

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un material para losetas a partir de residuos de neumáticos y
termoplásticos reciclados

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Jose Antonio Suarez Loor

Miguel Ángel Carrasco Cordero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mis padres, a mis tíos, abuelos y a todos quienes me ayudaron de alguna u otra forma a convertirme en profesional y alcanzar este punto de mi vida.

Esto se lo dedico también a mi yo pequeño, como muestra de que todas las horas de trabajo, las ojeras, y frustraciones rinden su fruto y que todo es posible en esta vida.

Miguel Ángel Carrasco Cordero

DEDICATORIA

Este proyecto lo dedico a mis padres, hermanas, a capitán Sancocho y por último, a mi abuelita y a Aldo; que aunque ya no están conmigo físicamente, siempre los tendré en mi corazón.

A Ale, por todo tu apoyo incondicional.

A mis perritos amados, ustedes han sido un pilar, y no solo durante la carrera, sino, desde siempre.

Por último, a mis amigos y a Lionel Andrés Messi Cuccitini, todos ustedes han sido un gran soporte emocional en mi vida.

Jose Antonio Suarez Loor

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme vivir momentos buenos y malos en mi carrera que me ayudaron a crecer como profesional y como persona, y por no permitir que pierda la fe en alcanzar mis metas. A toda mi familia por confiar en mí y por apoyarme durante todo momento, desde el examen de admisión hasta mis últimos días en ESPOL. Gracias al Laboratorio de Plásticos, técnicos, investigadores y maestros de quienes pude aprender estos años.

Miguel Ángel Carrasco Cordero

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por apoyarme en estos 5 años de estudio, por no dejar de creer en mí y que lo iba a lograr. Agradezco también a Ale por no dejar de alentarme, hasta en mis momentos más complicados, sin ti, esto hubiera sido más difícil. Me queda agradecer a mis amigos; Ian, Tiphany, Johana, Andrea y Melissa, los llevaré por siempre en mi corazón.

Gracias a todo el staff del Laboratorio de Plásticos por su apoyo y paciencia durante todo este proyecto.

Jose Antonio Suarez Loor

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jose Antonio Suarez Loor y Miguel Ángel Carrasco Cordero* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Jose Antonio Suarez
Loor



Miguel Ángel Carrasco
Cordero

EVALUADORES



Jonathan David Reyes Ortiz, MPhil.

PROFESOR DE LA MATERIA

Andrés Francisco Rigail Cedeño, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La contaminación por residuos neumáticos y plásticos en el Ecuador ha fomentado la exploración de nuevas formas de aprovechamiento de estos materiales para el diseño de productos sostenibles. Por ende, se propone el diseño de un material para losetas a partir de residuos neumáticos y termoplásticos reciclados, en el que se busca definir condiciones de manufactura basándose en propiedades mecánicas y fisicoquímicas, y analizar la viabilidad financiera e impacto ambiental del proceso.

La primera fase del proyecto consistió en la selección del termoplástico reciclado que actuó como matriz con el caucho granulado. Luego, se desarrolló un diseño factorial y se definieron variables de respuesta para analizar la influencia del etilen-vinil-acetato (rEVA) y fibras de nylon reciclados en diferentes formulaciones. Por último, se seleccionó el material que presentó un mejor balance en las variables de respuesta propuestas.

La formulación escogida se compone de 70% de caucho molido de neumáticos, 20% de polietileno de alta densidad reciclado y 10% de rEVA. Las propiedades más destacables del material fueron su resistencia al impacto, módulo de flexión y compression set; con valores de 247.917 J/m, 103.99 MPa y 51.79%, respectivamente. La producción de losetas con el material escogido demostró un ahorro energético y de emisiones de carbono, con un costo de producto terminado del 30 USD/m².

Estos resultados permiten maximizar en un 100% el uso de residuos plásticos y neumáticos en el diseño de un material para losetas, el cual exhibe excelentes propiedades mecánicas y fisicoquímicas, un alto potencial financiero y menor impacto ambiental.

Palabras Clave: caucho, termoplásticos, reciclaje, viabilidad financiera, huella de carbono.

ABSTRACT

Contamination by tire and plastic waste in Ecuador has promoted the exploration of new ways of using these materials to design sustainable products. The design of a tile material from tire waste and recycled thermoplastics is proposed, which seeks to define manufacturing conditions based on mechanical and physicochemical properties, analyze its financial viability and the environmental impact of the process.

The first phase consisted of selecting the recycled thermoplastic that acted as a matrix with the granulated rubber. Then, a factorial design and response variables were defined to analyze the interference of recycled ethylene-vinyl acetate (rEVA) and nylon fibers in different formulations. Finally, the material that presented the best balance among the proposed response variables was selected.

The selected formulation is composed of 70% tire ground rubber, 20% recycled high-density polyethylene, and 10% rEVA. The most outstanding properties of the material were its impact absorption, flexural modulus, and compression set; 247.917 J/m, 103.99 MPa, and 51.79%, respectively. The production of tiles with the chosen material demonstrated energy and carbon emission savings, with a finished product cost of 30 USD/m².

These results allow 100% maximization of the use tire and plastic waste in the design of tile material, which exhibits excellent mechanical and physicochemical properties, high financial viability, and lower environmental impact.

