valores individuales ($n = 5$) obtenidos para cada propiedad mecánica y cada material. A partir de estos valores se calcularon la media aritmética, la desviación estándar muestral y el coeficiente de variación, con el propósito de representar el valor promedio y la dispersión de los resultados experimentales.

La media aritmética ($\bar{x}$) de cada propiedad mecánica se calculó mediante:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

donde x_i representa el valor individual obtenido para cada probeta y n el número total de probetas ensayadas ($n = 5$).

La dispersión de los resultados respecto a la media se determinó mediante la desviación estándar muestral (s):

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (4)$$

Finalmente, el coeficiente de variación (CV) se calculó para expresar la variabilidad de los resultados en relación con su valor promedio:

$$cv = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (5)$$

Los resultados descriptivos se expresaron como media y desviación estándar, mientras que el coeficiente de variación (CV) se expresó como porcentaje. La Tabla 1 presenta los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas evaluadas a partir de las cinco probetas ensayadas para cada material.

Tabla I. Valores promedio y desviación estándar de las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción ($n = 5$).

Material	E_t (MPa)	σ_m (MPa)	ε_p (%)
POE/PP 50/50	519.29 $\pm$ 23.80	15.40 $\pm$ 0.40	432.00 $\pm$ 44.00
POE/PP 70/30	273.31 $\pm$ 12.59	10.21 $\pm$ 0.37	363.96 $\pm$ 42.91
Elastoprene	329.21 $\pm$ 16.80	14.87 $\pm$ 2.04	476.21 $\pm$ 32.40

A partir de los resultados obtenidos se realizó la comparación estadística de las propiedades mecánicas entre POE/PP 50/50, POE/PP 70/30 y Elastoprene. Previamente al análisis comparativo, se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro–Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Levene. Posteriormente, las diferencias entre los tres materiales se analizaron mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA). Cuando se identificaron diferencias estadísticamente significativas, se realizaron comparaciones múltiples mediante la prueba post hoc de Tukey HSD para determinar entre qué pares de materiales se presentaban dichas diferencias. Para todos los análisis estadísticos se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$

El tratamiento estadístico descrito permitió establecer la variabilidad de las propiedades mecánicas y determinar la existencia de diferencias significativas entre los materiales. De manera complementaria, la representación mediante curvas esfuerzo–deformación permite describir el comportamiento mecánico asociado a dichas propiedades. En este contexto, la Figura 3 muestra de manera general el comportamiento esfuerzo–deformación característico de diferentes tipos de materiales poliméricos sometidos a carga de tensión (Osswald & Hernández-Ortiz, 2018). Estas curvas permiten identificar parámetros como la rigidez, el esfuerzo máximo y la deformación a la rotura, así como observar las diferencias generales en la respuesta mecánica de distintos tipos de polímeros.

D. Determinación del modelo hiperelástico

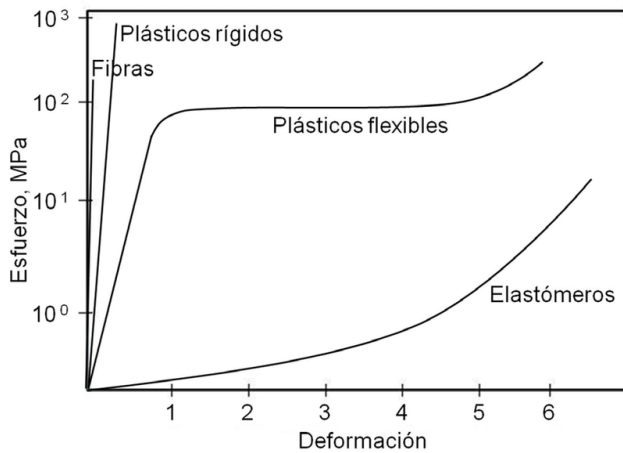


Fig. 3 Comportamiento general esfuerzo–deformación de distintos materiales poliméricos. (Elaboración Propia, 2026.)

Una vez establecidas las propiedades mecánicas y el comportamiento esfuerzo–deformación de los materiales, fue necesario definir un modelo constitutivo que permitiera representar matemáticamente su respuesta en las simulaciones numéricas. Debido a que los materiales elastoméricos pueden experimentar grandes deformaciones y presentar una respuesta mecánica no lineal, se seleccionó un modelo hiperelástico para su representación.

Dentro de los modelos hiperelásticos disponibles, se empleó el modelo Neo-Hookeano debido a que describe el comportamiento del material mediante una formulación relativamente simple y un número reducido de parámetros constitutivos. Esto permite caracterizar la respuesta del material a partir de los datos experimentales de tracción e incorporar posteriormente los parámetros obtenidos en el modelo de elementos finitos. Por estas características, el modelo Neo-Hookeano proporciona una aproximación adecuada para representar el comportamiento hiperelástico considerado en el alcance de este estudio (Holzapfel, 2021; Dassault Systèmes, 2022).

Para un material Neo-Hookeano compresible, la función de energía de deformación se expresa mediante:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (6)$$

donde W representa la energía de deformación del material, C_{10} corresponde al parámetro asociado a la rigidez hiperelástica, I_1 es el primer invariante de la deformación, D_1 representa el parámetro relacionado con la compresibilidad efectiva y J corresponde al cambio volumétrico del material durante la deformación.

Para relacionar el modelo Neo-Hookeano con los datos obtenidos mediante los ensayos de tracción uniaxial, la deformación experimental se expresó en términos de la razón de estiramiento λ . Esta variable representa la relación entre la longitud deformada y la longitud inicial de la probeta y, a partir

de la deformación ingenieril ε , se define como:

donde λ representa la relación de estiramiento y ε la deformación ingenieril del material.

A partir de la función de energía de deformación del modelo Neo-Hookeano y considerando una condición de carga uniaxial para un material prácticamente incompresible, la respuesta en tensión puede expresarse en función de λ . Esta relación permite vincular el comportamiento experimental obtenido durante el ensayo de tracción con el parámetro constitutivo C_{10} del modelo.

$$\sigma = 2C_{10}(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (8)$$

donde σ representa el esfuerzo nominal, C_{10} el parámetro constitutivo asociado con la respuesta desviadora del material y λ la razón de estiramiento.

