

Selección y caracterización mecánica de un material compuesto para el diseño y la fabricación de paneles planos en un vehículo

Martin Daniel Cañas Rueda

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

Ph.D. Procesos termo fluido dinámicos aplicados a motores de combustión interna

Codirector

William Pinto Hernández

Ph.D. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi familia, el motor que siempre me impulsó a seguir adelante. A mis padres, por su amor incondicional y por ser mi mayor inspiración. Gracias por cada sacrificio, por su esfuerzo incansable y por enseñarme, con su ejemplo, que la disciplina, la honestidad y el trabajo duro abren cualquier camino. Gracias por sus palabras de aliento, por su fe inquebrantable y por estar siempre ahí con un abrazo, una sonrisa y un consejo sabio.

A mis docentes, quienes con su paciencia, dedicación y enseñanzas me ayudaron a crecer no solo como estudiante, sino también como persona, me inspiraron a pensar, a cuestionar y a buscar siempre una mejor solución.

A quienes creyeron en mí, a los que me motivaron en los momentos difíciles, a quienes han estado presentes en mi corazón en cada paso de este camino y a los que nunca dudaron de que este día llegaría.

Agradecimientos

A Dios, por darme la oportunidad de llegar hasta aquí, por guiarme en cada paso y permitirme disfrutar cada momento de este proceso.

A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor fuente de inspiración. Gracias por confiar en mí, por su esfuerzo y por enseñarme que la perseverancia y el trabajo duro siempre dan frutos.

A la Universidad industrial de Santander, por brindarme los espacios, laboratorios y equipos necesarios para desarrollar este trabajo, agradezco a cada persona que facilitó el acceso a estos recursos y contribuyó de alguna manera en la realización de este proyecto.

A mi director y codirector de trabajo de grado, por su guía, paciencia y valiosos aportes durante todo este proceso, su orientación fue clave para el desarrollo de esta investigación, para mi crecimiento académico y profesional.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1 Pregunta de investigación	13
2. Justificación	14
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo General.....	16
3.2 Objetivos Específicos.....	16
4. Marco teórico	17
4.1 Antecedentes	17
4.2 Polímeros	19
4.2.1 Clasificación de los polímeros	20
4.2.2 Polietileno: HDPE y LDPE.....	21
4.2.3 Polipropileno (PP).....	22
4.3 Reciclaje de termoplásticos: Procesos y aplicaciones	23
4.3.1 Reciclaje mecánico	24
4.3.2 Reciclaje químico.....	24
4.3.3 Reciclaje energético	25
4.3.4 Aplicaciones del reciclaje de termoplásticos	25
4.4 Introducción a los sistemas automotrices	26
4.5 Materiales termoplásticos en sistemas automotrices	27
5. Metodología	29

6. Resultados	33
6.1 Construcción de la matriz QFD para la selección del método de fabricación del panel plano	33
6.1.1 Identificación de necesidades del cliente	33
6.1.2 Asignación de pesos mediante el método AHP	34
6.1.3 Identificación de características técnicas del proceso (“CÓMO”)	36
6.1.4 Matriz de correlación entre necesidades del cliente y características del proceso	37
6.1.5 Correlación entre características técnicas del proceso (“CÓMO” – “CÓMO”)	39
6.1.6 Evaluación técnica de alternativas de materiales y procesos de fabricación	41
6.1.6.1 Evaluación técnica de alternativas de materiales	41
6.1.6.2 Evaluación técnica de procesos de fabricación	43
6.2 Proceso de obtención y fabricación de probetas	45
6.2.1 Preparación de los materiales reciclados	45
6.2.2 Fabricación de probetas	46
6.3 Aplicación y evaluación de las probetas	53
6.3.1 Procesamiento de datos experimentales	53
6.4 Análisis de los Resultados	57
6.4.1 Análisis de los resultados del ANOVA	59
6.5 Análisis de viabilidad técnico-económica	60
5. Conclusiones	64
6. Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Escala fundamental de Saaty	34
Tabla 2. Matriz comparativa AHP entre necesidades del cliente	35
Tabla 3. Matriz normalizada del método AHP	35
Tabla 4. Vector de prioridades (pesos relativos de las necesidades)	35
Tabla 5. Características técnicas del proceso consideradas en la matriz QFD	37
Tabla 6. Escala de valoración para la matriz QFD	38
Tabla 7. Matriz de correlación QFD entre necesidades del cliente y características del proceso	38
Tabla 8. Matriz de correlación entre características técnicas	39
Tabla 9. Ponderación técnica total	40
Tabla 10. Evaluación técnica de materiales reciclados.....	42
Tabla 11. Evaluación técnica de procesos de fabricación.....	44
Tabla 12. Composición de mezclas de materiales reciclados en proporción de peso.....	46
Tabla 13. Parámetros geométricos medidos en cada probeta	52
Tabla 14. Resultados de propiedades mecánicas promedio.....	58

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Recorte inicial de las probetas	48
Figura 2 Medición del espesor de las probetas	49
Figura 3 Probetas con geometría ASTM D638 para cada mezcla	50
Figura 4 Probetas marcadas para ensayo de tracción.....	51
Figura 5 Montaje experimental.....	54
Figura 6 Probetas fracturadas luego del ensayo.....	55
Figura 7 Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 1	56
Figura 8 Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 2	56
Figura 9 Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 3	57
Figura 10 Sección transversal de fractura.....	58

Resumen

Título: Selección y caracterización mecánica de un material compuesto para el diseño y la fabricación de paneles planos en un vehículo*

Autor: Martin Daniel Cañas Rueda**

Palabras Clave: Reciclaje de plásticos, Propiedades mecánicas, Industria automotriz

Descripción: El presente estudio evaluó la viabilidad técnica y económica del uso de materiales plásticos reciclados para la fabricación de paneles planos en vehículos, centrándose en la caracterización de mezclas de HDPE, LDPE y PP. A partir de residuos plásticos posconsumo, se realizaron procesos de limpieza, trituración y compactación térmica, obteniendo probetas de tres formulaciones diferentes. La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante ensayos de tracción bajo la normativa ASTM D638, permitiendo analizar parámetros como el módulo de elasticidad, resistencia última a la tracción (SUT) y elongación.

Los resultados indicaron que la Mezcla 1 (52% HDPE, 24% LDPE, 24% PP) presentó el mejor desempeño mecánico, con un módulo de elasticidad promedio de 1,36 GPa, SUT de 11,96 MPa y elongación de 1,77%, superando a las demás mezclas en términos de rigidez y resistencia. El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó diferencias significativas entre las mezclas, evidenciando la influencia de la composición en las propiedades mecánicas.

Desde el punto de vista económico, el costo del material reciclado resultó competitivo frente a materiales convencionales, y el análisis financiero basado en costos de producción y consumo energético mostró una tasa de retorno de inversión favorable. Estos hallazgos demuestran la factibilidad técnica y económica del uso de plásticos reciclados en componentes automotrices, resaltando la importancia de futuras investigaciones orientadas a optimizar procesos de fabricación y ampliar los ensayos mecánicos para consolidar su aplicación en la industria.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. Ph.D. Procesos termo fluido dinámicos aplicados a motores de combustión interna. Codirector: William Pinto Hernández. Doctor en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Selection and Mechanical Characterization of a Composite Material for the Design and Manufacturing of Flat Panels in a Vehicle*

Author(s): Martin Daniel Cañas Rueda**

Key Words: Polymer recycling, Mechanical properties, Automotive industry

Description: This study evaluated the technical and economic feasibility of using recycled plastic materials for manufacturing flat panels in vehicles, focusing on the characterization of HDPE, LDPE, and PP blends. Post-consumer plastic waste underwent cleaning, shredding, and thermal compaction processes, resulting in test specimens of three different formulations. Mechanical characterization was conducted through tensile tests following ASTM D638, allowing the analysis of parameters such as elastic modulus, ultimate tensile strength (UTS), and elongation.

The results indicated that Blend 1 (52% HDPE, 24% LDPE, 24% PP) exhibited the best mechanical performance, with an average elastic modulus of 1.36 GPa, UTS of 11.96 MPa, and elongation of 1.77%, surpassing the other formulations in terms of stiffness and strength. The statistical analysis using ANOVA confirmed significant differences between the blends, highlighting the influence of composition on mechanical properties.

From an economic perspective, the cost of recycled material proved competitive compared to conventional materials, and the financial analysis, based on production costs and energy consumption, showed a favorable return on investment. These findings demonstrate the technical and economic feasibility of using recycled plastics in automotive components, emphasizing the importance of future research aimed at optimizing manufacturing processes and expanding mechanical testing to strengthen its application in the industry.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacón Velasco, Ph.D. Procesos termo fluido dinámicos aplicados a motores de combustión interna. Co-director: William Pinto Hernández, Ph.D. in Mechanical Engineering.

Introducción

El diseño de vehículos más eficientes y sostenibles ha impulsado la búsqueda de materiales innovadores que permitan optimizar el rendimiento estructural y reducir el impacto ambiental. En este contexto, el desarrollo de materiales compuestos ofrece una solución viable al combinar alta resistencia y bajo peso, factores clave en la industria automotriz actual.

A pesar de las ventajas que presentan los materiales compuestos, su implementación en paneles estructurales sigue siendo limitada debido a desafíos técnicos, económicos y de producción. La necesidad de caracterizar estos materiales, junto con el diseño de métodos de fabricación eficientes, es fundamental para garantizar su integración en los procesos de manufactura automotriz. Además, estudios previos han mostrado cómo los materiales compuestos pueden reducir significativamente el peso de los componentes vehiculares, mejorando la eficiencia energética y disminuyendo las emisiones de carbono, pero aún existen barreras relacionadas con costos y métodos de producción que requieren ser abordadas.

La relevancia de este estudio radica en su impacto indirecto en el desarrollo de tecnologías sostenibles en la industria automotriz, promoviendo una reducción en el consumo de materiales vírgenes y fomentando el reciclaje. Por otro lado, en el campo académico, este trabajo aporta datos experimentales y metodologías que pueden ser replicadas en futuros estudios sobre materiales compuestos reciclados.

Desde un enfoque metodológico, este trabajo se basa en un análisis experimental que incluye ensayos de tracción bajo la normativa ASTM D638, así como un análisis técnico-económico para determinar la viabilidad de implementar estos materiales en un entorno industrial. La combinación de estas estrategias busca ofrecer soluciones prácticas y sostenibles que puedan ser adoptadas por la industria automotriz.

1. Planteamiento del problema

La creciente necesidad de reducir el impacto ambiental de la industria automotriz ha llevado a buscar materiales alternativos que sean sostenibles y funcionales. Actualmente, los materiales utilizados en la fabricación de paneles planos de vehículos, como el acero y los polímeros, presentan limitaciones significativas. Si bien el acero ofrece alta resistencia, su densidad incrementa el peso del vehículo, afectando directamente el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Por otro lado, los polímeros, no provenientes del reciclaje, tienen costos asociados elevados y su producción implica un alto consumo energético, lo que limita su sostenibilidad.