Keywords: *rubber, thermoplastics, recycling, financial viability, carbon footprint.*

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|------|
| RESUMEN | I |
| ABSTRACT | II |
| ÍNDICE GENERAL | III |
| ABREVIATURAS | VI |
| SIMBOLOGÍA..... | VII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | IX |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Descripción del problema | 1 |
| 1.2 Justificación del problema | 2 |
| 1.3 Objetivos | 3 |
| 1.3.1 Objetivo General | 3 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.4 Marco teórico | 3 |
| 1.4.1 Neumáticos Fuera de Uso (NFU)..... | 4 |
| 1.4.2 Reciclaje de Caucho: Preparación de Compuestos | 4 |
| 1.4.2.1 Compatibilización del Caucho de Neumático..... | 5 |
| 1.4.2.1.1 Caucho, Polietileno de Alta Densidad, EVA y Fibras de Nylon..... | 6 |
| 1.4.3 Losetas | 7 |
| 1.4.4 Evaluación de Impacto Ambiental | 7 |
| CAPÍTULO 2 | 9 |
| 2. Metodología..... | 9 |
| 2.1 Evaluación de alternativas de material termoplástico | 9 |
| 2.2 Materiales | 12 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| 2.3 | Diseño experimental y análisis estadístico | 12 |
| 2.4 | Preparación del material..... | 13 |
| 2.4.1 | Nomenclatura | 13 |
| 2.4.2 | Proporciones e identificación de cada material | 13 |
| 2.4.3 | Mezclado | 14 |
| 2.4.4 | Moldeo por compresión y preparación de probetas | 15 |
| 2.5 | Caracterización del material | 16 |
| 2.5.1 | Ensayos mecánicos..... | 16 |
| 2.5.1.1 | Ensayo de flexión | 16 |
| 2.5.1.2 | Ensayo de impacto..... | 16 |
| 2.5.1.3 | Dureza | 16 |
| 2.5.1.4 | Compression set | 16 |
| 2.5.2 | Resistencia a la exposición química a corto plazo | 17 |
| 2.6 | Matriz de decisión de criterios | 17 |
| 2.6.1 | Análisis complementario | 18 |
| 2.6.1.1 | Microscopía electrónica de barrido (SEM)..... | 18 |
| 2.6.1.2 | Análisis termogravimétrico (TGA)..... | 18 |
| 2.6.1.3 | Medición del ángulo de contacto | 18 |
| 2.7 | Análisis tecno-económico..... | 19 |
| 2.8 | Cálculo de huella de carbono y demanda energética | 20 |
| CAPÍTULO 3..... | | 21 |
| 3. | Resultados Y ANÁLISIS | 21 |
| 3.1 | Ensayo de Flexión..... | 21 |
| 3.2 | Ensayo de Impacto..... | 22 |
| 3.3 | Dureza Shore A..... | 23 |
| 3.4 | Compression Set..... | 24 |
| 3.5 | Resistencia a Exposición Química a Corto Plazo | 25 |

| | | |
|------------------|---|----|
| 3.6 | Consumo Energético Específico..... | 25 |
| 3.7 | Selección del Material con Mejor Desempeño..... | 26 |
| 3.8 | Microscopía Electrónica de Barrido | 26 |
| 3.9 | Análisis Termogravimétrico | 28 |
| 3.10 | Ángulo de Contacto..... | 28 |
| 3.11 | Proceso de Manufactura Propuesto | 29 |
| 3.11.1 | Análisis Tecno-económico | 30 |
| 3.11.2 | Ecoauditoría | 32 |
| CAPÍTULO 4 | | 33 |
| 4. | Conclusiones Y Recomendaciones | 33 |
| 4.1 | Conclusiones..... | 33 |
| 4.2 | Recomendaciones..... | 34 |
| BIBLIOGRAFÍA | | |
| APÉNDICES | | |

ABREVIATURAS

| | |
|--------------|--|
| ESPOL | Escuela Superior Politécnica del Litoral |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| HDPE | Polietileno de Alta Densidad |
| LDPE | Polietileno de Baja Densidad |
| PET | Tereftalato de Polietileno |
| EVA | Etilen-Vinil-Acetato |
| PA | Poliamida |
| GTR | Caucho Neumático Molido |
| TPE | Termoplástico Elastomérico |
| NFU | Neumáticos Fuera de Uso |
| SEM | Microscopía Electrónica de Barrido |
| BSED | Detector de Electrones Retrodispersados |
| TGA | Termogravimetría |
| ODS | Objetivos de Desarrollo Sostenible |
| GEI | Gases de Efecto Invernadero |
| USD | Dólares Americanos |
| VAN | Valor Actual Neto |
| TIR | Tasa Interna de Retorno |
| PRI | Período de Retorno de Inversión |