Con el propósito de determinar el parámetro C_{10} a partir de los datos experimentales, la ecuación constitutiva se reorganizó en una forma lineal. Para ello, se definió la variable auxiliar X como

$$X = \lambda - \lambda^{-2} \quad (9)$$

Al sustituir esta variable en la ecuación constitutiva del modelo Neo-Hookeano, la relación entre el esfuerzo nominal y X puede expresarse como:

$$\sigma_i = 2C_{10}X \quad (10)$$

De esta forma, C_{10} puede obtenerse a partir del ajuste lineal de los datos experimentales de esfuerzo–deformación. Considerando que el modelo establece una relación que pasa por el origen, el parámetro se determinó mediante un ajuste por mínimos cuadrados utilizando todos los puntos experimentales considerados:

$$C_{10} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum(\sigma_i \cdot X_i)}{\sum(X_i^2)} \right] \quad (11)$$

donde σ_i corresponde al esfuerzo nominal experimental de cada punto, X_i es el valor de la variable auxiliar calculado a partir de la razón de estiramiento correspondiente e i identifica cada punto experimental utilizado en el ajuste.

El valor obtenido de C_{10} representa, por tanto, el parámetro que proporciona el mejor ajuste del modelo Neo-Hookeano a los datos experimentales considerados bajo el criterio de mínimos cuadrados.

Una vez determinado C_{10} mediante el ajuste de los datos experimentales, se obtuvo el módulo cortante inicial μ del modelo Neo-Hookeano mediante la relación:

Para representar el comportamiento cuasi-incompresible del material, se adoptó un coeficiente de Poisson de $\nu = 0.49$, valor consistente con los reportados experimentalmente para materiales TPV (Persson et al., 2022). A partir de este valor y del módulo cortante μ , el módulo de Young E asociado al modelo se determinó mediante:

$$E = 2\mu(1 + \nu) \quad (13)$$

A partir del módulo de Young E y del coeficiente de Poisson ν , se determinó el módulo volumétrico K , el cual representa la resistencia del material al cambio de volumen:

$$K = \frac{E}{[3(1 - 2\nu)]} \quad (14)$$

Finalmente, el módulo volumétrico K se utilizó para determinar el parámetro de compresibilidad D_1 requerido por el modelo Neo-Hookeano:

$$D_1 = \frac{2}{K} \quad (15)$$

donde D_1 representa el parámetro de compresibilidad del modelo Neo-Hookeano, K el módulo volumétrico, E el módulo de Young, μ el módulo cortante inicial y ν el coeficiente de Poisson considerado.

A partir de este procedimiento se determinaron los parámetros hiperelásticos C_{10} y D_1 para cada uno de los materiales evaluados. Estos parámetros se utilizaron posteriormente para definir el comportamiento constitutivo de los materiales en el modelo de elementos finitos. En particular, C_{10} se obtuvo a partir del ajuste de las curvas experimentales esfuerzo-deformación, mientras que D_1 se determinó considerando la condición de cuasi-incompresibilidad previamente establecida. De esta manera, los resultados de la caracterización experimental se utilizaron como base para la definición del material en el modelo numérico.

El empleo de formulaciones hiperelásticas en el análisis mediante elementos finitos ha sido estudiado previamente para materiales sometidos a grandes deformaciones y comportamiento no lineal. Pascon y Coda (2019) emplearon el modelo Neo-Hookeano para representar la respuesta de materiales hiperelásticos bajo diferentes condiciones de deformación. Por su parte, Gajewski y Miecznikowski (2021) utilizaron modelos hiperelásticos en Abaqus para relacionar la respuesta experimental y numérica de componentes elastoméricos.

En materiales elastoméricos termoplásticos, Saduk et al. (2025)

$$\mu = 2C_{10} \quad (12)$$

evaluaron formulaciones hiperelásticas para representar su comportamiento bajo grandes deformaciones, incluyendo el modelo Neo-Hookeano. Asimismo, Baghani et al. (2014) estudiaron la aplicación de modelos constitutivos en polímeros sometidos a deformaciones finitas mediante simulaciones numéricas. Estos antecedentes muestran la aplicación de formulaciones hiperelásticas para representar el comportamiento no lineal de materiales poliméricos y proporcionan el fundamento para su implementación posterior en el modelo de elementos finitos desarrollado en este trabajo.

E. Simulación por elementos finitos

Una vez determinados los parámetros hiperelásticos C_{10} y D_1 , estos se incorporaron en Abaqus para definir el comportamiento constitutivo de cada material. La simulación se desarrolló mediante un modelo axisimétrico del *dust boot*, incluyendo los pliegues y las regiones de contacto involucradas durante su deformación. Se analizaron las condiciones de compresión y extensión con el propósito de evaluar la respuesta mecánica y la deformación del componente.

Debido a los grandes cambios geométricos que experimenta el *dust boot* durante su funcionamiento, se realizó un análisis no lineal mediante el procedimiento *Static General*, con la no linealidad geométrica activada (NLGEOM = ON). Asimismo, se consideraron las interacciones de contacto entre las superficies involucradas durante la deformación. Estas condiciones permiten considerar conjuntamente la respuesta hiperelástica del material, los cambios geométricos y el contacto desarrollado durante el movimiento del componente (Dassault Systèmes, 2022).

Para realizar una comparación bajo las mismas condiciones de análisis, se mantuvieron constantes la geometría, la discretización, las condiciones de frontera, las interacciones de contacto y los desplazamientos aplicados. La única diferencia entre los casos simulados fue la definición constitutiva del material, establecida mediante los parámetros hiperelásticos correspondientes a POE/PP 50/50, POE/PP 70/30 y Elastoprene.

La discretización se realizó mediante elementos axisimétricos triangulares CAX6M y una técnica de mallado libre. Se estableció un tamaño global aproximado de 0.2, una desviación máxima por curvatura de 0.1 y un tamaño mínimo equivalente al 10 % del tamaño global. Adicionalmente, se aplicó un refinamiento local en las regiones de los pliegues, donde se presentan mayores cambios de curvatura durante la deformación. La malla final estuvo constituida por 15,264 elementos CAX6M.

Las principales características del modelo y de su discretización se resumen en la Tabla II.

Tabla II . Configuración general y discretización del modelo por elementos finitos.

Parámetro	Configuración
Software	Abaqus

Representación	Axisimétrica
Procedimiento	Static, General
No linealidad geométrica	NLGEOM = ON
Modelo constitutivo	Neo-Hookeano
Elemento	CAX6M
Tipo de malla	Libre, triangular
Tamaño global	≈ 0.2
Desviación por curvatura	0.1
Tamaño mínimo	10 % del tamaño global
Número de elementos	15,264

Una vez discretizado el modelo, se definieron las interacciones de contacto entre las superficies del componente mediante contacto general y auto-contacto, utilizando un coeficiente de fricción de 0.2. El auto-contacto se incluyó para representar la interacción entre los pliegues cuando estos entran en contacto durante estados de alta compresión.