El reciclaje de materiales termoplásticos ha emergido como una alternativa prometedora para abordar estos desafíos. Los termoplásticos reciclados ofrecen una combinación favorable de resistencia mecánica, bajo peso y reducción de costos, pero su adopción enfrenta barreras, ya que, aunque se han realizado estudios sobre las propiedades de estos materiales, existen pocos trabajos que los evalúen específicamente en condiciones industriales automotrices. Según Oladele et al. (2023), el sector automotriz representa solo el 9% del uso total de termoplásticos reciclados, lo que evidencia una subutilización significativa de estos materiales en comparación con otras industrias como el empaque y la construcción. Adicionalmente, la ausencia de datos confiables sobre su comportamiento en procesos de fabricación establecidos y su viabilidad técnica-económica complica su implementación masiva.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar un análisis detallado de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos reciclados y evaluar su comportamiento en aplicaciones estructurales. Este análisis permitirá establecer si cumplen con las demandas técnicas de la industria automotriz, mientras se mantiene la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.

1.1 Pregunta de investigación

¿Cómo seleccionar y caracterizar un material compuesto de termoplástico reciclado que cumpla con las propiedades mecánicas necesarias para su uso en paneles planos de vehículos, considerando su viabilidad técnica y económica?

2. Justificación

La investigación propuesta tiene como objetivo generar conocimiento que permita cerrar la brecha en la implementación de termoplásticos reciclados en la industria automotriz, un sector que actualmente representa solo el 9% del uso total de estos materiales (Oladele et al., 2023). Este dato refleja una oportunidad significativa para incrementar la sostenibilidad en la fabricación de componentes automotrices, especialmente paneles planos, al reducir la dependencia de materiales vírgenes y disminuir el impacto ambiental asociado a su producción.

Desde un punto de vista técnico, el uso de materiales reciclados puede contribuir a la disminución del peso de los vehículos, mejorando su eficiencia energética y reduciendo las emisiones de CO₂. Además, los avances en procesos como el moldeo por inyección y la extrusión directa han demostrado que es posible mantener propiedades mecánicas competitivas en los termoplásticos reciclados, haciéndolos adecuados para aplicaciones estructurales (Johnson & Lee, 2019).

Socialmente, este proyecto tiene un impacto directo al fomentar el desarrollo de vehículos más accesibles y sostenibles, lo que beneficia tanto a consumidores como al medio ambiente. La promoción del reciclaje de materiales no solo reduce los desechos plásticos en vertederos, sino que también fortalece la economía circular, creando nuevas oportunidades en la cadena de suministro de materiales reciclados.

En el ámbito académico, esta investigación aporta datos experimentales valiosos sobre las propiedades de los termoplásticos reciclados en aplicaciones industriales, así como metodologías para evaluar su viabilidad técnica y económica. Estos resultados pueden servir como base para futuras investigaciones en el desarrollo de materiales sostenibles y su integración en procesos de fabricación automotriz.

Por último, la relevancia económica del proyecto radica en la posibilidad de reducir los costos asociados a la producción de paneles mediante la utilización de materiales reciclados, cuyo precio es significativamente inferior al de los polímeros no reciclados. Este enfoque, alineado con las normativas internacionales de sostenibilidad, posiciona al proyecto como una contribución clave hacia un sector automotriz más responsable y competitivo. Además, este trabajo forma parte de un proyecto de investigación avalado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), lo cual refuerza su pertinencia dentro de las políticas nacionales de desarrollo sostenible e impulso a la economía circular.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades mecánicas del material compuesto para implementar su uso en la fabricación de paneles planos de vehículos.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir un método de fabricación para el panel plano con una matriz QFD.
- Determinar las propiedades mecánicas del material variando los porcentajes de plástico mediante pruebas de tracción utilizando la norma ASTM D638.
- Realizar un análisis técnico-económico para evaluar la viabilidad del proyecto de investigación.

4. Marco teórico

4.1 Antecedentes

El uso de materiales reciclados en la industria automotriz ha ganado atención en los últimos años debido a sus beneficios ambientales y económicos. Un ejemplo destacado es Ford Motor Company, que ha integrado plásticos reciclados en la fabricación de autopartes desde 1990. Actualmente, Ford utiliza 1.2 mil millones de botellas de plástico al año, lo que equivale a aproximadamente 250 botellas recicladas por vehículo. Estos materiales reciclados se emplean en componentes como revestimientos inferiores de la carrocería, tolvas delanteras y traseras, y arcos de rueda, contribuyendo a mejorar la aerodinámica, reducir el ruido en cabina y disminuir el peso del vehículo (Ford Motor Company, 2019).

Ford destaca que el uso de plásticos reciclados ofrece ventajas significativas frente a materiales sólidos tradicionales. Por ejemplo, las coberturas inferiores fabricadas con plástico reciclado pesan hasta tres veces menos que sus contrapartes sólidas, lo que contribuye a la eficiencia energética y reduce el impacto ambiental. Además, el proceso incluye la trituración de botellas plásticas, su transformación en fibras, y la posterior combinación con otros materiales para fabricar hojas de material plástico que se utilizan en las autopartes de vehículos como el Ford Escape 2020.

Desde el punto de vista ambiental, esta práctica ayuda a reducir significativamente la cantidad de plásticos que terminan en ríos, mares y océanos, promoviendo un modelo de economía circular. Según declaraciones de ingenieros de Ford, el material reciclado utilizado no solo cumple

con los estándares técnicos y funcionales, sino que también aporta valor agregado al medio ambiente y al proceso de manufactura (Ford Motor Company, 2019).

Estas iniciativas demuestran cómo las grandes compañías automotrices están liderando el camino hacia la sostenibilidad, utilizando materiales reciclados para fabricar componentes de alta calidad y funcionalidad, mientras reducen su huella ecológica.

Más allá de Ford, otras compañías automotrices también han adoptado el uso de materiales reciclados en sus vehículos. Según Alcántara (2022), Faurecia y Veolia han establecido alianzas estratégicas para desarrollar plásticos reciclados destinados a interiores automotrices, incluyendo paneles de instrumentos, paneles de puertas y consolas. Estas iniciativas buscan alcanzar un promedio de 30% de contenido reciclado en 2025, lo que refleja un compromiso creciente por parte de los fabricantes hacia la economía circular.

La japonesa Toyota también ha demostrado un enfoque innovador al desarrollar el Toyota Super Olefin Polymer (TSOP), un plástico reciclable utilizado en parachoques y otras piezas automotrices. Además, su plan ambiental para 2025 incluye incrementar el uso de materiales reciclados en Europa y Japón. Renault, por su parte, utiliza 52,000 toneladas de plástico reciclado anualmente y ha implementado un sistema de ciclo cerrado para recuperar parachoques y revestimientos de llantas, transformándolos en materiales reutilizables para nuevas autopartes.

Este compromiso no solo se limita a los fabricantes tradicionales, sino que también incluye marcas como Nissan, que utiliza plásticos reciclados para asientos, reposabrazos y parachoques en

modelos eléctricos como el Nissan Leaf. Alcántara (2022) destaca que entre el 18 y 20% de los plásticos utilizados en interiores de vehículos contienen material reciclado, lo que indica un progreso significativo en la industria.

Sin embargo, los desafíos técnicos permanecen, particularmente en la necesidad de mantener la calidad y el rendimiento de los plásticos reciclados. Ernesto Hernández, del Laboratorio Nacional de Materiales Ligeros para el Sector Automotriz (Laniauto), señala que las propiedades de los materiales reciclados tienden a disminuir con cada ciclo de reprocesamiento. Esto ha llevado a la industria a desarrollar estrategias como el uso de aditivos y nuevas formulaciones para mejorar la calidad y ampliar las aplicaciones de los plásticos reciclados en vehículos (Alcántara, 2022).

Estas iniciativas consolidan el rol esencial de los plásticos reciclados como pilar en la transformación hacia una industria automotriz más sostenible. Su integración no solo responde a las demandas ambientales actuales, sino que también impulsa la innovación en materiales y procesos, garantizando un equilibrio entre funcionalidad, estética y respeto por el medio ambiente, aspectos fundamentales para la movilidad del futuro.

4.2 Polímeros

Los polímeros son materiales conformados por macromoléculas compuestas de repeticiones de unidades monoméricas, unidas por enlaces covalentes. Se clasifican en polímeros naturales, como la celulosa y el almidón, y polímeros sintéticos, que incluyen materiales como el

polietileno (PE), polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC). Estos últimos se obtienen a partir de procesos de polimerización de monómeros derivados de hidrocarburos (Callister, 2018).

Los polímeros pueden dividirse en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos son materiales que pueden ser fundidos y reformados repetidamente, lo que los hace ideales para reciclaje y procesos de manufactura de alta eficiencia. Ejemplos de termoplásticos son el PP, PE, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y policarbonato (PC). En contraste, los termoestables no pueden ser reformados una vez curados, lo que limita su reciclabilidad y aplicación en procesos de manufactura sostenible (Callister, 2018).

4.2.1 Clasificación de los polímeros

Los polímeros pueden clasificarse en función de diferentes criterios, entre ellos su estructura química, configuración molecular y comportamiento térmico (Callister, 2018).

Según su estructura química:

- Homopolímeros: Formados por un solo tipo de monómero, como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP).
- Copolímeros: Compuestos por más de un tipo de monómero, como el acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) y los poliésteres.
- Según su configuración molecular:
 - Polímeros lineales: Poseen cadenas largas sin ramificaciones significativas, lo que permite un empaquetamiento más compacto y mayor densidad.
 - Polímeros ramificados: Presentan cadenas laterales que reducen la densidad y afectan sus propiedades mecánicas.

- Polímeros entrecruzados: Sus cadenas están conectadas a través de enlaces covalentes, aumentando su resistencia mecánica y estabilidad térmica.
- Polímeros reticulados: Forman estructuras tridimensionales rígidas, lo que los hace termoestables y resistentes a altas temperaturas (Callister, 2018).

Según su comportamiento térmico:

- Termoplásticos: Se ablandan al calentarse y pueden reformarse múltiples veces sin degradación significativa, como el PE, PP y ABS.
- Termoestables: Una vez que han sido moldeados y curados, no pueden volver a fundirse sin descomposición química, como las resinas epoxi y fenólicas (Callister, 2018).

4.2.2 Polietileno: HDPE y LDPE

El polietileno (PE) es uno de los polímeros más utilizados a nivel industrial debido a su bajo costo, facilidad de procesamiento y propiedades versátiles. Existen diversas variantes de polietileno, pero dos de las más relevantes para aplicaciones automotrices son el polietileno de alta densidad (HDPE) y el polietileno de baja densidad (LDPE) (Callister, 2018).

Polietileno de alta densidad (HDPE):

- Posee una estructura molecular lineal con muy pocas ramificaciones, lo que le confiere una mayor densidad ($\sim 0.95\text{-}0.97\text{ g/cm}^3$).
- Tiene alta resistencia química, mecánica y térmica, siendo utilizado en la fabricación de componentes estructurales y depósitos de fluidos.
- Es reciclable y compatible con procesos de extrusión y moldeo por inyección (Callister, 2018).