SIMBOLOGÍA

| | |
|------------------------------------|--|
| % | Porcentaje |
| C | Carbono |
| S | Azufre |
| H | Hidrógeno |
| O | Oxígeno |
| CO₂ | Dióxido de Carbono |
| NaOH | Hidróxido de Sodio |
| HCl | Ácido Clorhídrico |
| H₂SO₄ | Ácido Sulfúrico |
| NH₄OH | Amoníaco Cuaternario |
| NaOCl | Hipoclorito de sodio |
| kg | Kilogramo |
| J | Julios |
| m | Metro |
| mm | Milímetro |
| °C | Grado Celsius |
| rpm | Revoluciones por Minuto |
| psi | Libras por Pulgada Cuadrada |
| min | Minuto |
| h | Hora |
| N | Newtons |
| t | Tonelada |
| W | Watt |
| kV | Kilovoltios |
| E_{RE} | Energía por Recolección de Materiales |
| E_C | Energía por clasificación de Materiales |
| r | Contenido de reciclaje al final de la vida |
| H_{RC} | Energía Incorporada en Reciclaje |
| C_{RC} | Huella de Carbono Incorporada en Reciclaje |
| H_m | Energía Incorporada de Material Virgen |
| C_m | Huella de Carbono de Material Virgen |
| R | Porcentaje inicial de material reciclado |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Estructura química del EVA..... | 6 |
| Figura 2.1 Elaboración de mezclas mediante reómetro de torque | 14 |
| Figura 2.2 Prensa hidráulica con control de temperatura | 15 |
| Figura 3.1 Módulo de flexión | 21 |
| Figura 3.2 Energía de Impacto Absorbida | 22 |
| Figura 3.3 Dureza Shore A..... | 24 |
| Figura 3.4 Consumo Energético Específico..... | 26 |
| Figura 3.5 Micrografías SEM de a) y b) M-0Reva-0rPA (500X y 2500X), c) y d) M-10rEVA-0rPA..... | 27 |
| Figura 3.6 a) Curva Termogravimétrica y b) Derivada de la Masa respecto a la Temperatura de Materiales Sintetizados | 28 |
| Figura 3.7 Proceso propuesto de producción de losetas de caucho..... | 29 |
| Figura 3.8 Diseño y dimensionamiento de losetas de caucho | 30 |
| Figura 3.9. Diagrama de Flujo de Caja en función del tiempo de proyecto..... | 31 |
| Figura 3.10 Ecoauditoría de a) Demanda Energética y b) Huella de Carbono..... | 32 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Composición de los Neumáticos Fuera de Uso [20] | 4 |
| Tabla 2.1 Matriz de Criterios de Selección de Material Termoplástico..... | 10 |
| Tabla 2.2 Matriz de Selección de Alternativas | 11 |
| Tabla 2.3 Parámetros del Diseño Experimental..... | 12 |
| Tabla 2.4 Nomenclatura para la Identificación de los Materiales | 13 |
| Tabla 2.5 Proporciones e Identificación de las Muestras | 13 |
| Tabla 2.6 Sustancias Químicas del Ensayo ASTM F925..... | 17 |
| Tabla 2.7 Matriz de Decisión de Criterios | 17 |
| Tabla 2.8 Ecuaciones empleadas en la ecoauditoría | 20 |
| Tabla 3.1 Compression Set | 25 |
| Tabla 3.2 Matriz de Selección de Alternativas | 26 |
| Tabla 3.3 Tensión Interfacial y Coeficiente de Esparcimiento entre Componentes..... | 29 |
| Tabla 3.4 Estimación de capital de inversión fijo inicial | 30 |
| Tabla 3.5 Resultados de Análisis Tecno-económico de producción de losetas de caucho | 31 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental y socioeconómico asociado a la disposición final de neumáticos y productos plásticos constituye una situación que requiere la exploración de alternativas de aprovechamiento sostenibles. Debido al gran volumen y naturaleza de los residuos, las soluciones tradicionales no son lo suficientemente efectivas, por lo que en el presente trabajo se analiza la aplicación del diseño de materiales y productos como respuesta a esta problemática.

1.1 Descripción del problema

En el 2019, la producción global de neumáticos estimada fue 2,2 billones de toneladas y se proyecta que aumentará a 2,7 billones de toneladas en 2025 [1]. En el mismo año, en Ecuador se generaron 3,14 millones de neumáticos y solo 45 % fue recolectado y transformado en otros productos. No obstante, la tendencia de utilizar estos neumáticos como relleno sanitario o quemarlos, son prácticas comunes al territorio latinoamericano, con efectos negativos en la comunidad y el medioambiente [2].

Por otra parte, la generación de residuos plásticos en Ecuador en el 2021 fue de 40312 toneladas, representando un aumento significativo respecto a años anteriores [3]. Añadido a esto, el país se posiciona como un principal importador de basura plástica, en su mayoría proveniente de Estados Unidos [4]. Sin embargo, a pesar de que los plásticos mencionados posean una naturaleza diferente a los neumáticos, se aplican las mismas metodologías de gestión y disposición [5].

Uno de los tipos más comunes de plásticos es el polietileno de alta densidad (HDPE), comúnmente usado para envases y fundas [6]. Al igual que el resto de termoplásticos reprocesables, no está siendo reinsertado en la cadena de valor, agudizando la crisis de reciclaje en Ecuador.

El impacto de los neumáticos y los plásticos comunes se extiende a aspectos ambientales, sociales y económicos. La principal consecuencia es la emisión de

contaminantes orgánicos e inorgánicos tóxicos hacia la atmósfera [1], el suelo [7] y cuerpos de agua [8].

A nivel social, se reportan problemas de salud por exposición a los componentes mencionados, y la propagación de epidemias transmitidas por mosquitos y otros vectores [9]. Por último, la gestión inadecuada de estos desechos evita la reducción de costos en el sector de transporte, importación de materia prima, generación de empleos y consumo energético [10]. Consecuentemente, estos residuos se rigen bajo un modelo lineal y representan un desafío de sostenibilidad.

1.2 Justificación del problema

En respuesta a la problemática del reciclaje de neumáticos, existen iniciativas comerciales locales [11]–[13], que utilizan el caucho reciclado para fabricar losetas, pisos, entre otros productos. Sin embargo, estas no emplean otros componentes de los neumáticos como las fibras de nylon [14], utilizan resinas termoestables como aglomerantes y el porcentaje de neumáticos que no son gestionados correctamente continúa siendo elevado (55%). Además, no se ha explorado el aprovechamiento de plásticos de uso común, como el HDPE, mediante la formación de mezclas con otros materiales como el caucho [15].