Las condiciones de frontera se establecieron restringiendo el desplazamiento del extremo superior del modelo, mientras que el desplazamiento axial requerido para reproducir las condiciones de compresión y extensión se aplicó en el extremo inferior. Las condiciones de contacto, las restricciones y los desplazamientos empleados en la simulación se resumen en la Tabla III.

Tabla III. Condiciones de contacto, frontera y desplazamiento utilizadas en la simulación.

Parámetro	Condición
Interacción	Contacto general y auto-contacto
Coefficiente de fricción	0.2
Extremo superior	$U_1 = U_2 = U_R = 0$
Jounce (compresión)	$U_2 = -103.3 \text{ mm}$
Rebound (extensión)	$U_2 = +109.5 \text{ mm}$
Secuencia	Compresión $\rightarrow$ Extensión

La simulación se desarrolló mediante dos etapas consecutivas. En la primera se reprodujo la condición de compresión completa del componente mediante un desplazamiento axial $U_2 = -103.3 \text{ mm}$. Posteriormente, se evaluó la condición de extensión completa mediante un desplazamiento axial $U_2 = +109.5 \text{ mm}$. La segunda etapa partió del estado final alcanzado durante la compresión, lo que permitió conservar la configuración deformada del componente y considerar su evolución geométrica entre ambas condiciones.

La aplicación de modelos hiperelásticos mediante el método de elementos finitos ha sido estudiada para la representación de componentes elastoméricos sometidos a grandes deformaciones. Gajewski y Miecznikowski (2021) reportaron concordancia entre resultados experimentales y numéricos mediante simulaciones hiperelásticas desarrolladas en Abaqus. De manera similar, Liu et al. (2021) señalaron la capacidad de estos modelos constitutivos para representar materiales deformables con geometrías complejas y concentraciones locales de deformación. Hossain y Steinmann (2022) también documentaron el uso de formulaciones hiperelásticas mediante elementos finitos para el análisis de la respuesta mecánica no lineal de materiales elastoméricos.

Con base en estos antecedentes, en el presente estudio la simulación se utilizó como una herramienta comparativa para evaluar la respuesta del *dust boot* bajo las mismas condiciones

geométricas y de carga para los tres materiales analizados. De esta manera, las diferencias observadas entre las simulaciones pueden asociarse con la respuesta constitutiva definida para cada material.

La Figura 4 muestra la geometría axisimétrica del *dust boot* utilizada en el modelo de elementos finitos, incluyendo la configuración de los pliegues y las transiciones geométricas consideradas en la simulación.



Fig. 4. Geometría del *dust boot* utilizada en la simulación por elementos finitos. (Elaboración propia, 2026.)

Por otro lado, la Figura 5 presenta el mallado empleado en el modelo, incluyendo el refinamiento aplicado en las regiones de los pliegues, donde se desarrollan cambios importantes de geometría durante las condiciones de compresión y extensión. Esta discretización se utilizó para representar la distribución de esfuerzos y deformaciones generadas durante la simulación.

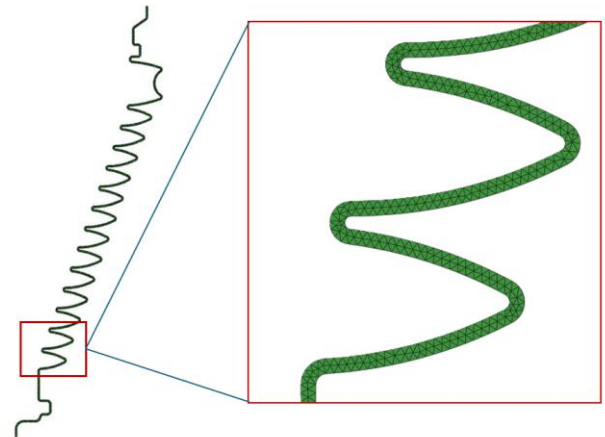


Fig. 5. Discretización del modelo paramétrico en Abaqus. (Elaboración Propia, 2026.)

En el presente estudio, la geometría, la discretización, las condiciones de frontera, las interacciones de contacto y la secuencia de desplazamientos se mantuvieron constantes para POE/PP 50/50, POE/PP 70/30 y Elastoprene. De esta manera, la única variable entre las simulaciones correspondió al comportamiento constitutivo de cada material, lo que permitió comparar su respuesta bajo las mismas condiciones numéricas,

considerando la deformación del componente y la distribución local de esfuerzos.

III. RESULTADOS

A. Respuesta experimental

Los resultados se presentan en tres etapas: la caracterización experimental de los materiales, la determinación de los parámetros hiperelásticos y la evaluación mediante elementos finitos del dust boot. En primer lugar, se presenta la respuesta mecánica de POE/PP 50/50, POE/PP 70/30 y del TPV de referencia Elastoprene a partir de las curvas esfuerzo-deformación y de las propiedades obtenidas mediante los ensayos de tracción. Los resultados experimentales se presentan como promedio $\pm$ desviación estándar, calculados a partir de cinco probetas para cada material ($n = 5$). Posteriormente, se presentan los parámetros C_{10} y D_1 determinados para el modelo Neo-Hookeano y, finalmente, los resultados de la simulación numérica bajo las condiciones de compresión y extensión.

Las curvas esfuerzo-deformación evidenciaron diferencias en la respuesta mecánica de los tres materiales evaluados. Para su comparación se consideraron el módulo de tensión (E_t), el esfuerzo máximo (σ_m) y la deformación a la ruptura (ε_B), cuyos valores promedio y desviaciones estándar obtenidos a partir de cinco probetas por material ($n = 5$) se presentan en la Tabla IV.

Tabla IV .Propiedades mecánicas experimentales de los materiales evaluados ($n = 5$).

Material	E_t (MPa)	σ_m (MPa)	ε_B (%)
POE/PP 50/50	519.29 ± 23.80	15.40 ± 0.40	432.00 ± 44.00
POE/PP 70/30	273.31 ± 12.59	10.21 ± 0.37	363.96 ± 42.91
Elastoprene	329.21 ± 16.80	14.87 ± 2.04	476.21 ± 32.40

Los valores se expresan como media $\pm$ desviación estándar.

En términos de los valores promedio, la mezcla POE/PP 50/50 presentó el mayor módulo ($E_t = 519.29 \pm 23.80$ MPa) y el mayor esfuerzo máximo promedio ($\sigma_m = 15.40 \pm 0.40$ MPa). Elastoprene presentó la mayor deformación a la ruptura ($\varepsilon_B = 476.21 \pm 32.40$ %), mientras que la mezcla POE/PP 70/30 registró los menores valores promedio de las tres propiedades evaluadas, con $E_t = 273.31 \pm 12.59$ MPa, $\sigma_m = 10.21 \pm 0.37$ MPa y $\varepsilon_B = 363.96 \pm 42.91$ %. Las diferencias observadas entre los materiales se presentan con mayor detalle en las curvas esfuerzo-deformación que a continuación se presentan.