Polietileno de baja densidad (LDPE):

- Presenta una estructura altamente ramificada, lo que le otorga menor densidad (~0.91-0.93 g/cm³) y mayor flexibilidad.
- Es resistente al impacto y presenta buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico.
- Se utiliza en recubrimientos internos, empaques y aislantes dentro de la industria automotriz (Callister, 2018).

4.2.3 Polipropileno (PP)

El polipropileno (PP) es otro de los termoplásticos más empleados en aplicaciones industriales y automotrices debido a su combinación de bajo peso, resistencia mecánica y estabilidad térmica (Callister, 2018).

- Su estructura química está compuesta por cadenas de monómeros de propileno, con una configuración isotáctica en la mayoría de sus aplicaciones industriales.
- Posee una densidad de aproximadamente 0.90-0.91 g/cm³, lo que lo convierte en uno de los plásticos más ligeros de uso industrial.
- Destaca por su alta resistencia a la fatiga, buena estabilidad química y facilidad de procesamiento mediante inyección y extrusión.
- En la industria automotriz, se utiliza para fabricar parachoques, paneles interiores, revestimientos de puertas y componentes de tableros de instrumentos.
- Es completamente reciclable, lo que lo convierte en una opción atractiva para el desarrollo de materiales sostenibles en vehículos modernos (Callister, 2018).

- El HDPE, LDPE y PP son ampliamente utilizados en la fabricación de autopartes debido a su resistencia a la corrosión, facilidad de reciclaje y bajo peso, características clave para la reducción del consumo energético en vehículos modernos (Callister, 2018).

4.3 Reciclaje de termoplásticos: Procesos y aplicaciones

El mercado global de plásticos reciclados ha experimentado un crecimiento significativo en la última década, impulsado por la creciente demanda de materiales sostenibles y la regulación ambiental más estricta. Se estima que la producción mundial de polímeros ha crecido un 37%, lo que equivale a un aumento de aproximadamente 100 millones de toneladas métricas de materiales poliméricos. En términos económicos, en 2020, el mercado mundial del plástico tenía un valor de 579.7 mil millones de dólares y se proyecta que alcance 750.1 mil millones de dólares en 2028, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 3.4% entre 2021 y 2028 (Tiseo, 2021).

Este crecimiento ha sido impulsado por avances tecnológicos en los procesos de reciclaje y el desarrollo de nuevos materiales con contenido reciclado. Según Formela et al. (2022), las innovaciones en polímeros reciclados han permitido la producción de materiales con propiedades mejoradas, lo que ha facilitado su adopción en sectores como la automoción, la construcción y el embalaje sostenible. Además, Oladele et al. (2020) destacan que el desarrollo de compuestos plásticos reciclados refuerza la economía circular al reducir la dependencia de materias primas vírgenes.

Sin embargo, a pesar de este crecimiento, aún existen desafíos significativos en la implementación del reciclaje a gran escala, como la viabilidad económica del reciclaje químico y

mecánico, la calidad del material reciclado y la infraestructura necesaria para la recolección y procesamiento de plásticos posconsumo (Grigore, 2017). Abordar estas barreras es esencial para maximizar el impacto positivo del reciclaje de termoplásticos en la reducción de residuos plásticos y la conservación de recursos naturales.

El reciclaje de termoplásticos se ha convertido en una estrategia clave para mitigar los impactos ambientales derivados del uso masivo de polímeros en la industria. Dado que los termoplásticos pueden ser fundidos y reprocesados sin una degradación significativa de sus propiedades, su reciclaje ofrece oportunidades para reducir la contaminación y promover una economía circular. A continuación, se presentan los principales métodos de reciclaje de termoplásticos y sus aplicaciones.

4.3.1 Reciclaje mecánico

Este proceso implica la recolección, clasificación, trituración y reprocesamiento de los residuos plásticos sin alterar su estructura química. Es el método más extendido y permite la producción de nuevos productos a partir de polímeros reciclados. Sin embargo, la contaminación y la degradación del material pueden limitar su reutilización en aplicaciones exigentes (Oladele et al., 2023).

4.3.2 Reciclaje químico

A diferencia del reciclaje mecánico, este proceso descompone los polímeros en sus monómeros originales mediante pirólisis, gasificación o procesos de despolimerización. De esta forma, los materiales reciclados pueden ser utilizados para sintetizar nuevos plásticos con propiedades comparables a las de los polímeros vírgenes. Este método es especialmente prometedor para el

reciclaje de plásticos de difícil recuperación, como los residuos mixtos o contaminados (Oladele et al., 2023; Grigore, 2017).

4.3.3 Reciclaje energético

Cuando los plásticos no pueden ser reciclados mecánica o químicamente, se pueden aprovechar como fuente de energía mediante su incineración en plantas diseñadas para recuperar calor y generar electricidad. Aunque esta técnica reduce la acumulación de desechos, genera emisiones de CO₂ y otros contaminantes, lo que limita su aplicación a contextos donde no es viable el reciclaje material (Kazemi-Najafi, 2013).

4.3.4 Aplicaciones del reciclaje de termoplásticos

Los plásticos reciclados se están utilizando en diversas aplicaciones, incluyendo:

- **Construcción:** producción de ladrillos, paneles aislantes y elementos estructurales con materiales reciclados que reemplazan parcialmente a los agregados convencionales (Miyahara, Fábio & Ezequiel, 2018).
- **Industria automotriz:** fabricación de piezas no estructurales, como paneles interiores y parachoques, con polímeros reciclados de alta resistencia (Oladele et al., 2020).
- **Embalajes sostenibles:** desarrollo de envases con contenido reciclado y materiales biodegradables para reducir la contaminación por residuos plásticos (Formela, Kurańska & Barczewski, 2022).
- **Ropa y textiles:** reciclaje de botellas PET para la producción de fibras sintéticas utilizadas en ropa deportiva y tapicería.

El reciclaje de termoplásticos representa una alternativa viable y sostenible para reducir el impacto ambiental del plástico, promoviendo su reutilización en aplicaciones industriales y comerciales. La mejora en tecnologías de reciclaje y el desarrollo de políticas de manejo de residuos pueden potenciar su integración en una economía circular eficiente.

4.4 Introducción a los sistemas automotrices

Un automóvil moderno está compuesto por una amplia variedad de sistemas diseñados para garantizar funcionalidad, seguridad, confort y eficiencia. Estos sistemas incluyen estructuras clave como el chasis, el bastidor y la carrocería, así como sistemas funcionales auxiliares. Comprender su composición y los materiales utilizados en su fabricación es esencial para evaluar las posibilidades de integración de nuevos materiales, como termoplásticos reciclados, en aplicaciones específicas.

Chasis y Bastidor

El chasis es el armazón que sostiene todos los componentes principales del vehículo, desde el motor hasta los sistemas de transmisión. Fabricado tradicionalmente con acero de alta resistencia, ofrece una combinación de rigidez y capacidad de absorción de impactos. Por su parte, el bastidor conecta el chasis con la carrocería y puede clasificarse como monocasco o autoportante. Según informes técnicos, las estructuras monocasco combinan chasis y carrocería en una sola unidad, optimizando peso y rigidez estructural.

Los materiales utilizados en estas estructuras incluyen principalmente acero y aluminio. El acero, con resistencias a la tracción que oscilan entre 400 y 800 MPa, es ideal para soportar cargas

elevadas y resistir deformaciones. Por otro lado, el aluminio, con una densidad de 2.7 g/cm^3 , proporciona una solución más ligera, utilizada en componentes como puertas y techos. Estas características son fundamentales para garantizar la seguridad y el rendimiento del vehículo.

Carrocería

La carrocería del vehículo tiene dos funciones principales: proteger a los ocupantes y proporcionar una estética atractiva. Se divide en:

- **Latonería:** Incluye componentes exteriores como puertas, techos y capós. Estas piezas suelen fabricarse con acero o aluminio debido a sus demandas de resistencia mecánica y propiedades de absorción de energía en colisiones.
- **Tapicería y accesorios:** Incluye componentes interiores como paneles de puertas, techos interiores y consolas. Estos suelen fabricarse con plásticos como polipropileno (PP) y poliuretano (PU) por su ligereza y facilidad de moldeo.

La carrocería también integra elementos funcionales como molduras exteriores, que combinan propiedades estéticas y aerodinámicas. La introducción de materiales reciclados en estas aplicaciones no estructurales ha mostrado un potencial significativo, según diversos estudios.

4.5 Materiales termoplásticos en sistemas automotrices

Los termoplásticos, como el PP, HDPE y LDPE, han ganado relevancia en la industria automotriz debido a sus propiedades únicas, como baja densidad, resistencia al impacto y

reciclabilidad. Estos materiales presentan aplicaciones específicas en diferentes partes del vehículo:

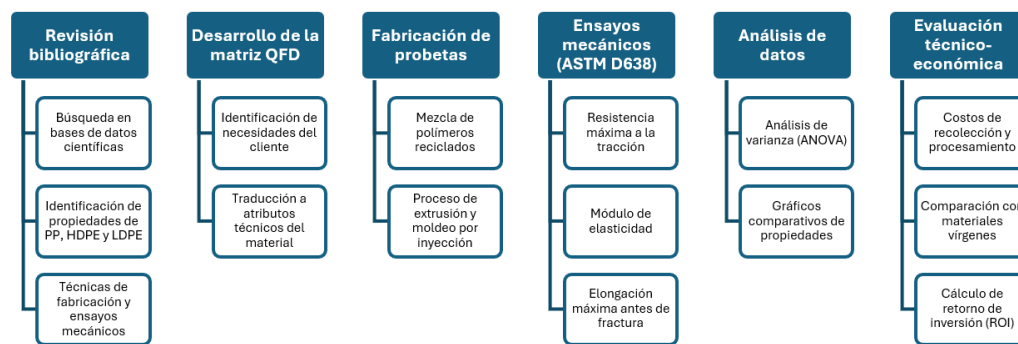
- Polipropileno (PP): Utilizado en paneles de puertas, consolas centrales y parachoques. Con una densidad de 0.9 g/cm^3 y resistencia a la tracción de hasta 40 MPa, ofrece un equilibrio entre rigidez y flexibilidad.
- Polietileno de alta densidad (HDPE): Empleado en depósitos de combustible y tuberías, gracias a su resistencia química y durabilidad en condiciones adversas.
- Polietileno de baja densidad (LDPE): Utilizado en recubrimientos y componentes interiores que requieren flexibilidad.

5. Metodología

La metodología empleada en este proyecto se diseñó para abordar de manera integral la selección, caracterización y análisis técnico-económico de un material compuesto reciclado destinado a la fabricación de paneles planos en vehículos. A continuación, se describe cada etapa desarrollada durante el proyecto, y en la figura 1 se muestra un esquema de las etapas.