Uno de los objetivos de la economía circular en el sector de plásticos es la reutilización de desechos como fuente para la manufactura de nuevos productos [16]. Las barreras asociadas a la implementación de este modelo económico son: dificultad para el escalamiento y complejidad en las cadenas de suministro para la producción. Es decir que el producto debe apuntar hacia fuentes de materia prima accesible y un modelo de producción sencillo.

La implementación de un modelo circular es clave en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). El ODS 12 se enfoca en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, y el 9 busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Para lograrlos, se requiere reducir la cantidad de desechos mediante su reciclaje, reutilización, y facilitar e incrementar la investigación científica.

Por tanto, el desarrollo de un producto mediante el uso de residuos generados por la industria de neumáticos y desechos plásticos resultaría en una propuesta atractiva e innovadora para la industria plástica ecuatoriana, otorgando valor agregado a estos materiales de forma sostenible y accesible.

1.3 Objetivos

En base a la problemática descrita, se ha definido el objetivo general de la solución propuesta y el desglose de sus requerimientos a través de los objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un material a base de caucho de neumático y termoplásticos reciclados que maximice la reutilización de estos residuos, mediante la evaluación de sus propiedades, viabilidad económica e impacto ambiental.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Definir la composición y parámetros de mezclado ideales mediante el estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas, considerando las condiciones de servicio y requerimientos básicos del producto.
- Analizar el impacto ambiental y económico del producto mediante el cálculo de la huella de carbono y análisis económico para determinar su competitividad en el mercado local.

1.4 Marco teórico

En esta sección se definen los conceptos claves que rigen el diseño de material y el producto propuestos para la crisis de gestión desechos plásticos y neumáticos fuera de uso.

1.4.1 Neumáticos Fuera de Uso (NFU)

Los NFU son un tipo de desecho difícil de reciclar debido a que su compleja composición depende también de factores como tipo de vehículo, marca, requerimientos ambientales y condiciones de operación [17]. Sin embargo, estos generalmente contienen:

- Elastómeros naturales (poli-isopreno) y sintéticos (polibutadieno, caucho butílico y caucho butadieno-estireno).
- Negro de humo y/o sílice amorfa.
- Alambre de acero.
- Textiles (rayón, poliéster, nylon o aramida) [18].
- Agentes de vulcanización, aditivos y óxido de zinc [19].
- Azufre (utilizado en la formación de enlaces S-S y C-S entre elastómeros).

Por último, estos componentes siguen proporciones similares a las expuestas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Composición de los Neumáticos Fuera de Uso [20]

| Material | Vehículos Livianos | Vehículos Pesados |
|---|---------------------------|--------------------------|
| Caucho Natural | 19 % | 34 % |
| Caucho Sintético | 24 % | 11 % |
| Rellenos (Negro de Humo y sílice amorfa) | 26 % | 24 % |
| Aditivos (antioxidantes, protección contra ozono, agentes curantes, etc.) | 14 % | 10 % |
| Acero | 12 % | 21 % |
| Textiles | 4 % | 0 % |

1.4.2 Reciclaje de Caucho: Preparación de Compuestos

La compleja composición y naturaleza de los NFU ha provocado el desarrollo de diferentes técnicas de reciclaje. Sin embargo, su relevancia y carácter sostenible dependen de generar el mínimo de efectos adversos, utilizar menos recursos y crear productos con valor agregado. En la actualidad, las técnicas comunes son pirólisis, reencauchado, incineración y mezclado con otros materiales como polímeros, asfalto, cemento, entre otros [21].

Al igual que algunas técnicas de reciclaje, la formación de compuestos con caucho reciclado comienza con la trituración de los NFU y la clasificación de los residuos en textiles, alambre de acero y caucho de neumático molido (en inglés, ground tire rubber, GTR). La mezcla de GTR con polímeros termoplásticos se denomina termoplástico elastomérico (en inglés, thermoplastic elastomers, TPE). Estos tienen la ventaja de ser de bajo costo, fácilmente procesables, reciclables, livianos y mantener las propiedades mecánicas de ambas fases [22]. Estas últimas son afectadas por el tamaño de partícula y concentración del GTR, naturaleza del material base, e interacción entre componentes [23].

Los TPE se sintetizan por mezcla directa por fusión, sin embargo, la naturaleza termoestable de los GTR limita su compatibilidad con matrices termoplásticas [21]. Por ende, se emplean agentes compatibilizantes que mejoran la miscibilidad de los polímeros, cumpliendo los siguientes objetivos [24] [25]:

- Disminuir la tensión interfacial.
- Mejorar la adhesión interfacial entre polímeros.
- Mejorar la transferencia de esfuerzos entre fases y las propiedades mecánicas.
- Mejorar la dispersión y estabilidad de las fases.

1.4.2.1 Compatibilización del Caucho de Neumático

Las metodologías de compatibilización son: devulcanización y modificación de superficie. La primera rompe selectivamente los enlaces de azufre y carbono (S, C) para desintegrar la red tridimensional entrecruzada. El tipo más empleado es el termo-mecánico; sin embargo, esta selectividad es difícil de alcanzar y puede causar la degradación del caucho, por lo que es un proceso complementario [26].