La Figura 6 presenta las curvas experimentales esfuerzo-deformación obtenidas para las cinco probetas de Elastoprene a partir de los datos registrados y procesados por el software del equipo de ensayo durante la prueba de tracción. A partir de estas curvas, se obtuvo un esfuerzo máximo promedio de 14.87 ± 2.04 MPa y una deformación a la ruptura de 476.21 ± 32.40 %. Este último correspondió al mayor valor promedio de

deformación a la ruptura entre los tres materiales evaluados. De igual forma, este material presentó la desviación estándar más grande para el esfuerzo máximo. Para todos los materiales estudiados, las curvas permiten observar la variabilidad experimental entre las cinco probetas a lo largo del ensayo y hasta alcanzar la ruptura.

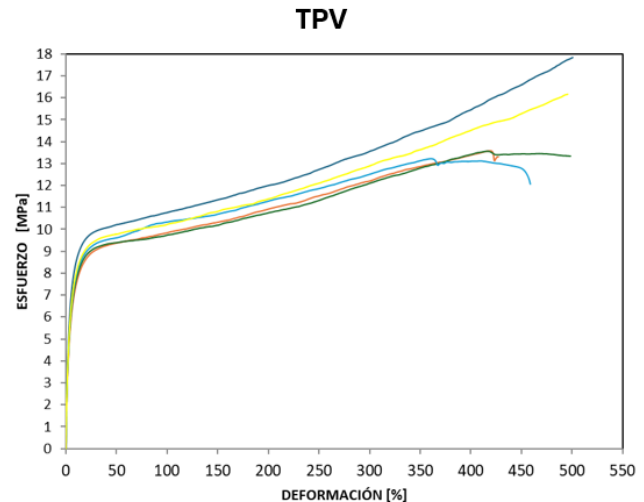


Fig. 6. Gráfica esfuerzo-deformación para el TPV (Elaboración Propia, 2026).

La Figura 7 muestra las curvas experimentales esfuerzo-deformación obtenidas para las cinco probetas de la mezcla POE/PP 50/50 durante la prueba de tracción. Para este caso, se obtuvo un módulo de tensión promedio $E_t = 519.29 \pm 23.80$ MPa, un esfuerzo máximo promedio de $\sigma_m = 15.40 \pm 0.40$ MPa y una deformación a la ruptura de $\varepsilon_B = 432.00 \pm 44.00$ %. Entre los materiales evaluados, esta formulación presentó los mayores valores promedio de E_t y σ_m .

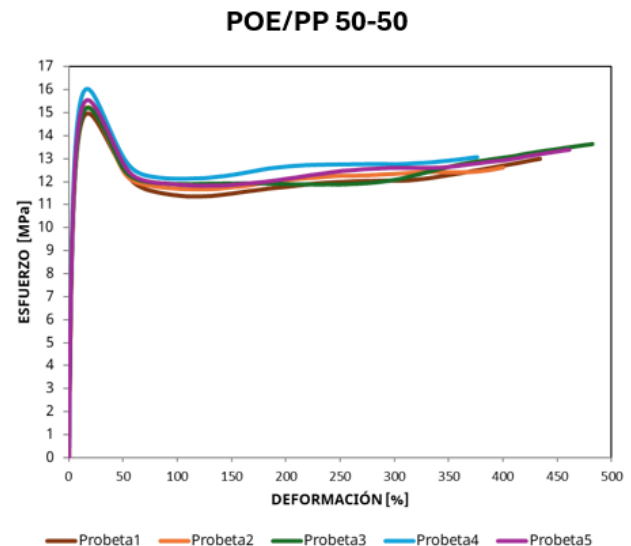


Fig. 7. Gráfica esfuerzo-deformación para la mezcla POE/PP 50/50 (Elaboración Propia, 2026).

En la Figura 8 se muestran las curvas experimentales esfuerzo-deformación para la mezcla POE/PP 70/30 a partir de los datos registrados y procesados durante la prueba de tracción. Se obtuvo un módulo de tensión promedio $E_t = 273.31 \pm 12.59$

MPa, un esfuerzo máximo promedio $\sigma_m = 10.21 \pm 0.37$ MPa y una deformación a la ruptura $\varepsilon_\beta = 363.96 \pm 42.91$ %. Entre los tres materiales evaluados, esta formulación presentó los menores valores promedio para las tres propiedades mecánicas consideradas.

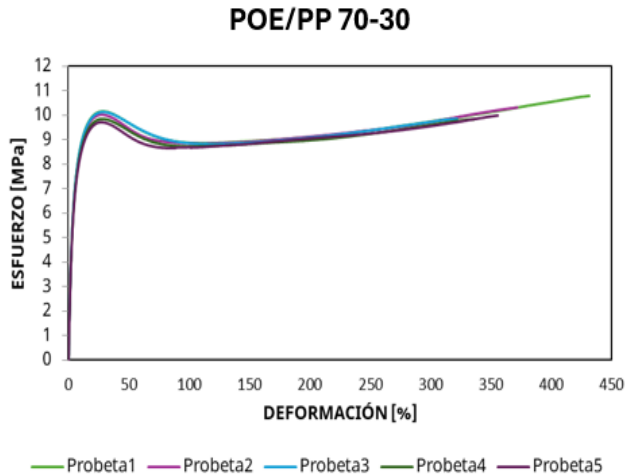


Fig. 8. Gráfica esfuerzo-deformación para la mezcla POE/PP 70/30. (Elaboración Propia, 2026.)

Una vez presentada la respuesta esfuerzo-deformación de cada material, los resultados individuales obtenidos para las cinco probetas ($n = 5$) se utilizaron para evaluar la variabilidad experimental de las propiedades mecánicas. Para cada propiedad se calcularon la media, la desviación estándar (SD), el rango experimental, definido por los valores mínimo y máximo registrados, y el coeficiente de variación (CV), utilizado para expresar la dispersión de los resultados con respecto a su valor medio. Los resultados del análisis descriptivo se presentan en la Tabla V.

Tabla V. Análisis descriptivo de las propiedades mecánicas ($n = 5$).