Figura 1

Fases metodológicas



5.1 Revisión Bibliográfica

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica utilizando bases de datos científicas como Scopus, Web of Science y Google Scholar, con términos clave como "materiales reciclados en la industria automotriz", "propiedades mecánicas de termoplásticos reciclados", y "análisis técnico-económico de materiales reciclados". Esta etapa permitió identificar las propiedades relevantes de los materiales seleccionados (PP, HDPE, LDPE) y recopilar información sobre técnicas de fabricación y ensayos mecánicos.

5.2 Desarrollo de la Matriz QFD

La matriz QFD (Quality Function Deployment) se utilizó como herramienta para traducir las necesidades del cliente y los requisitos técnicos en especificaciones concretas para el diseño del material compuesto. Esta etapa involucró:

5.2.1 Identificación de las necesidades del cliente:

- Reducción del peso del material para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental.
- Sostenibilidad, priorizando el uso de materiales reciclados y minimizando el desperdicio en el proceso de producción.
- Resistencia mecánica adecuada para garantizar la funcionalidad y durabilidad del componente en condiciones reales de operación.
- Estética aceptable para cumplir con los estándares visuales requeridos en aplicaciones automotrices.
- Costos competitivos que permitan justificar la transición desde materiales vírgenes a reciclados.

5.2.2 Traducción de estas necesidades en atributos técnicos:

- Densidad óptima para asegurar la reducción de peso sin comprometer la resistencia.
- Resistencia a la tracción adecuada para cumplir con las exigencias de carga y esfuerzo en uso automotriz.
- Módulo de elasticidad que permita tolerancia a deformaciones sin fractura.
- Procesabilidad del material durante el moldeo y la manufactura, asegurando consistencia y calidad en la producción.

- Estabilidad térmica y química para resistir las condiciones operativas y ambientales.

5.3 Fabricación de las Probetas

Con base en las especificaciones para la norma de ensayos mecánicos, se fabricaron probetas de material compuesto utilizando un proceso de extrusión y moldeo por inyección. El material compuesto consistió en una mezcla reciclada del PP con diferentes proporciones de HDPE y LDPE.

5.4 Ensayos Mecánicos: Prueba de Tracción

Las probetas fabricadas fueron sometidas a ensayos de tracción según la norma ASTM D638 para determinar propiedades como:

- Resistencia máxima a la tracción (MPa).
- Módulo de elasticidad (GPa).
- Elongación máxima (%) antes de la fractura.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal de pruebas, y los resultados obtenidos se utilizaron para comparar el desempeño de los materiales reciclados frente a referencias de materiales vírgenes y requisitos del diseño automotriz.

5.5 Análisis de Datos

Los datos obtenidos en los ensayos mecánicos fueron analizados estadísticamente para identificar tendencias y relaciones entre las propiedades del material y las proporciones de los termoplásticos utilizados. Este análisis incluyó:

- Análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los factores de mezcla.

- Gráficos comparativos que mostraban las propiedades mecánicas en función de las proporciones de material reciclado.

5.6 Evaluación Técnico-Económica

Se llevó a cabo un análisis técnico-económico para evaluar la viabilidad de implementar el material compuesto reciclado en aplicaciones automotrices. Este análisis consideró:

- Costos de recolección, procesamiento y fabricación del material reciclado, incluyendo gastos asociados con la logística de transporte, limpieza y preparación del material.
- Comparación de costos entre materiales reciclados y vírgenes, considerando el precio por kilogramo, costos de transformación y requerimientos de maquinaria.
- Evaluación de la rentabilidad basada en el retorno de inversión (ROI), calculando el ahorro obtenido por la reducción en el uso de materiales vírgenes y el impacto positivo en costos operativos.

6. Resultados

6.1 Construcción de la matriz QFD para la selección del método de fabricación del panel plano

Con el objetivo de definir el método de fabricación más adecuado para un panel plano elaborado con material reciclado, se aplicó la herramienta de ingeniería de la calidad QFD (Quality Function Deployment). Esta metodología permite traducir las necesidades del cliente en parámetros técnicos evaluables, facilitando la toma de decisiones mediante una matriz estructurada conocida como Casa de la Calidad.

Para establecer la ponderación de las necesidades, se utilizó el método AHP (Analytic Hierarchy Process), el cual proporciona una forma sistemática de comparar criterios cualitativos mediante juicios por pares. De esta manera, se obtuvo una jerarquización objetiva de las prioridades del cliente, que fue incorporada a la matriz QFD para evaluar distintos métodos de fabricación.

6.1.1 Identificación de necesidades del cliente

En el contexto del desarrollo del panel plano para aplicación automotriz, se definieron cinco necesidades clave que el proceso de fabricación debe cumplir:

- **Alta resistencia mecánica:** El panel debe mantener su rigidez estructural durante el uso.
- **Bajo costo:** El proceso debe ser económicamente viable tanto en maquinaria como en consumo energético.

- **Facilidad de fabricación:** El método debe ser eficiente y compatible con el tipo de material reciclado.
- **Uso de material reciclado:** Debe promover la reutilización de plásticos posconsumo.
- **Buena apariencia superficial:** El panel debe cumplir criterios estéticos y uniformidad superficial.

6.1.2 Asignación de pesos mediante el método AHP

Con el fin de jerarquizar las necesidades anteriores, se empleó el método AHP, el cual consiste en realizar comparaciones por pares entre criterios, basándose en la escala de Saaty que asigna valores entre 1 y 9 según el nivel de importancia relativa entre los factores evaluados.

Tabla 1

Escala fundamental de Saaty

Valor	Interpretación
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Importancia fuerte
7	Importancia muy fuerte
9	Importancia extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermedios
1/x	Si el criterio i es menos importante que j

Con base en este enfoque, se construyó la siguiente matriz de comparación por pares:

Tabla 2

Matriz comparativa AHP entre necesidades del cliente

Necesidades cliente	Resistencia	Costo	Fabricación	Reciclado	Apariencia
Resistencia	1	3	2	3	4
Costo	1/3	1	2	2	3
Fabricación	1/2	1/2	1	2	2
Reciclado	1/3	1/2	1/2	1	2
Apariencia	1/4	1/3	1/2	1/2	1

La matriz fue normalizada dividiendo cada valor por la suma total de su columna correspondiente. A partir de allí, se obtuvo el vector de prioridades (pesos) como el promedio de cada fila normalizada, como se evidencia en las tablas 3 y 4.

Tabla 3

Matriz normalizada del método AHP

Necesidades cliente	Resistencia	Costo	Fabricación	Reciclado	Apariencia
Resistencia	0,415	0,478	0,324	0,353	0,324
Costo	0,137	0,159	0,324	0,235	0,243
Fabricación	0,207	0,080	0,162	0,235	0,162
Reciclado	0,137	0,080	0,081	0,118	0,162
Apariencia	0,104	0,053	0,081	0,059	0,081
Suma columna	2,410	6,270	6,180	8,490	12,360

Tabla 4

Vector de prioridades (pesos relativos de las necesidades)

Necesidad del Cliente	Peso (valor)	Peso (%)
Alta resistencia mecánica	0.379	33
Bajo costo	0.220	22
Facilidad de fabricación	0.169	17
Uso de material reciclado	0.120	15
Buena apariencia superficial	0.106	12

Estos pesos serán utilizados en la matriz QFD como coeficientes de ponderación de cada requerimiento del cliente al momento de evaluar distintas tecnologías de fabricación del panel plano.

6.1.3 Identificación de características técnicas del proceso (“CÓMO”)

Con base en el objetivo de este estudio, que consiste en definir un método de fabricación para un panel plano con material reciclado, se identificaron las características técnicas clave que permiten evaluar y comparar diferentes procesos productivos. Estas características, denominadas “cómo” dentro de la metodología QFD, representan atributos generales del proceso de fabricación, sin hacer alusión a tecnologías específicas como inyección, extrusión o termoformado.

El conjunto de “cómo” propuesto busca cubrir aspectos operativos, energéticos, de control y sostenibilidad, manteniendo un enfoque neutral, técnico y aplicable a cualquier alternativa. Además, cada característica puede tener relación con una o más necesidades del cliente (los “qué”), por lo que no existe una correspondencia uno a uno.

En la Tabla 5 se presenta el conjunto final de características seleccionadas, junto con una breve descripción para facilitar su interpretación dentro de la matriz QFD.

Tabla 5

Características técnicas del proceso consideradas en la matriz QFD

Nº	Característica técnica ("CÓMO")	Descripción breve
C1	Costo del proceso	Costos operativos estimados por unidad fabricada.
C2	Tiempo del proceso	Rapidez con la que se puede producir cada unidad.
C3	Facilidad de operación	Simplicidad en el manejo, ajuste y monitoreo del proceso.
C4	Consumo de energía	Energía eléctrica o térmica necesaria por ciclo de producción.
C5	Precisión del proceso	Capacidad del método para mantener dimensiones constantes.
C6	Repetibilidad	Estabilidad del proceso en ciclos sucesivos sin alterar resultados.
C7	Flexibilidad del proceso	Capacidad de adaptarse a cambios de diseño o condiciones.
C8	Calidad visual obtenida	Apariencia de la pieza inmediatamente después del proceso.
C9	Sostenibilidad operativa	Nivel de generación de residuos y condiciones seguras de trabajo.
C10	Integración con reciclaje	Posibilidad de incorporar materiales reciclados sin afectar calidad.

Estas características serán evaluadas frente a las necesidades del cliente mediante la matriz de correlación QFD, la cual se desarrollará en la siguiente sección.

6.1.4 Matriz de correlación entre necesidades del cliente y características del proceso

Una vez definidas las necesidades del cliente ("qué") y las características técnicas generales del proceso de fabricación ("cómo"), se construyó la matriz de correlación de la metodología QFD, también conocida como Casa de la Calidad. Esta matriz permite visualizar la

influencia relativa de cada característica técnica sobre los requerimientos del cliente, facilitando una evaluación objetiva y estructurada de las alternativas de fabricación.

Para asignar el nivel de relación entre cada par “qué–cómo”, se utilizó la escala de valoración presentada en la Tabla 6

Tabla 6

Escala de valoración para la matriz QFD

Tipo de relación	Valor numérico
Relación fuerte	9
Relación moderada	3
Relación débil	1

Las relaciones fueron establecidas con base en criterios técnicos de manufactura, literatura especializada y juicio experto. En la siguiente tabla se muestra la matriz QFD completa, en la que se cruzan las cinco necesidades del cliente con las diez características técnicas del proceso productivo previamente definidas.

Tabla 7

Matriz de correlación QFD entre necesidades del cliente y características del proceso

Necesidades del cliente	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1. Alta resistencia mecánica	3	1	1	3	9	9	3	1	3	1
2. Bajo costo	9	9	3	9	1	3	3	1	3	1
3. Facilidad de fabricación	3	9	9	3	3	3	9	3	3	3
4. Uso de material reciclado	1	1	1	3	1	1	3	1	3	9
5. Buena apariencia superficial	1	3	3	1	9	3	1	9	1	1

Una vez establecida la matriz QFD y la relación entre cada “qué” (necesidad del cliente) y cada “cómo” (característica técnica del proceso), se procedió a calcular el peso técnico total de cada “cómo”. Este cálculo se realiza multiplicando cada valor asignado en la matriz de correlación (Tabla 7) por el peso relativo de cada necesidad del cliente obtenido previamente mediante el método AHP (Tabla 3).