La modificación de superficie puede ser física o química; esta última se subclasifica en reactiva y no reactiva. La principal desventaja de los métodos físicos es el uso de tecnología de alto consumo energético y costo operacional, como la radiación electromagnética [23]. Por otro lado, los métodos químicos reactivos emplean oxidantes fuertes o polímeros injertados reactivos que pueden

resultar tóxicos [27]. Finalmente, los no reactivos emplean sustancias compatibilizantes, como el etileno-vinil-acetato (EVA) [28], que poseen grupos afines a las fases de la mezcla.

1.4.2.1.1 Caucho, Polietileno de Alta Densidad, EVA y Fibras de Nylon

El caucho y el HDPE son plásticos no polares cuya baja miscibilidad se relaciona a su viscosidad y peso molecular disímiles. No obstante, la mezcla entre el GTR y HDPE es llamativa debido a su excelente procesabilidad y a la rigidez que brinda el polietileno [19].

Por otro lado, las fibras de nylon son de carácter polar y elevada rigidez específica. Estas generalmente son acompañadas con aditivos o copolímeros con grupos funcionales polares y no polares, encargados de la compatibilización [29]. Por tanto, la inclusión de estas fibras junto a aditivos en matrices de polietileno, mejora las propiedades mecánicas debido a la transferencia de esfuerzos matriz-fibra y a la mitigación de la propagación de grietas [30].

La inclusión de elastómeros como el EVA (Figura 1.1) en la mezcla GTR/HDPE tiene un efecto importante en la adhesión interfacial. Según [19], la incorporación del EVA como compatibilizante muestra una mejoría en la resistencia al impacto y la elongación a la rotura en 175 J/m y 82%, respectivamente. Fazli señala que, con el uso de EVA reciclado, se forma una interfaz encapsulante que aumenta la capacidad de deformación y tenacidad del material [31]. Esto se debe a que el EVA posee una estructura compuesta por una sección apolar asociada al etileno, la cual es afín al HDPE y GTR, y una polar vinculada al vinil acetato que es compatible con las fibras de poliamidas.

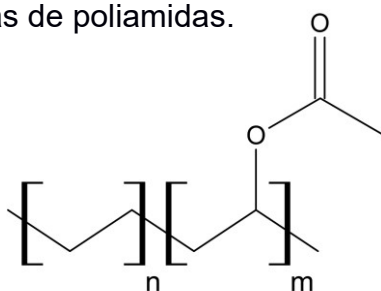


Figura 1.1 Estructura química del EVA

1.4.3 Losetas

La producción de losetas o pisos resilientes a base caucho de neumático molido es un sector industrial con baja cantidad de competidores. Actualmente, en el mercado nacional se utilizan resinas termoestables para la aglomeración de las partículas de caucho reciclado, resultando en un producto económico, al mismo tiempo que otorga a las losetas alta tenacidad, resistencia a impactos y gran flexibilidad [12]. En vista que el enfoque principal para el diseño de losetas de caucho es de tipo deportivo e industrial, estos productos deben soportar condiciones de servicio agresivas, dictaminadas en la norma ASTM F1344:2015, en la cual se contemplan propiedades físicas, químicas y mecánicas [32].

Debido a la naturaleza del caucho y de las resinas termoestables, la producción de losetas pasa por un proceso de curado a altas temperaturas y presiones por tiempos prolongados, lo que refleja una lenta tasa de producción. Asimismo, representa una alta dificultad en el reciclaje al final de su vida debido al efecto del vulcanizado del caucho y el entrecruzamiento de cadenas poliméricas en la resina termoestable [33].

1.4.4 Evaluación de Impacto Ambiental

La evaluación de impacto ambiental derivada de una actividad puede ser estimada mediante un análisis de huella de carbono, calculando la emisión directa o indirecta de gases de efecto invernadero (GEI). La huella de carbono generalmente es referida a la emisión neta de GEI de una persona o compañía cuando realizan cierta actividad [34].

Las contribuciones directas son aquellas que están reguladas por la actividad, por el contrario, las emisiones indirectas se atribuyen a efectos secundarios de la actividad para su desarrollo [35].

Idealmente el análisis de la huella de carbono debe tomar en cuenta las principales fuentes de emisión de GEI en término de carbono equivalente, CO₂-eq, las cuales son enumeradas a continuación [36]:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso
- Gases fluorados

La huella de carbono se puede definir como la sumatoria del consumo (CE) de las **k** fuentes de emisión multiplicada por su correspondiente factor de emisión (FE) de carbono equivalente [35], como se ilustra en la Ecuación 1.1 .

$$Huella\ de\ carbono = \sum_{i=1}^k CE_i * FE_i \quad (1.1)$$

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En esta sección se detalló el procedimiento de diseño de un material a base de caucho y termoplásticos reciclados. Se presentó el proceso de selección de residuo termoplástico, diseño experimental de composición y los parámetros de procesamiento. Se estableció la metodología de evaluación de propiedades mecánicas, químicas y físicas de las muestras. Estos datos se usaron en una matriz de selección de las muestras, donde aquella con mejor desempeño fue sometida a ensayos complementarios (microscopía, termogravimetría y ángulo de contacto), análisis tecnico-económico y ecoauditoría.