Material	Propiedad	Media $\pm$ SD	Rango	CV (%)
POE/PP 50/50	E_t (MPa)	519.29 $\pm$ 23.80	494.35–556.35	4.58
	σ_m (MPa)	15.40 $\pm$ 0.40	14.98–16.02	2.60
	ε_β (%)	432.00 $\pm$ 44.00	376.47–482.59	10.19
POE/PP 70/30	E_t (MPa)	273.31 $\pm$ 12.59	255.86–288.92	4.61
	σ_m (MPa)	10.21 $\pm$ 0.37	9.84–10.79	3.62
	ε_β (%)	363.96 $\pm$ 42.91	321.73–431.97	11.79
Elastoprene	E_t (MPa)	329.21 $\pm$ 16.80	307.33–345.77	5.10
	σ_m (MPa)	14.87 $\pm$ 2.04	13.22–17.84	13.68
	ε_β (%)	476.21 $\pm$ 32.40	427.12–500.78	6.80

SD: desviación estándar; CV: coeficiente de variación.

A partir de los valores individuales obtenidos para las cinco probetas de cada material mediante el software del equipo de ensayo, se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV), este último mediante la relación entre la desviación estándar y la media. Para E_t se obtuvieron valores de CV similares entre los tres materiales, comprendidos entre 4.58 y 5.10 %. Para σ_m , Elastoprene presentó el mayor CV, con 13.68 %, mientras que para ε_β los valores se encontraron entre 6.80 y 11.79 %.

Posteriormente, utilizando los valores individuales de las cinco probetas de cada material, se verificaron los supuestos

estadísticos previos al análisis de varianza. Para ello, se aplicó la prueba de Shapiro–Wilk, asociada con la normalidad de los datos, y la prueba de Levene, relacionada con la homogeneidad de las varianzas. No se detectaron desviaciones estadísticamente significativas de la normalidad ($p > 0.05$), mientras que la prueba de Levene tampoco mostró diferencias significativas entre las varianzas para E_t ($p = 0.572$), σ_m ($p = 0.202$) y ε_β ($p = 0.801$).

Una vez verificados estos supuestos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía de manera independiente para E_t , σ_m y ε_β , considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Este análisis permitió determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tres materiales. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla VI.

Tabla VI Resultados del ANOVA de una vía

Propiedad	F	p
E_t	247.57	<0.001*
σ_m	27.50	<0.001*
ε_β	9.93	0.0029*

* Diferencia estadísticamente significativa para $p < 0.05$.

El ANOVA mostró diferencias estadísticamente significativas entre los materiales para las tres propiedades evaluadas: E_t ($F = 247.57$; $p < 0.001$), σ_m ($F = 27.50$; $p < 0.001$) y ε_β ($F = 9.93$; $p = 0.0029$). Estos resultados indican que, para cada una de las propiedades analizadas, al menos uno de los materiales presentó una media estadísticamente diferente. Debido a que el ANOVA no identifica entre qué pares de materiales se presentan estas diferencias, se aplicó posteriormente la prueba post hoc de Tukey HSD. Los resultados de las comparaciones por pares se presentan en la Tabla VII.

Tabla VII Comparaciones múltiples mediante Tukey HSD.

Propiedad	50/50 vs. 70/30	50/50 vs. TPV	70/30 vs. TPV
E_t	<0.001*	<0.001*	0.0011*
σ_m	0.0001*	0.7766	0.0002*
ε_β	0.0488*	0.2302	0.0022*

* Diferencia estadísticamente significativa para $p < 0.05$.

La prueba de Tukey HSD mostró que, para el módulo de tensión (E_t), existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tres materiales ($p < 0.05$). Para el esfuerzo máximo (σ_m), la mezcla POE/PP 70/30 presentó diferencias significativas respecto a la mezcla POE/PP 50/50 y al Elastoprene. En cambio, no se encontró una diferencia significativa entre la mezcla POE/PP 50/50 y el Elastoprene ($p = 0.7766$). Para la deformación a la ruptura (ε_β) se observó un comportamiento similar: la mezcla POE/PP 70/30 presentó diferencias significativas respecto a los otros dos materiales, mientras que la mezcla POE/PP 50/50 y el Elastoprene no mostraron una diferencia significativa ($p = 0.2302$). En conjunto, la mezcla POE/PP 70/30 fue estadísticamente diferente de los otros dos materiales en las tres propiedades evaluadas. En contraste, la mezcla POE/PP 50/50 y el Elastoprene únicamente presentaron diferencias significativas en el valor de E_t , mientras que sus valores de σ_m y ε_β no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

B. Parámetros hiperelásticos

A partir de las curvas experimentales esfuerzo-deformación se determinaron los parámetros C_{10} y D_1 del modelo Neo-Hookeano mediante el procedimiento descrito en la Sección II-D. Para cada material, la deformación experimental se transformó en una razón de estiramiento λ mediante la Ecuación (7), y posteriormente se calculó la variable auxiliar X de acuerdo con la Ecuación (9). Con los valores experimentales de esfuerzo nominal y X, el parámetro C_{10} se determinó mediante el ajuste por mínimos cuadrados establecido en la Ecuación (11).

A partir del valor obtenido de C_{10} , el módulo cortante inicial μ se calculó mediante la Ecuación (12). Considerando un coeficiente de Poisson de $\nu = 0.49$, se determinaron posteriormente el módulo de Young E mediante la Ecuación (13) y el módulo volumétrico K empleando la Ecuación (14). Finalmente, el parámetro de compresibilidad D_1 se obtuvo a partir de K mediante la Ecuación (15). Los valores resultantes de C_{10} y D_1 para cada material se presentan en la Tabla VIII

Tabla VIII Parámetros Neo-Hookeanos determinados para los materiales evaluados.

Material	C_{10} (MPa)	D_1 (MPa ⁻¹)
POE/PP 50/50	81.00	2.49×10^{-4}
POE/PP 70/30	39.31	5.12×10^{-4}
Elastoprene	30.87	6.52×10^{-4}

Los parámetros obtenidos mostraron diferencias entre los materiales evaluados. Para C_{10} , la mezcla POE/PP 50/50 presentó el valor más alto, con 81.00 MPa, seguido de la mezcla POE/PP 70/30, con 39.31 MPa, y el Elastoprene, con 30.87 MPa. En el caso de D_1 , los valores obtenidos fueron 2.49×10^{-4} MPa⁻¹ para la mezcla POE/PP 50/50, 5.12×10^{-4} MPa⁻¹ para la mezcla POE/PP 70/30 y 6.52×10^{-4} MPa⁻¹ para el Elastoprene. Los valores de C_{10} y D_1 determinados para cada material se utilizaron como parámetros de entrada del modelo Neo-Hookeano en las simulaciones por elementos finitos. Su implementación permitió representar numéricamente la respuesta constitutiva correspondiente a cada material y realizar las simulaciones bajo las mismas condiciones de geometría, discretización, contacto, condiciones de frontera y desplazamiento. De esta manera, las diferencias obtenidas en la respuesta numérica estuvieron asociadas a la definición constitutiva empleada para cada material.