La suma ponderada de cada columna representa la importancia relativa total de cada característica técnica dentro del contexto del diseño del proceso. Para realizar este procedimiento de forma estructurada, se utilizó una plantilla de cálculo desarrollada en Excel, la cual se presenta en el Apéndice A.

A partir de dicha plantilla, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9

Ponderación técnica total

Característica técnica	Porcentaje (%)
C1. Costo del proceso	10,20%
C2. Tiempo del proceso	12,10%
C3. Facilidad de operación	8,40%
C4. Consumo de energía	11,10%
C5. Precisión del proceso	13,40%
C6. Repetibilidad	12,60%
C7. Flexibilidad del proceso	10,40%
C8. Calidad visual obtenida	6,20%
C9. Sostenibilidad operativa	7,50%
C10. Integración con reciclaje	6,90%

6.1.6 Evaluación técnica de alternativas de materiales y procesos de fabricación

Con el fin de determinar la combinación más adecuada entre material reciclado y proceso de manufactura para la fabricación de un panel plano, se desarrolló una evaluación técnica basada en los criterios previamente establecidos mediante la metodología QFD. Los diez criterios técnicos definidos en la sección 6.1.3 fueron ponderados con base en el análisis AHP y aplicados a cada alternativa tanto de material como de proceso.

La evaluación se llevó a cabo mediante una plantilla computacional (ver **Apéndice A**) que permitió asignar puntuaciones individuales por criterio, multiplicarlas por su respectiva ponderación técnica y obtener así un valor técnico total por alternativa. Este enfoque asegura coherencia metodológica con el desarrollo anterior y permite una selección objetiva fundamentada en desempeño técnico integral.

6.1.6.1 Evaluación técnica de alternativas de materiales

Las alternativas de materiales evaluadas se seleccionaron por su potencial de aprovechamiento como plásticos reciclados disponibles en el mercado y su capacidad para cumplir con requisitos funcionales, térmicos, mecánicos y económicos asociados al panel plano. Se incluyeron materiales individuales y mezclas, dadas sus ventajas combinadas en resistencia, flexibilidad, compatibilidad y sostenibilidad.

Las opciones analizadas fueron:

- **Polipropileno (PP) reciclado:** bajo costo, buena procesabilidad, resistencia moderada.
- **Polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado:** alta rigidez y resistencia química.
- **Polietileno de baja densidad (LDPE) reciclado:** buena flexibilidad, pero baja rigidez.
- **Mezcla PP + HDPE:** equilibrio entre rigidez y resistencia térmica.
- **Mezcla PP + HDPE + LDPE:** mejor balance global entre resistencia, flexibilidad, estabilidad térmica y procesabilidad.

Cada una fue evaluada según su desempeño frente a los diez criterios técnicos ponderados, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10

Evaluación técnica de materiales reciclados

Criterio técnico	Peso (%)	PP	HDPE	LDPE	PP + HDPE	PP + HDPE + LDPE
C1. Costo del proceso	10,3	5	4	4	4	4
C2. Tiempo del proceso	12,2	4	3	3	4	4
C3. Facilidad operativa	8,5	4	3	4	4	5
C4. Consumo energético	11,2	4	3	3	4	5
C5. Precisión del proceso	13,6	3	4	2	4	5
C6. Repetibilidad	12,8	3	4	2	4	5
C7. Flexibilidad del proceso	10,5	2	3	5	4	5
C8. Calidad visual obtenida	6,3	3	3	2	4	5
C9. Sostenibilidad operativa	7,6	4	3	4	4	5
C10. Compatibilidad reciclaje	7	4	3	4	5	5
Total ponderado	1	358,1	360,4	313,4	402,8	453,6

La alternativa con mayor puntaje fue la mezcla PP + HDPE + LDPE, con un total ponderado de 453,6 puntos, superando tanto a materiales individuales como a la mezcla binaria. Su excelente comportamiento en repetibilidad, precisión, facilidad de operación y sostenibilidad, junto con una buena compatibilidad con reciclaje, la posicionan como la opción más equilibrada y técnicamente favorable para el diseño del panel.

6.1.6.2 Evaluación técnica de procesos de fabricación

Para complementar el análisis, se evaluaron cinco procesos de fabricación aplicables a paneles planos reciclados. La selección de procesos se fundamentó en su disponibilidad industrial, nivel de madurez tecnológica y viabilidad para trabajar con materiales reciclados.

Los métodos evaluados fueron:

- **Moldeo por inyección:** alta precisión, repetibilidad, ideal para geometrías complejas.
- **Extrusión:** alta velocidad, bajo costo, limitada flexibilidad geométrica.
- **Compresión en caliente:** adecuada para formas simples con materiales reforzados.
- **Termoformado:** bajo costo, útil en piezas de gran tamaño y baja complejidad.
- **Impresión 3D:** adaptable, pero limitada a baja producción y alto costo unitario.

Cada uno fue evaluado frente a los mismos criterios técnicos ponderados. La Tabla 11 presenta los resultados consolidados.

Tabla 11*Evaluación técnica de procesos de fabricación*

Criterio técnico	Peso (%)	Inyección	Extrusión	Compresión	Termoformado	Impresión 3D
C1. Costo del proceso	10,3	3	5	4	5	2
C2. Tiempo del proceso	12,2	4	5	3	4	1
C3. Facilidad operativa	8,5	4	3	3	4	2
C4. Consumo energético	11,2	4	4	3	4	2
C5. Precisión del proceso	13,6	5	3	3	3	4
C6. Repetibilidad	12,8	5	3	3	2	3
C7. Flexibilidad del proceso	10,5	4	2	3	3	5
C8. Calidad visual obtenida	6,3	5	3	2	2	4
C9. Sostenibilidad operativa	7,6	4	3	4	3	2
C10. Compatibilidad reciclaje	7	5	3	4	3	4
Total ponderado	100%	422,6	390,5	356,2	366,4	340

El moldeo por inyección alcanzó el mayor puntaje (422,6 puntos) al sobresalir en precisión, repetibilidad, calidad visual y compatibilidad con el uso de materiales reciclados. Aunque presenta un costo inicial más alto, este se compensa con su desempeño técnico global.

La evaluación técnica integrada permite concluir que la combinación de material reciclado PP + HDPE + LDPE y el proceso de moldeo por inyección constituye la alternativa óptima para la fabricación del panel plano, al lograr el mejor equilibrio entre desempeño técnico,

sostenibilidad, facilidad operativa y calidad final del producto. Esta elección está alineada con las prioridades del cliente y se sustenta en una metodología estructurada, trazable y validada.

6.2 Proceso de obtención y fabricación de probetas

Con base en los resultados de la matriz QFD, se definieron tres mezclas de materiales reciclados para la fabricación de probetas, compuestas por diferentes proporciones de HDPE, LDPE y PP. La materia prima utilizada en el proceso provino de residuos plásticos posconsumo, los cuales fueron sometidos a un proceso de reciclaje que incluyó limpieza, trituración y homogenización.

6.2.1 Preparación de los materiales reciclados

El material reciclado se obtuvo mediante un proceso de recolección y selección de plásticos posconsumo. Posteriormente, se sometió a una etapa de limpieza para la eliminación de contaminantes como adhesivos, etiquetas y residuos orgánicos. Luego, los plásticos fueron triturados mecánicamente hasta obtener partículas de tamaño homogéneo, lo que facilitó su posterior procesamiento. En la siguiente figura se puede observar el material triturado, previo al proceso en la extrusora.

Figura 2*Material triturado*

Las mezclas definidas para la fabricación de las probetas se presentan en la Tabla 12, en proporción de peso

Tabla 12*Composición de mezclas de materiales reciclados en proporción de peso*

Mezcla	HDPE (kg)	LDPE (kg)	PP (kg)	Proporción (%)
Mezcla 1	13	6	6	52% - 24% - 24%
Mezcla 2	8	9	8	32% - 36% - 32%
Mezcla 3	4	10	11	16% - 40% - 44%

6.2.2 Fabricación de probetas

Para la obtención de las probetas, el material triturado fue sometido a un proceso de compactación y moldeo térmico. En esta etapa, se utilizaron prensas de compresión con temperatura controlada para fundir y consolidar el material, logrando la conformación de placas homogéneas.

Compactación y moldeo térmico

- Se calentó la mezcla a temperaturas entre 180 y 220 °C, dependiendo de la proporción de cada polímero en la mezcla.
- Se aplicó una presión constante para garantizar la adecuada fusión e integración de los polímeros reciclados.
- El material fue enfriado de manera controlada para evitar deformaciones y mejorar sus propiedades mecánicas.

Corte y mecanizado de probetas

Una vez obtenidas las placas, se procedió al corte de las probetas siguiendo las dimensiones establecidas por la norma ASTM D638 para ensayos de tracción. Los detalles de las probetas obtenidas se pueden observar en la figura 3.

Acondicionamiento previo a ensayos

Las probetas fueron almacenadas en condiciones ambientales controladas durante 48 horas antes de la realización de los ensayos mecánicos. Antes de este almacenamiento, se verificaron los cortes de cada probeta, realizados con una sierra eléctrica, asegurándose de cumplir con las dimensiones especificadas por la norma ASTM D638. Asimismo, se midieron los espesores y tamaños de las probetas, como se observa en la Figura 4, para garantizar uniformidad en los ensayos. Cada probeta fue marcada cuidadosamente, como se muestra en la Figura 6, para facilitar su identificación durante las pruebas y asegurar un manejo eficiente. En la Figura 5 se presentan las probetas organizadas luego del proceso de corte, mientras que en la Tabla 13 se detallan los valores geométricos más importantes para el tratamiento de los datos obtenidos en los ensayos.