2.1 Evaluación de alternativas de material termoplástico

Con base a la problemática descrita, la proporción y caucho utilizado se mantuvieron fijos, sin embargo, fue necesario seleccionar el tipo de termoplástico con el que se mezclará. Los factores considerados en la evaluación de alternativas fueron:

- **Proporción de los residuos plásticos nacionales.** Se priorizaron los termoplásticos más generados localmente en los últimos años, [37] para atacar los puntos críticos en la crisis de reciclaje.
- **Compatibilidad con GTR:** Se refirió a aquellos con mejor afinidad química en mezclas con GTR >50 % en peso, considerando la calidad de la interfase, elongación de rotura ≥ 100 %, y compression set ≤ 50 %, puesto que son parámetros que caracterizan a un termoplástico elastomérico [28].
- **Reciclabilidad:** Se priorizó aquellos capaces de reprocesarse fácilmente por debajo de los 200 °C (inicio de degradación del GTR), con alta disponibilidad y menor complejidad de reciclaje, considerando la factibilidad técnica del producto.
- **Precio Local:** Se valoraron los termoplásticos reciclados de menor precio comercial referencial para mejorar la rentabilidad del proyecto.

Estos criterios y sus pesos se muestran en la Tabla 2.1. Los parámetros más relevantes en la selección de alternativa termoplástica fueron reciclabilidad y proporción en residuos locales. Esto debido a que el proyecto se enfocó en la factibilidad técnica de la propuesta y aportar a la solución de la crisis de reciclaje local.

Tabla 2.1 Matriz de Criterios de Selección de Material Termoplástico

| Criterios | Reciclabilidad | Compatibilidad con GTR | Porcentaje en residuos locales | Precio (USD/kg) | Suma | Peso |
|--------------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|------|------|
| Reciclabilidad | | 1 | 0,5 | 1 | 2,5 | 42% |
| Compatibilidad con GTR | 0 | | 0 | 0,5 | 0,5 | 8% |
| Porcentaje en residuos locales | 0,5 | 1 | | 1 | 2,5 | 42% |
| Precio (USD/kg) | 0 | 0,5 | 0 | | 0,5 | 8% |
| | | | | Total | 6 | 100% |

Los residuos plásticos más generados a nivel local entre 2019 y 2021 fueron: 1) Tereftalato de Polietileno (PET), 2) Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y 3) Polietileno de Baja Densidad (LDPE). Estos corresponden a envases, fundas, empaques, botellas, entre otros [37], y por lo tanto, estas fueron las alternativas analizadas.

PET: A pesar de ser el residuo más generado, su compatibilidad con el GTR está limitada química y estructuralmente. Este polímero polar posee anillos aromáticos, grupos hidroxilos y carboxílicos, por lo que su uso en termoplásticos elastoméricos es limitado y requiere el uso obligatorio de compatibilizantes como estireno-etileno-butileno-estireno y anhídrido maleico [38]. El PET es uno de los materiales más reciclados a nivel global, sin embargo, es susceptible a la humedad e hidrólisis por ácidos, por lo que su reprocesamiento requiere la eliminación exhaustiva de contaminantes alcalinos y mantenerse en ambientes secos. Además, el PET se conforma a ≥ 260 °C [39], por lo que no podría mezclarse directamente con el GTR.

HDPE : Es un polímero semicristalino apolar, compuesto por una cadena de hidrocarburos y posee energía superficial baja, lo cual afecta su afinidad con otras

sustancias [40] como el GTR. Sin embargo, se han reportado elongaciones superiores [31] a 100% y compression set de 72% [40] en mezclas sin aditivos y con GTR >50 %, por lo que existe gran potencial de formar TPE. Por otro lado, su reciclaje no requiere el control exhaustivo de la humedad, puede procesarse a temperaturas mayores a la de fusión (120-140 °C) y mezclarse con GTR sin experimentar degradación térmica (~ 400°C) [41].

LDPE: Es una versión altamente ramificada del HDPE que también requiere el uso de compatibilizantes elastoméricos o copolímeros [42]. Este ha sido menos estudiado que el HDPE, pero en ciertos trabajos se han evidenciado elongaciones de 58% [42] y compression set bajos [43]. Por otro lado, su reciclaje es más complejo y específico que el HDPE, ya que este residuo es comúnmente usado en fundas y necesita procesos específicos de trituración y aglomerado [44], limitando su disponibilidad. Sin embargo, al igual que el HDPE, este puede mezclarse directamente con el GTR sin degradarse.

Por otra parte, los precios comerciales referenciales del PET [45], HDPE y LDPE son: 0,75 USD/kg, 1,20 USD/kg y 1,21 USD/kg, respectivamente. Sin duda alguna, el material más rentable para el mezclado sería el PET. Sin embargo, a pesar de que todas las alternativas necesitan compatibilizantes, el HDPE y LDPE tienen una polaridad similar al GTR y estructura más sencilla que el PET. Además, la temperatura de reprocesamiento del PET y control de humedad exhaustivo fueron factores que lo descartan frente a las poliolefinas. Finalmente, el HDPE fue elegido como termoplástico ideal porque es un residuo plástico más crítico que el LDPE y presentó mejor desempeño mecánico según los estudios referenciados. El previo análisis se sintetizó en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Matriz de Selección de Alternativas

| Alternativas | Durabilidad | Facilidad de Reciclaje | Porcentaje en Residuos Locales | Precio de Mercado (USD/kg) | Suma | Prioridad |
|--------------|-------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------|-----------|
| rLDPE | 0,014 | 0,071 | 0,000 | 0,214 | 0,300 | 2 |
| rHDPE | 0,043 | 0,071 | 0,119 | 0,214 | 0,448 | 1 |
| rPET | 0,014 | 0,000 | 0,238 | 0,000 | 0,252 | 3 |

Por último, para optimizar las propiedades del material sintetizado con HDPE reciclado y GTR, se evaluó el efecto de EVA reciclado como compatibilizante. Este es un copolímero elastomérico estudiado en sistemas HDPE/GTR [31], LDPE/GTR [46], y ha demostrado una mejora en homogeneidad e interacción GTR-termoplástico. Por último, se analizó la influencia de las fibras textiles de los NFU como relleno, debido a que es un remanente del reciclaje de neumáticos cuyo valor comercial no ha sido explorado en el diseño de productos.