C. Simulación del dust boot

Una vez implementados los parámetros hiperelásticos C_{10} y D_1 correspondientes a cada material, se evaluó mediante elementos finitos la respuesta del *dust boot* bajo las condiciones de compresión y extensión definidas en la Sección II-E. Para asegurar una comparación directa entre los materiales, se mantuvieron constantes la geometría, la discretización, las condiciones de contacto, las condiciones de frontera y los desplazamientos aplicados. Los resultados se analizaron a partir

de la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises y de los valores máximos locales obtenidos para cada material.

La Figura 9 presenta la distribución del esfuerzo equivalente de von Mises obtenida para el Elastoprene durante la condición de extensión. El esfuerzo máximo local fue de 32.20 MPa y se localizó en la región inferior del componente, próxima a la transición entre los pliegues y la zona de sujeción. En el resto de los pliegues se observaron valores de esfuerzo predominantemente menores, aproximadamente entre 0 y 15.549 MPa.

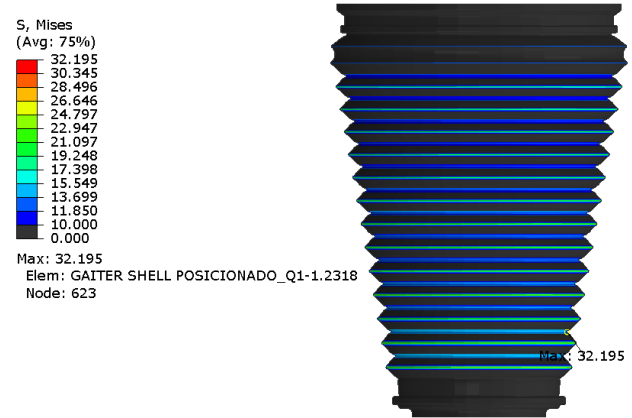


Fig. 9. Distribución de esfuerzos para el material TPV. (Elaboración Propia, 2026.)

Para la mezcla POE/PP 50/50 se obtuvo el mayor esfuerzo máximo local de los tres materiales, alcanzando 84.47 MPa durante la condición de extensión. Como se muestra en la Figura 10, el máximo se localizó en la región inferior del componente, mientras que, de acuerdo con la distribución de esfuerzos mostrada en la escala de Abaqus, en el resto de los pliegues se observaron valores entre 12.0 y 40.500 MPa. Ver figura 10

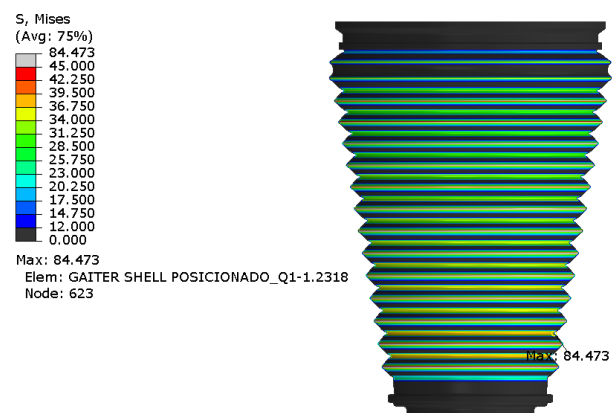


Fig. 10. Distribución de esfuerzos para la mezcla POE/PP 50-50. (Elaboración Propia, 2026.)

Para la mezcla POE/PP 70/30 se obtuvo un esfuerzo máximo local de aproximadamente 41.00 MPa durante la condición de extensión, ver Figura 11. Para este caso, el máximo también se localizó en la región inferior del componente y según con la

distribución de esfuerzos mostrada en la escala de Abaqus, en el resto de los pliegues se observaron valores en el rango de 0 y 20.00 MPa.



Fig. 11. Distribución de esfuerzos para la mezcla POE/PP 70-30. (Elaboración Propia, 2026.)

A partir de los resultados obtenidos para los tres materiales, se realizó una comparación directa de los esfuerzos máximos locales desarrollados bajo la misma condición de extensión. La Tabla IX resume los valores obtenidos para cada caso.

Tabla IX Esfuerzos máximos locales obtenidos mediante FEM durante rebound (extensión).

Material	Esfuerzo máximo local (MPa)	Intervalo predominante en los pliegues (MPa)
Elastoprene	≈32.20	10–15
POE/PP 50/50	≈84.47	24–40
POE/PP 70/30	≈41.00	13–20

Nota: Los intervalos corresponden a los valores predominantes observados en la distribución de esfuerzos y en la escala de resultados de Abaqus, excluyendo los máximos localizados.

La comparación de los resultados numéricos mostró diferencias entre los tres materiales. El Elastoprene presentó un esfuerzo máximo local de aproximadamente 32.20 MPa, mientras que la mezcla POE/PP 70/30 alcanzó 41.00 MPa, correspondiente a una diferencia de aproximadamente 8.8 MPa (21%). La mezcla POE/PP 50/50 presentó el mayor esfuerzo máximo local, con 84.47 MPa, aproximadamente 52.3 MPa por encima del valor obtenido para el Elastoprene. Fuera de los máximos localizados, se observaron intervalos de esfuerzo aproximados de 10–15 MPa para Elastoprene, 13–20 MPa para POE/PP 70/30 y 24–40 MPa para POE/PP 50/50. De los dos materiales POE/PP evaluados, la mezcla 70/30 presentó valores numéricamente más próximos a los obtenidos para el TPV de referencia, tanto en el esfuerzo máximo local como en los intervalos observados en los pliegues. Los tres modelos completaron la secuencia de desplazamiento establecida hasta alcanzar la condición de extensión. Los valores máximos reportados corresponden a concentraciones locales de esfuerzo obtenidas mediante FEM y se utilizaron para la comparación numérica de los tres materiales bajo las mismas condiciones de simulación.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados experimentales y numéricos muestran que la respuesta del *dust boot* no estuvo determinada únicamente por las propiedades obtenidas mediante los ensayos de tensión, sino también por la interacción entre el comportamiento del material y la geometría del componente. Experimentalmente, la mezcla POE/PP 50/50 presentó el mayor módulo de tensión ($E_t = 519.29 \pm 23.80$ MPa) y esfuerzo máximo ($\sigma_m = 15.40 \pm 0.40$ MPa), mientras que el Elastoprene presentó la mayor deformación a la ruptura ($\varepsilon_B = 476.21 \pm 32.40$ %). Por su parte, la mezcla POE/PP 70/30 presentó los menores valores promedio para las tres propiedades evaluadas. Estas diferencias pueden relacionarse con la composición de las mezclas, ya que la proporción entre PP y POE influye en la rigidez y capacidad de deformación del sistema polimérico (Ward & Sweeney, 2013).