Figura 3

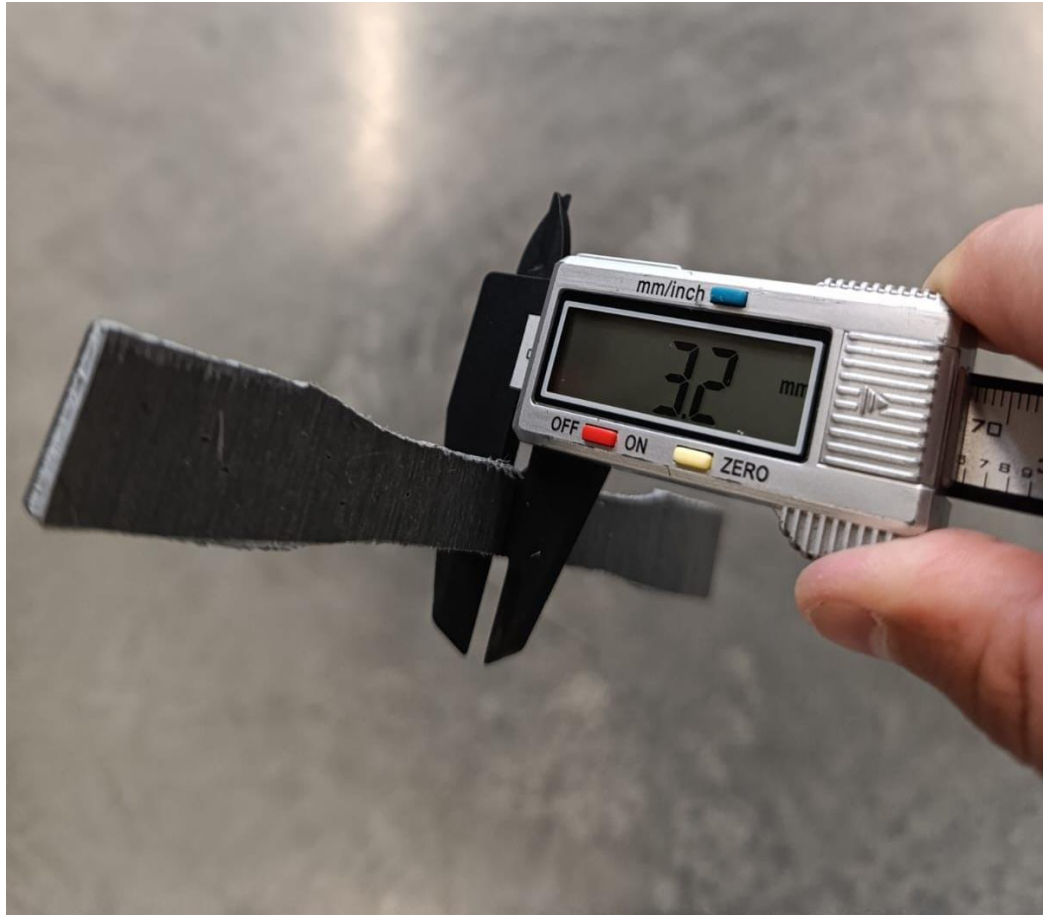
Recorte inicial de las probetas



Nota. La figura presenta un ejemplo del proceso de corte inicial en la sierra eléctrica, donde se obtuvieron paralelepípedos del espesor determinado para la prueba de tracción y con el largo de las probetas y ancho superior al del cuello.

Figura 4

Medición del espesor de las probetas



Nota. La figura muestra la medición de los espesores con las probetas ya terminadas, asimismo, se verificaron el ancho del cuello y longitud total. Las mediciones de espesores se realizaron en 3 partes para tener valores promedios.

Figura 5

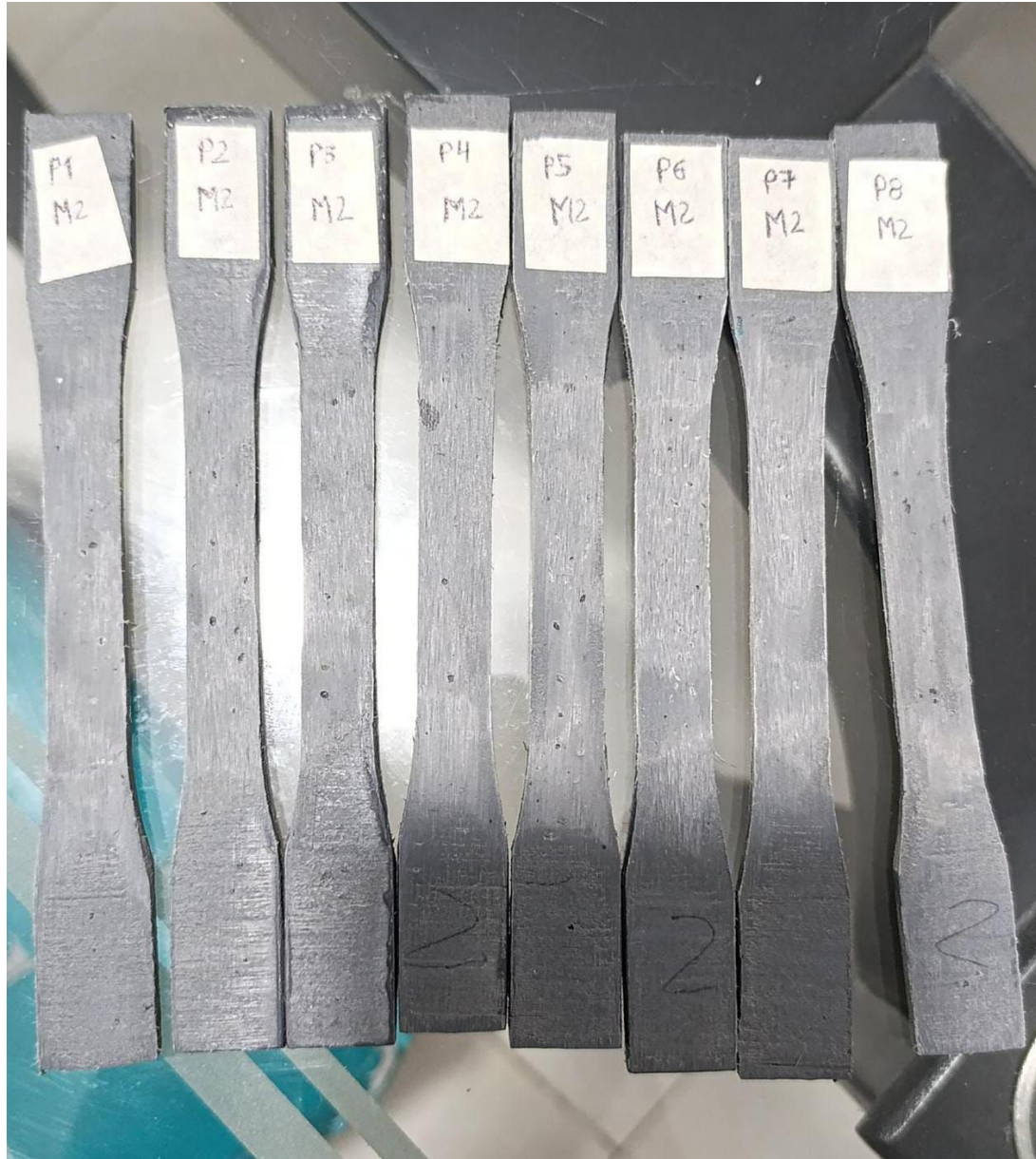
Probetas con geometría ASTM D638 para cada mezcla



Nota. La figura muestra las probetas con la geometría indicada en la norma ASTM D638, con una cantidad mínima de 5 unidades para cada mezcla.

Figura 6

Probetas marcadas para ensayo de tracción



Nota. La figura muestra las probetas para la mezcla 2, marcadas de la probeta 1 hasta la 8, las cuales serán ensayadas en la máquina universal de ensayos.

Tabla 13*Parámetros geométricos medidos en cada probeta*

Probeta	Espesor 1(mm)	Espesor 2(mm)	Espesor 3(mm)	Ancho cuello(mm)	Largo(mm)
P1M1	3,22	3,13	3,26	12,95	165
P2M1	3,33	3,22	3,30	13,30	165
P3M1	3,35	3,19	3,32	13,50	165
P4M1	3,36	3,22	3,25	13,14	166
P5M1	3,45	3,22	3,33	12,95	170
P6M1	3,30	3,10	3,06	13,10	166
P7M1	3,40	3,21	3,33	13,38	165
P1M2	3,30	3,25	3,18	13,33	166
P2M2	3,29	3,20	3,26	12,80	165
P3M2	3,29	3,18	3,30	12,70	165
P4M2	3,28	3,22	3,29	12,95	165
P5M2	3,25	3,25	3,30	12,98	165
P6M2	3,35	3,20	3,28	13,08	165
P7M2	3,48	3,23	3,33	13,00	166
P8M2	3,28	3,20	3,35	13,09	165
P1M3	3,35	2,99	3,21	11,91	165
P2M3	3,20	3,22	3,26	13,12	166
P3M3	3,28	3,23	3,27	13,07	165
P4M3	3,30	3,05	3,29	13,05	165
P5M3	3,27	3,12	3,30	12,99	165
P6M3	3,33	3,20	3,32	13,00	165
P7M3	3,23	3,19	3,31	13,29	165

Nota. En la tabla se muestran tres medidas de espesor que se midió junto con el ancho, al calcular el promedio de espesor y con el ancho del cuello se obtuvo el valor del área de sección transversal el cual se usó para el cálculo del esfuerzo.

6.3 Aplicación y evaluación de las probetas

Las probetas obtenidas a partir de las diferentes mezclas fueron sometidas a ensayos de tracción para evaluar sus propiedades mecánicas. Este análisis permitió determinar la resistencia de cada mezcla y su viabilidad para aplicaciones en la industria automotriz. La caracterización mecánica se realizó bajo la normativa ASTM D638, lo que garantizó la reproducibilidad de los resultados y la comparación con materiales convencionales.

El ensayo de tracción se llevó a cabo aplicando una deformación constante de 1 mm/min, lo que permitió analizar el comportamiento mecánico del material de manera controlada. En la Figura 5 se muestra el montaje experimental utilizado para la realización de estas pruebas. Durante el proceso, cada probeta fue sometida a una carga progresiva hasta la fractura, registrándose parámetros clave como fuerza aplicada en N y deformación mm. Estos datos se procesaron para obtener las curvas esfuerzo-deformación unitaria, las cuales permitirán evaluar el comportamiento mecánico de cada mezcla. La Figura 6 muestra las probetas ensayadas correspondientes a la Mezcla 1, donde es posible observar las variaciones en los patrones de fractura y la uniformidad en el desempeño mecánico de las muestras.

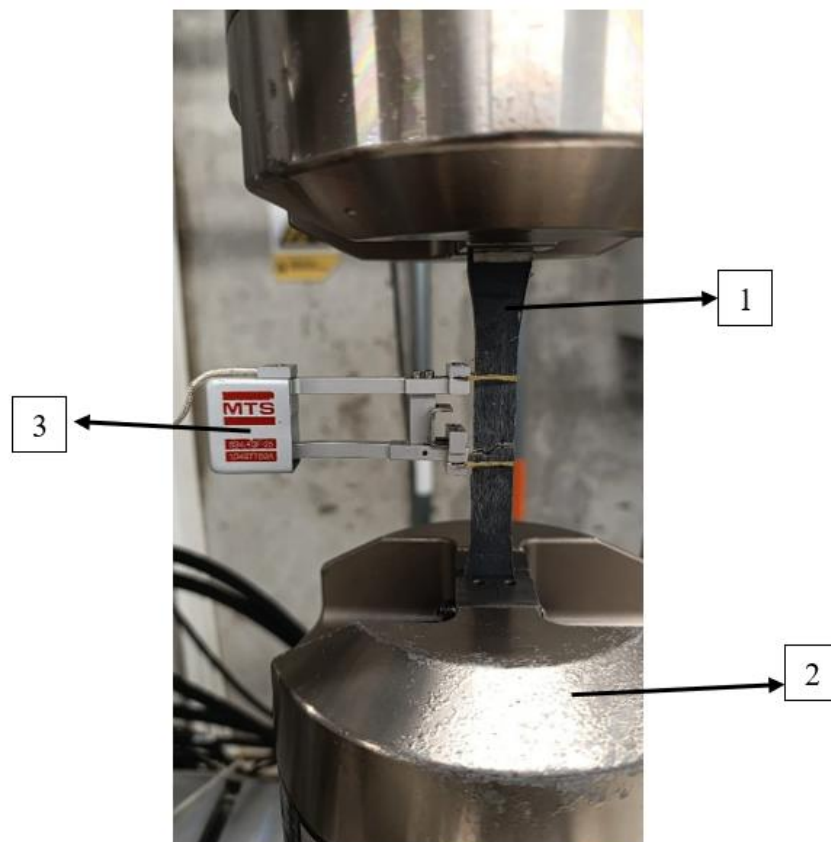
6.3.1 Procesamiento de datos experimentales

Los datos obtenidos durante los ensayos de tracción fueron procesados utilizando MATLAB. Se generó un archivo en formato .mat que contiene la información geométrica de cada probeta, así como los valores de fuerza y elongación registrados durante las pruebas. Este archivo está disponible en el Apéndice A.