2.2 Materiales

- Caucho de neumático molido con granulometría >1 mm.
- Fibras de textiles (Nylon).
- Polietileno de alta densidad reciclado.
- Etilenvinilacetato reciclado.

2.3 Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño de mezclas fue establecido mediante un modelo factorial total 2x3, el cual permite medir los efectos principales e interacciones de variables independientes sobre variables de respuesta (Tabla 2.3). El estudio estadístico consistió en la aplicación del método de análisis ANOVA con un nivel de significancia del 95%.

Tabla 2.3 Parámetros del Diseño Experimental

| Parámetro | Descripción | | |
|---|--|---|------|
| Factor | A | Porcentaje en peso de fibras de nylon | 0 % |
| | | | 5 % |
| | B | Porcentaje en peso de EVA | 0 % |
| | | | 5 % |
| | | | 10 % |
| | Variables de respuesta | Ensayos mecánicos (flexión, dureza, impacto y compression set) y consumo energético | |
| Nivel de significancia | 5% | | |
| Número de réplicas | 5 | | |
| Hipótesis Nula (H ₀) | La presencia de fibras de nylon, EVA y la interacción de ambos no tienen influencia en las propiedades mecánicas del material. | | |
| Hipótesis Alternativa (H ₁) | La presencia de fibras de nylon, EVA y la interacción de ambos sí tienen influencia en las propiedades mecánicas del material | | |

2.4 Preparación del material

En esta etapa se presentó la composición del material, los parámetros del proceso de homogeneización y las condiciones del moldeo por compresión.

2.4.1 Nomenclatura

La nomenclatura utilizada para la identificación de cada material se presenta en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Nomenclatura para la Identificación de los Materiales

| Material | Denominación |
|--|--------------|
| Caucho de Neumático Molido | GTR |
| Polietileno de Alta Densidad Reciclado | rHDPE |
| Etilvinilacetato Reciclado | rEVA |
| Fibras de nylon | rPA |
| Material Base (rHDPE + GTR) | M |
| Porcentaje en peso de rEVA | X |
| Porcentaje en peso de rPA | Y |
| Código de la Muestra | M-XrEVA-YrPA |

2.4.2 Proporciones e identificación de cada material

Se preparó un total de 0,42 kg de material por cada una de las seis composiciones diferentes presentadas en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Proporciones e Identificación de las Muestras

| Muestra | Contenido porcentual en peso de caucho (%) | Contenido porcentual en peso de rEVA (%) | Contenido porcentual en peso de fibras de nylon (%) |
|---------------|--|--|---|
| M-0rEVA-0rPA | 70 | 0 | 0 |
| M-5rEVA-0rPA | | 5 | 0 |
| M-10rEVA-0rPA | | 10 | 0 |
| M-0rEVA-5rPA | | 0 | 5 |
| M-5rEVA-5rPA | | 5 | 5 |
| M-10rEVA-5rPA | | 10 | 5 |

Es importante resaltar que debido a que el porcentaje de rHDPE depende del residuo entre la variable de control y las variables independientes (Ecuación 2.1). Su efecto no fue analizado, ya que este depende intrínsecamente de las condiciones definidas por las variables independientes.

$$\%rHDPE = \%GTR - (XrEVA + YrPA) \quad (2.1)$$

Por último, se pesaron las cantidades respectivas de rEVA, rPA, GTR y rHDPE en una balanza electrónica de precisión. Sin embargo, debido al carácter higroscópico de las rPA, estas fueron previamente secadas a 80 °C durante 24 horas en un horno de secado para eliminar la humedad [22] y evitar posibles defectos en las muestras o daños en el equipo de mezclado.

2.4.3 Mezclado

Para el fundido y homogeneización de las mezclas descritas previamente, se utilizó un reómetro de torque. Todas las muestras se prepararon a una temperatura de 200 °C en las tres zonas de calentamiento y velocidad de tornillo de 70 rpm en un tiempo de mezcla de 10 minutos. Con estos parámetros se aseguró que todos los materiales se fundan completamente, y se evitó la degradación térmica del GTR [31]. El producto fue peletizado en un molino y almacenado a temperatura ambiente. Por último, este proceso se repitió 12 veces para cada composición con el fin de obtener material suficiente para las siguientes etapas, como se ilustra en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Elaboración de mezclas mediante reómetro de torque

2.4.4 Moldeo por compresión y preparación de probetas

Se utilizó una prensa hidráulica con calentamiento por resistencia eléctrica y un molde cuadrangular que estaba configurado como se evidencia en la Figura 2.2.