El análisis estadístico permitió precisar estas diferencias. La mezcla POE/PP 50/50 no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto al Elastoprene para σ_m ($p = 0.7766$) y ε_B ($p = 0.2302$), aunque sí para E_t ($p < 0.001$). En contraste, la mezcla POE/PP 70/30 presentó diferencias significativas respecto al TPV en las tres propiedades evaluadas. Esto indica que la formulación 50/50 presentó una mayor similitud experimental con el material de referencia en términos de esfuerzo máximo y deformación a la ruptura, pero no en rigidez. Por lo tanto, la proximidad en propiedades individuales entre materiales no implica necesariamente una respuesta mecánica equivalente bajo otras condiciones de deformación.

Las diferencias experimentales también se reflejaron en los parámetros determinados para el modelo Neo-Hookeano. La mezcla POE/PP 50/50 presentó el mayor valor de C_{10} (81.00 MPa), seguido de la mezcla POE/PP 70/30 (39.31 MPa) y el Elastoprene (30.87 MPa). Asimismo, los valores de C_{10} y D_1 de la mezcla POE/PP 70/30 fueron numéricamente más próximos a los obtenidos para el TPV. Esta relación adquirió relevancia al implementar los materiales en el modelo del *dust boot*, debido a que estos parámetros definieron la respuesta constitutiva utilizada para representar cada material durante la simulación.

En la simulación por elementos finitos, los esfuerzos máximos locales fueron de 32.195 MPa para el Elastoprene, 40.997 MPa para la mezcla POE/PP 70/30 y 84.473 MPa para la mezcla POE/PP 50/50. Debido a que en los tres materiales estos máximos se concentraron en una región reducida y en la misma zona del componente, se conservaron como referencia; sin embargo, la comparación de la respuesta general se apoyó principalmente en los intervalos de esfuerzo observados a lo largo de los pliegues. Estos fueron aproximadamente de 0–20.00 MPa para el Elastoprene, 0–15.549 MPa para la mezcla POE/PP 70/30 y 0–40.500 MPa para la contraparte POE/PP 50/50. De esta manera, la mezcla POE/PP 70/30 presentó una distribución y niveles de esfuerzo más próximos a los observados para el TPV, mientras que la mezcla POE/PP 50/50 desarrolló esfuerzos considerablemente mayores durante la condición de extensión.

El contraste entre estos intervalos y los resultados experimentales permite observar con mayor claridad las diferencias entre ambas condiciones de evaluación. Para el Elastoprene, su esfuerzo máximo experimental ($\sigma_m = 14.87 \pm 2.04$ MPa) se encuentra dentro del intervalo de esfuerzos (10–15 MPa) en los pliegues obtenido en la simulación numérica. Por otro lado, para la mezcla POE/PP 70/30, el intervalo de esfuerzos obtenidos en la simulación (13–20 MPa) se encontró por encima de su σ_m experimental (10.21 ± 0.37 MPa), mientras que la mezcla POE/PP 50/50 presentó la mayor diferencia entre el esfuerzo máximo experimental y el rango obtenido en la simulación numérica, siendo de 15.40 ± 0.40 MPa y de 24–40 MPa, respectivamente. Así, aunque la mezcla POE/PP 50/50 presentó experimentalmente valores de σ_m y ε_β sin diferencias estadísticamente significativas respecto al TPV, esta similitud no se mantuvo al implementar el material en la geometría del *dust boot*. En cambio, la mezcla POE/PP 70/30, a pesar de presentar diferencias significativas respecto al TPV en las propiedades experimentales, mostró una distribución de esfuerzos numéricamente más próxima a la del material de referencia.

Este comportamiento puede analizarse en conjunto con las diferencias de rigidez y los parámetros hiperelásticos. La mezcla POE/PP 50/50 presentó simultáneamente el mayor E_t , el mayor C_{10} y los mayores niveles de esfuerzo en los pliegues, mientras que la mezcla POE/PP 70/30 presentó valores de C_{10} y D_1 más próximos a los del TPV y una distribución de esfuerzos también más cercana a la observada para este material. Esto muestra que la similitud en σ_m y ε_β obtenida mediante tensión uniaxial no fue suficiente para reproducir una respuesta semejante dentro del *dust boot*, donde la rigidez, la respuesta constitutiva y las restricciones impuestas por la geometría intervienen conjuntamente en el comportamiento del componente.

Finalmente, la comparación entre los esfuerzos experimentales y numéricos debe interpretarse considerando que corresponden a condiciones mecánicas diferentes. El ensayo experimental representa una condición de tensión uniaxial, mientras que el modelo del *dust boot* incorpora la geometría deformada, las interacciones de contacto y las condiciones de frontera aplicadas. Además, el modelo numérico no incluyó un criterio constitutivo de daño o falla. Por lo anterior, que determinados esfuerzos calculados mediante FEM superen el σ_m experimental constituye un aspecto relevante de la comparación, pero no permite establecer directamente la falla del componente. Los resultados permiten analizar cómo las diferencias en las propiedades y en el comportamiento constitutivo de los materiales se reflejan en la distribución de esfuerzos desarrollada en el *dust boot* bajo las condiciones evaluadas.

V. CONCLUSIONES

La integración de la caracterización experimental y la simulación por elementos finitos permitió comparar el comportamiento de las formulaciones POE/PP 50/50 y POE/PP 70/30 con el Elastoprene utilizado como TPV de referencia en la fabricación del componente *dust boot*. Los resultados mostraron que la similitud entre los materiales depende de la condición de evaluación y que la caracterización mediante

tensión uniaxial, por sí sola, no permite representar completamente la respuesta del material al ser implementado en la geometría del *dust boot*.

Experimentalmente, la mezcla POE/PP 50/50 presentó la mayor proximidad al TPV en esfuerzo máximo y deformación a la ruptura. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos materiales para σ_m ($p = 0.7766$) ni para ε_β ($p = 0.2302$); sin embargo, sí se observó una diferencia significativa para E_t ($p < 0.001$). En contraste, la mezcla POE/PP 70/30 presentó diferencias significativas respecto al TPV en las tres propiedades evaluadas. Estos resultados confirman que la similitud experimental entre las formulaciones y el material de referencia depende de la propiedad considerada y no implica una equivalencia general de su comportamiento mecánico.