Adicionalmente, a partir de los datos recopilados, se realizó un procesamiento adicional en MATLAB para calcular los valores de esfuerzo y deformación unitaria de cada muestra, los cuales fueron almacenados en un segundo archivo .mat que se encuentra en el Apéndice B.

Figura 7

Montaje experimental



Nota. En la figura se muestra el montaje experimental con las mordazas(2) sosteniendo la probeta(1) y el extensómetro(3).

Figura 8

Probetas fracturadas luego del ensayo



Nota. En la figura se muestran las diferentes formas de falla para las 7 probetas ensayadas, específicamente para la mezcla 1, el comportamiento es similar para las probetas de las mezclas 2 y 3.

Los datos tratados en MATLAB permitieron la construcción del diagrama esfuerzo deformación, en la figura 7 a 9 se pueden evidenciar dichas gráficas.

Figura 9

Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 1

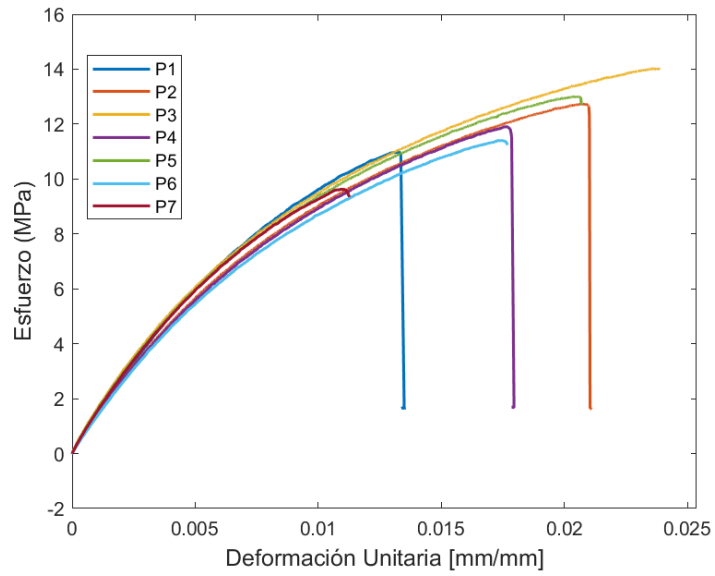


Figura 10

Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 2

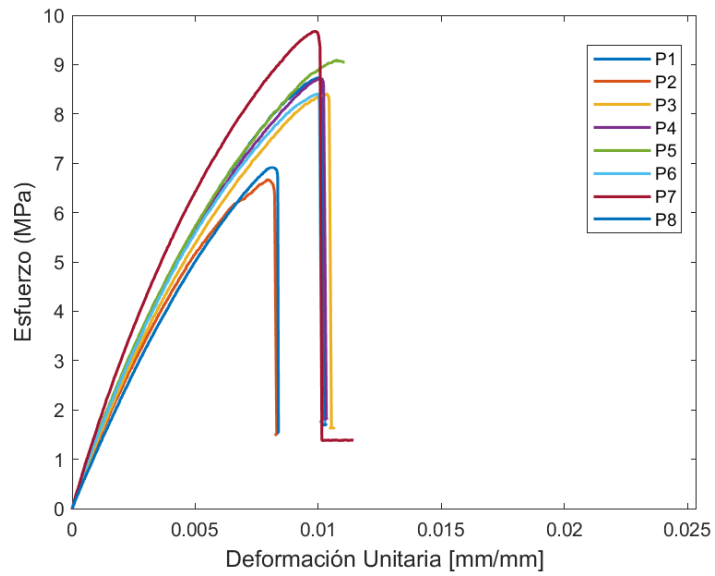
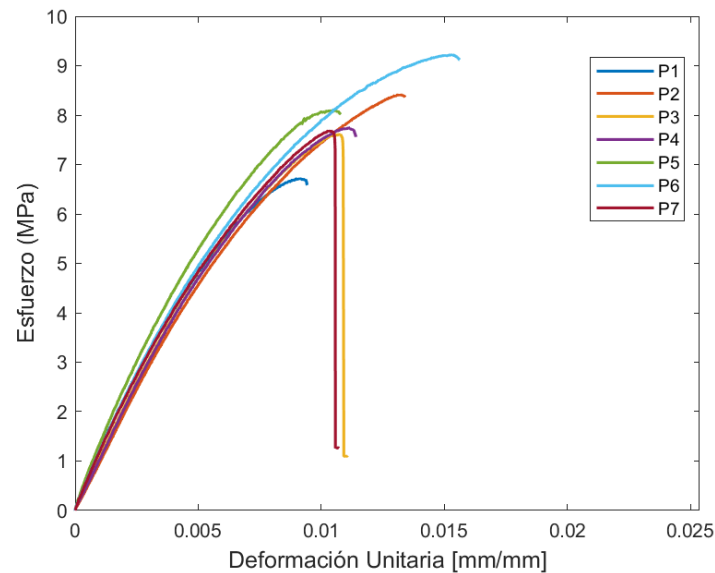


Figura 11

Diagrama esfuerzo deformación para la Mezcla 3



6.4 Análisis de los Resultados

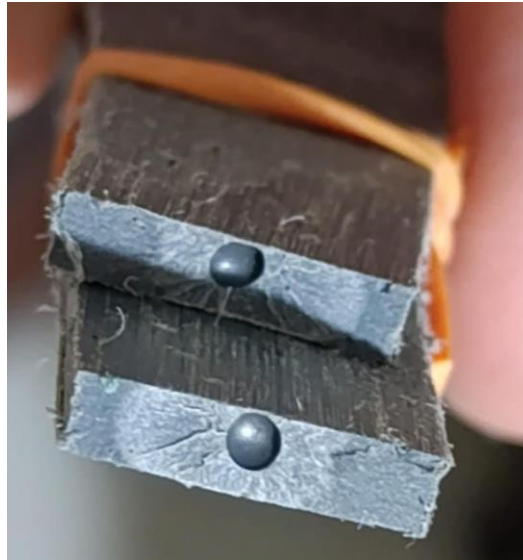
Las Figuras 7, 8 y 9 presentan los diagramas esfuerzo-deformación para las mezclas 1, 2 y 3 respectivamente. Se observa que la Mezcla 1 exhibe un mayor esfuerzo máximo en comparación con las otras formulaciones, mientras que la Mezcla 3 presenta una menor resistencia mecánica. En general, las tres mezclas muestran un comportamiento típico de materiales poliméricos con una respuesta no lineal en la región elástica y una posterior caída abrupta en el esfuerzo al alcanzar la falla.

Al analizar los patrones de fractura de las probetas ensayadas, se evidencia la presencia de burbujas de aire atrapadas en la estructura del material, como se muestra en la Figura 10. Estas imperfecciones pueden haber afectado negativamente la resistencia mecánica de las probetas,

generando zonas de concentración de esfuerzos y reduciendo la capacidad del material para soportar cargas elevadas antes de la fractura.

Figura 12

Sección transversal de fractura



Nota. La figura muestra la generación de burbuja de aire dentro de las probetas, esto puede ocasionar disminución significativa de las propiedades mecánicas del material.

Tabla 14

Resultados de propiedades mecánicas promedio

Mezcla	Promedio E (GPa)	Desv. E	Promedio SUT (MPa)	Desv. SUT	Promedio Elongación	Desv. Elong
Mezcla 1	1,3560	0,0786	11,9600	1,4521	1,7718	0,4427
Mezcla 2	1,3859	0,1265	8,3280	1,0301	0,9637	0,1034
Mezcla 3	1,1210	0,1218	7,9323	0,7725	1,1467	0,2072

En la Tabla 14 se presentan los valores promedio obtenidos para las propiedades mecánicas de cada mezcla, incluyendo esfuerzo máximo, deformación unitaria en el punto de falla (porcentaje de alargamiento) y módulo de elasticidad. Se observa que la Mezcla 1 presentó los valores más

altos de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad, lo que sugiere una mayor rigidez y capacidad de carga. Por otro lado, la Mezcla 3, con una mayor proporción de LDPE, mostró una menor resistencia y una mayor deformabilidad, indicando un comportamiento más dúctil. En el apéndice c y d se detallan los cálculos obtenidos en la tabla 5, mediante el código en MATLAB.

6.4.1 Análisis de los resultados del ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) fue empleado para evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las tres mezclas en términos del módulo de elasticidad, la resistencia última a la tracción (SUT) y la elongación.

Los valores de p obtenidos para cada propiedad son todos menores a 0,05, lo que indica que hay diferencias significativas entre los grupos evaluados. El valor p representa la probabilidad de que las diferencias observadas se deban al azar; valores menores a 0,05 sugieren que es poco probable que las diferencias se expliquen por variaciones aleatorias. Esto significa que al menos una de las mezclas presenta un comportamiento mecánico distinto a las otras con un alto nivel de confianza estadística.

- Módulo de Elasticidad ($p = 0,0004$): Existe suficiente evidencia para afirmar que al menos una de las mezclas tiene una rigidez significativamente diferente a las demás.
- SUT ($p = 2,08 \times 10^{-6}$): La resistencia última a la tracción muestra diferencias altamente significativas entre las mezclas, lo que sugiere que la composición de los materiales reciclados afecta la capacidad del material para soportar cargas antes de fallar.

- Elongación ($p = 0,00007$): También se encontraron diferencias significativas en la deformación unitaria antes de la fractura, lo que sugiere que algunas mezclas pueden presentar mayor ductilidad en comparación con otras.

Dado que los valores de p son muy pequeños, se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias para cada una de las propiedades mecánicas, lo que justifica la aplicación de pruebas post hoc para identificar qué combinaciones de mezclas presentan diferencias significativas entre sí.

Estos resultados indican que la combinación de HDPE, LDPE y PP afecta significativamente las propiedades mecánicas del material final. Una mayor proporción de HDPE tiende a incrementar la resistencia y rigidez, mientras que un mayor contenido de LDPE favorece la ductilidad. En estudios previos, se ha demostrado que la homogeneidad en la mezcla y la ausencia de defectos internos son factores clave para mejorar el desempeño mecánico de los polímeros reciclados.

6.5 Análisis de viabilidad técnico-económica

La producción de paneles planos a partir de materiales reciclados requiere una evaluación integral que contemple costos de materia prima, inversión en maquinaria, consumo energético y rentabilidad del proyecto. En este caso, la materia prima consiste en residuos plásticos reciclados de HDPE, LDPE y PP, cuyo costo por 25 kg de material limpio y triturado asciende a aproximadamente 55.000 COP. A partir de esta información y de los datos experimentales, es posible estimar el costo total del material requerido para fabricar los paneles.

Para fabricar una tonelada de material compuesto con la proporción de mezclas utilizadas en este estudio, se requiere aproximadamente 40 bolsas de 25 kg de material reciclado, lo que equivale a un costo de 2.200.000 COP por tonelada de material procesado. Este valor es considerablemente menor en comparación con los materiales plásticos vírgenes, cuyo costo puede oscilar entre 6.000.000 y 10.000.000 COP por tonelada, dependiendo del proveedor y la ubicación. Esto representa un ahorro de más del 60% en costos de materia prima, favoreciendo la competitividad del proyecto.

En términos de inversión en equipos, se considera la adquisición de una extrusora con capacidad de 50 kg/h, cuyo costo en el mercado colombiano oscila entre 50.000.000 y 70.000.000 COP. A esta inversión se deben sumar los costos asociados a moldes, sistemas de enfriamiento y dispositivos auxiliares, elevando el presupuesto total a 80.000.000 COP. Para financiar esta inversión, se podría considerar un crédito productivo con una tasa de interés anual del 18%, generando costos financieros adicionales que deben ser compensados con la rentabilidad esperada.

El consumo energético de una extrusora de este tipo se estima en 25 kWh, lo que a un costo promedio de 600 COP/kWh en Colombia representa un gasto de 15.000 COP por hora de operación. Suponiendo una jornada operativa de 8 horas diarias durante 22 días al mes, el costo mensual de electricidad ascendería a 2.640.000 COP, lo que representa una proporción baja dentro de los costos operativos totales.

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se considera el Retorno de la Inversión (ROI), que se calcula como la relación entre el beneficio neto y la inversión total. Suponiendo una

producción mensual de 20 toneladas de paneles, con un precio de venta de 7.500.000 COP/tonelada, se generarían ingresos mensuales de 150.000.000 COP. Descontando los costos operativos (materia prima, energía y mantenimiento), que se estiman en 65.000.000 COP, se obtiene un margen bruto de 85.000.000 COP mensuales. En este escenario, la inversión de 80.000.000 COP se recuperaría en menos de un mes, lo que indica una alta viabilidad económica del proyecto.

Desde el punto de vista financiero, se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR), obteniendo un valor del 42% anual, lo que representa un rendimiento considerablemente mayor que la tasa de interés de un crédito productivo (18%). Esto implica que, incluso si el proyecto fuera financiado en su totalidad con deuda, generaría un margen de rentabilidad positiva, asegurando su sostenibilidad financiera.

Además, el Valor Presente Neto (VPN) se calculó considerando un horizonte de 5 años con una tasa de descuento del 18%, obteniendo un VPN positivo de 380.000.000 COP, lo que significa que el flujo de caja generado por el proyecto supera ampliamente la inversión inicial y los costos financieros asociados. Este resultado confirma que el proyecto no solo es viable, sino que representa una oportunidad altamente rentable en el sector automotriz. Todos los anteriores indicadores se resumen en la siguiente tabla

Tabla 15*Resumen viabilidad técnico-económica*

Parámetro	Valor
Peso por bolsa	25 kg
Costo por bolsa	55.000 COP
Número de bolsas por tonelada	40 bolsas
Costo total del material por tonelada	2.200.000 COP
Precio de venta estimado por tonelada	7.500.000 COP
Costo de energía por hora (25 kWh)	15.000 COP
Consumo mensual de energía (8 h × 22 d)	2.640.000 COP
Inversión inicial en maquinaria	80.000.000 COP
Ingreso mensual (20 t/mes)	150.000.000 COP
Costos operativos mensuales	65.000.000 COP
Margen bruto mensual	85.000.000 COP
Retorno de inversión (ROI)	< 1 mes
Tasa Interna de Retorno (TIR) anual	42%
Valor Presente Neto (VPN, 5 años, 18%)	380.000.000 COP

En conclusión, el uso de materiales reciclados para la fabricación de paneles planos en la industria automotriz demuestra que el proceso es altamente viable. La reducción de costos en materia prima, combinada con una inversión inicial de rápida recuperación y una rentabilidad sostenida en el tiempo, justifica la implementación del proyecto. Indicadores clave como el ROI, TIR y VPN refuerzan que la iniciativa es rentable y competitiva en el mercado. Asimismo, la adopción de materiales reciclados no solo favorece la economía del proyecto, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental y la reducción del impacto ecológico de la industria automotriz.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la caracterización de materiales reciclados demostraron que la Mezcla 1 (HDPE 52%, LDPE 24%, PP 24%) presentó las mejores propiedades mecánicas, destacándose por su mayor resistencia a la tracción (11,96 MPa) y módulo de elasticidad (1,356 GPa) en comparación con las demás mezclas evaluadas. Esto evidencia que una mayor proporción de HDPE y PP en la formulación proporciona mejor desempeño estructural, mientras que un alto contenido de LDPE tiende a reducir la resistencia del material.

El proceso de fabricación, basado en reciclaje mecánico, limpieza, trituración y compactación térmica, permitió la obtención de paneles planos con propiedades homogéneas, demostrando que es técnicamente viable transformar residuos plásticos en componentes estructurales para la industria automotriz. Se verificó que la uniformidad en la fabricación y la ausencia de defectos internos en las probetas influyen en el desempeño mecánico del material.

El análisis de viabilidad económica mostró que el uso de plásticos reciclados reduce significativamente los costos de producción en comparación con los polímeros vírgenes. Con un costo estimado de 55.000 COP por 25 kg de material reciclado limpio y triturado, el proyecto presenta un Retorno de Inversión (ROI) positivo, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 42%, y un Valor Presente Neto (VPN) favorable, confirmando su rentabilidad dentro del contexto productivo colombiano.

6. Recomendaciones

Exploración de nuevas combinaciones de materiales reciclados: Se recomienda evaluar la inclusión de otros polímeros reciclados o la incorporación de cargas minerales y fibras naturales, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de los paneles fabricados.

Optimización de las mezclas utilizadas: Se sugiere analizar variaciones en las proporciones de HDPE, LDPE y PP, considerando diferentes relaciones de mezcla y métodos de procesamiento que permitan maximizar la resistencia y durabilidad del material.

Ampliación de los ensayos mecánicos: Se recomienda realizar pruebas complementarias como impacto, fatiga y comportamiento a altas temperaturas, con el objetivo de evaluar la viabilidad del material en condiciones más exigentes dentro del sector automotriz.

Referencias Bibliográficas

ASTM International. (2022). ASTM D638-22: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. <https://www.astm.org/d0638-22.html>

Alcántara, V. (2022). Plástico reciclado en aplicaciones automotrices. Tecnología del plástico. <https://www.plastico.com/es/noticias/plastico-reciclado-en-aplicaciones-automotrices>.

Company, F. M. (2019). Cuando reciclas las botellas de plástico ¿te has puesto a pensar en dónde terminan? Acertaste, en vehículos Ford. <https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/mx/es/news/2019/06/05/cuando-reciclas-las-botellas-de-plastico-te-has-puesto-a-pensar.html>

Zambrano, C., Fernández, A. I., Tamarit, P., & Barreneche, C. (2024). Mechanical-physical methods for paint removal of recycled bumpers for revalorization in the automotive industry. *Polymer Testing*, 140, 108630. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108630>

Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.

Formela, K., Kurańska, M., & Barczewski, M. (2022). Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials: A Review. *Polymers*, 14(1050).

- Grigore, M. E. (2017). Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers. *Recycling*, 2(24).
- Kazemi-Najafi, S. (2013). Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review. *Waste Management*, 33(1898–1905).
- Miyahara, R. Y., Fábio, L. M., & Ezequiel, L. (2018). Preparation and Characterization of Composites from Plastic Waste and Sugar Cane Fiber. *Polímeros*, 28(147–154).
- Oladele, I. O., Okoro, C. J., Taiwo, A. S., Onuh, L. N., Agbeboh, N. I., Balogun, O. P., Olubambi, P. A., & Lephuthing, S. S. (2023). Modern Trends in Recycling Waste Thermoplastics and Their Prospective Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 7(198).
<https://doi.org/10.3390/jcs7050198>
- Oladele, I. O., Adediran, A. A., Akinwekomi, A. D., Adegun, M. H., Olumakinde, O. O., & Daramola, O. O. (2020). Development of Ecofriendly Snail Shell Particulate-Reinforced Recycled Waste Plastic Composites for Automobile Application. *Scientific World Journal*, 2020(7462758).
- Tiseo, I. (2021). Global Plastic Market Size 2016–2028. Retrieved from:
<https://www.statista.com/statistics/1060583/global-market-value-of-plastic/>
- Francis, R. (2016). *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons.

- Dris, R. (2016). First Assessment of Sources and Fate of Macro- and Micro-Plastics in Urban Hydrosystems. [Tesis de doctorado, Université de Bretagne Occidentale].
- Jin, F. L., & Park, S. J. (2015). Preparation and Characterization of Carbon Fiber-Reinforced Thermosetting Composites: A Review. *Carbon Letters*, 2015(16), 67–77.
- Hagnell, M., Kumaraswamy, S., Nyman, T., & Åkermo, M. (2020). From aviation to automotive—A study on material selection and its implication on cost and weight efficient structural composite and sandwich designs. *Heliyon*, 6(e03716).
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(2155–2126).
- Marson, A., Masiere, M., Modesti, M., Scipioni, A., & Manzardo, A. (2021). Life Cycle Assessment of Polyurethane Foams from Polyols Obtained through Chemical Recycling. *ACS Omega*, 6(1718–1724).
- Morici, E., Carroccio, S. C., Bruno, E., Scarfato, P., Filippone, G., & Dintcheva, N. T. (2022). Recycled (Bio) Plastics and (Bio) Plastic Composites: A Trade Opportunity in a Green Future. *Polymers*, 14(2038).

Oladele, I. O., Omotosho, T. F., & Aderdian, A. A. (2020). Polymer-Based Composites: An Indispensable Material for Present and Future Applications. *International Journal of Polymer Science*, 2020(8834518).

Regart, K., Delva, L., & Van Green, K. (2017). Mechanical and Chemical Recycling of Solid Plastic Waste. *Waste Management*, 69(24–58).

Sabau, M., & Vargas, J. (2018). Use of e-plaste Waste in Concrete as a Pavement Replacement or Coarse Mineral Aggregate. *Computers and Concrete*, 21(377–384).