Por otra parte, la simulación numérica del *dust boot* mostró una tendencia diferente. Aunque los máximos locales fueron de aproximadamente 32.195 MPa para el Elastoprene, 40.997 MPa para la mezcla POE/PP 70/30 y 84.473 MPa para la mezcla POE/PP 50/50, estos valores se concentraron en una región localizada del componente. Al considerar la distribución de esfuerzos en los pliegues, se observaron intervalos aproximados de 0–20.00 MPa para el TPV, 0–15.549 MPa para la mezcla POE/PP 70/30 y 12 a 40.500 MPa para la contraparte POE/PP 50/50. Bajo las mismas condiciones numéricas, la mezcla POE/PP 70/30 presentó una distribución y niveles de esfuerzo más próximos a los obtenidos para el TPV de referencia que la mezcla POE/PP 50/50.

La mezcla POE/PP 50/50 presentó mayor similitud con el TPV en determinadas propiedades obtenidas mediante tensión uniaxial, mientras que la mezcla POE/PP 70/30 reprodujo con mayor proximidad la respuesta numérica del material de referencia cuando se considera la geometría del *dust boot*. Por lo tanto, los resultados obtenidos identifican a la mezcla POE/PP 70/30 como una formulación de interés para continuar su evaluación a nivel de componente. No obstante, su posible implementación como alternativa al TPV requiere validación física adicional en el *dust boot* bajo condiciones representativas de operación, particularmente porque el modelo numérico empleado no incorporó un criterio constitutivo de daño o falla. Esta evaluación se vislumbra realizar en un trabajo a futuro y escapa a los alcances establecidos originalmente en este estudio.

REFERENCIAS

1. ASTM International. (2022). *ASTM D638-22: Standard test method for tensile properties of plastics*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-22> *ASTM Store*
2. Baird, D. G., & Collias, D. I. (2014). *Polymer processing: Principles and design* (2nd ed.). John Wiley & Sons. *Wiley Store*
3. Dassault Systèmes. (2025a). *Abaqus documentation: Hyperelastic behavior of rubberlike materials*. SIMULIA. *Documentación de Software VT*
4. Dassault Systèmes. (2025b). *Abaqus documentation: Strain energy potential*. SIMULIA. *Documentación de Software VT*
5. He, H., Zhang, Q., Zhang, Y., Chen, J., Zhang, L., & Li, F. (2022). A comparative study of 85 hyperelastic constitutive models for both unfilled rubber and highly filled rubber nanocomposite material. *Nano Materials Science*, 4(2), 64–82. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.003> *ScienceDirect*
6. Ho, Q. B., & Kontopoulou, M. (2022). Improving the adhesion and properties in the material extrusion of polypropylene by blending with a

- polyolefin elastomer. *Additive Manufacturing*, 55, 102818. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102818> ScienceDirect
7. Holzapfel, G. A. (2000). *Nonlinear solid mechanics: A continuum approach for engineering*. John Wiley & Sons.
 8. Hu, J., Zhang, Y., Song, W., Zou, F., Zheng, Y., Fu, Q., & Zhang, J. (2023). Development of unstable flow and morphological analysis of flow marks in injection molding of polypropylene and polyolefin elastomer blend. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(34), 13303–13313. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01967> ACS Publications
 9. Im, H., & Jeoung, S. (2023). Mechanical aging test and sealing performance of thermoplastic vulcanizate as sealing gasket in automotive fuel cell applications. *Polymers*, 15(8), 1872. <https://doi.org/10.3390/polym15081872> MDPI
 10. Kossa, A., Valentine, M. T., & McMeeking, R. M. (2023). Analysis of the compressible, isotropic, neo-Hookean hyperelastic model. *Meccanica*, 58, 217–232. <https://doi.org/10.1007/s11012-022-01633-2> Springer
 11. Liu, Y., Dai, Y., & Luo, S. (2025). Characterization of polypropylene–polyolefin elastomer blends for FDM additive manufacturing. *Iranian Polymer Journal*, 34(6), 829–839. <https://doi.org/10.1007/s13726-024-01413-7> ResearchGate
 12. Ma, L., Li, C., & Liu, C. (2023). Construct the relationship of the interface structure-properties for TPV via micromechanical method based on cohesive zone model. *Polymer*, 286, 126348. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126348> ScienceDirect
 13. Ricker, A., Gierig, M., & Wriggers, P. (2023). Multiplicative, non-Newtonian viscoelasticity models for rubber materials and brain tissues: Numerical treatment and comparative studies. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 2889–2927. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09889-x> Springer
 14. Ricker, A., & Wriggers, P. (2023). Systematic fitting and comparison of hyperelastic continuum models for elastomers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30, 2257–2288. <https://doi.org/10.1007/s11831-022-09865-x> Springer
 15. Schönherr, J. A., Schneider, P., & Mittelstedt, C. (2022). Robust hybrid/mixed finite elements for rubber-like materials under severe compression. *Computational Mechanics*, 70, 101–122. <https://doi.org/10.1007/s00466-022-02157-y> Springer
 16. Song, L.-F., Bai, N., Shi, Y., Wang, Y.-X., Song, L.-X., & Liu, L.-Z. (2023). Effects of ethylene-propylene-diene monomers (EPDMs) with different Mooney viscosity on crystallization behavior, structure, and mechanical properties of thermoplastic vulcanizates (TPVs). *Polymers*, 15(3), 642. <https://doi.org/10.3390/polym15030642> MDPI
 17. Wan, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Zhang, L., & Li, F. (2024). User subroutines platform development for rubber hyperelastic constitutive models and its application in finite element analysis. *Computational Materials Science*, 237, 112885. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2024.112885> ScienceDirect
 18. Ward, I. M., & Sweeney, J. (2013). *Mechanical properties of solid polymers* (3rd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119967125> Wiley Online Library
 19. Wei, J., Abdurexit, A., Jamal, R., Abdiryim, T., You, J., Li, Z., Shang, J., & Cheng, Q. (2024). Carbon fiber reinforced recycled polypropylene/polyolefin elastomer composites with high mechanical properties. *Polymers*, 16(7), 972. <https://doi.org/10.3390/polym16070972> MDPI
 20. Zhang, L., Wu, W., Teng, C., & Meng, S. (2022). Mechanical properties and space charge behavior of thermally aged polypropylene/elastomer blends. *Journal of Electrostatics*, 115, 103673. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2022.103673> ScienceDirect
 21. Zheng, S., Huang, R., Lin, R., & Liu, Z. (2022). A phase field solution for modelling hyperelastic material and hydrogel fracture in ABAQUS. *Engineering Fracture Mechanics*, 276, 108894. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108894>