Figura 2.2 Prensa hidráulica con control de temperatura

El proceso comenzó con el recubrimiento de láminas de acero galvanizado con una capa de papel aluminio antideslizante para prevenir la adhesión de la mezcla fundida a las placas de la prensa y otorgar un acabado homogéneo. Una vez que la prensa alcanzó los 200 °C, se colocó una de las láminas recubiertas de aluminio (como base) y el molde cuadrangular encima de esta. Se agregaron 0,14 kg del material peletizado y se colocó la segunda lámina encima del molde. En esta etapa, la presión se mantuvo en 0 psi durante 5 minutos para fundir completamente la mezcla.

A continuación, se eliminaron las posibles burbujas mediante un ciclo de presión de 0 a 1500 psi en un periodo de un minuto por 5 veces y, posteriormente, se aumentó la presión a 2000 psi y se mantuvo durante 4 minutos. Por último, la mezcla se enfrió en el molde hasta alcanzar los 100 °C a 2000 psi, y luego el material se sumergió en agua antes de desmoldar.

Para finalizar, las planchas de material resultantes fueron identificadas y troqueladas con base a las dimensiones de las probetas requeridas para los ensayos mecánicos de flexión, compression set e impacto.

2.5 Caracterización del material

La evaluación de las propiedades de los materiales sintetizados se subdivide en ensayos mecánicos, resistencia química y análisis complementarios.

2.5.1 Ensayos mecánicos

En base a los requerimientos de la ASTM F1344 y condiciones de uso, se realizaron los siguientes ensayos:

2.5.1.1 Ensayo de flexión

La normativa aplicada para obtener el módulo de flexión fue la ASTM D790. Para este análisis se utilizaron 5 probetas y el ensayo de tres puntos. La velocidad de prueba fue de 50 mm min^{-1} en condiciones ambientales de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ y humedad relativa inferior a 55.7 %.

2.5.1.2 Ensayo de impacto

La normativa ASTM D256 fue considerada para la evaluación de la resistencia al impacto. Se utilizó la cantidad de energía de impacto absorbida en J/m, y para ensayo se empleó un equipo con péndulo estandarizado y probetas sin muesca V.

2.5.1.3 Dureza

Se midió la dureza Shore tipo A acorde a la norma ASTM D2240 porque es aplicable para cauchos duros o suaves y termoplásticos elastoméricos. De acuerdo a la norma ASTM F1344, la loseta se subclasifica en grado 1 (≥ 85) y grado 2 (< 85 y ≥ 70).

2.5.1.4 Compression set

Este ensayo se realizó para evaluar la capacidad de retención de propiedades elásticas luego de exponerse a esfuerzos de compresión prolongados, por lo que, la minimización del compression set representa mayor recuperación elástica. Se aplicó el método B (deflexión constante) establecido en la norma ASTM D395, considerando las dimensiones requeridas del espécimen y equipos disponibles.

2.5.2 Resistencia a la exposición química a corto plazo

Este estudio se desarrolló acorde a la norma ASTM F925, donde se evalúan los posibles cambios en la apariencia debido a la exposición a las sustancias químicas detalladas en la Tabla 2.6. Estas son representativas de aquellas encontradas en el uso doméstico, comercial e industrial.

Tabla 2.6 Sustancias Químicas del Ensayo ASTM F925

| Denominación | Composición/Concentración en peso |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Vinagre Blanco | 5% Ácido Acético |
| Solución de Hidróxido de Sodio | 5% NaOH |
| Solución de Ácido Clorhídrico | 5 % HCl |
| Solución de Ácido Sulfúrico | 5 % H ₂ SO ₄ |
| Solución de Amoníaco | 5% NH ₄ OH |
| Solución de Cloro Doméstico | 5,25 % NaOCl |

Los criterios para la evaluación del estado de la superficie fueron: embotamiento de la superficie, ataque químico y formación de manchas. Cada uno de estos pueden adoptar 4 posibles valores: 0 (sin cambio), 1 (cambio leve), 2 (cambio moderado) y 3 (cambio severo). Por tanto, aquellas muestras con la menor calificación tendrán mayor resistencia química a corto plazo.

2.6 Matriz de decisión de criterios

En la Tabla 2.7 se muestra la matriz de criterios y los pesos que se han asignado a ensayos mecánicos, resistencia química a corto plazo y consumo energético.

Tabla 2.7 Matriz de Decisión de Criterios

| Matriz de Criterios | Módulo de Flexión | Energía de Impacto | Dureza Shore A | Consumo Energético | Compression Set | Resistencia Química a Corto Plazo | Suma | Peso |
|-----------------------------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------------|-----------------|-----------------------------------|------|--------|
| Módulo de Flexión | | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0,5 | 4,55% |
| Energía de Impacto | 1 | | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 18,18% |
| Dureza Shore A | 1 | 1 | | 1 | 0 | 0,5 | 3,5 | 31,82% |
| Consumo Energético | 0,5 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0,5 | 4,55% |
| Compression Set | 1 | 1 | 1 | 1 | | 0,5 | 4,5 | 40,91% |
| Resistencia Química a Corto Plazo | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 0,5 | | 4 | 36,36% |
| Total | | | | | | | 11 | 100% |

En esta matriz, los criterios con mayor peso fueron la dureza Shore A, compression set y resistencia química a corto plazo, debido a que son parámetros básicos para las losetas detallados en la norma ASTM F1344-2015. El ensayo de impacto tuvo una ponderación de 18,18 % porque el producto es propenso a experimentar impactos de objetos como pesas, discos, etc. Además, este parámetro influye en el confort de los usuarios y reduce la posibilidad de lesiones [47]. Posteriormente, el módulo de flexión y el consumo energético tuvieron el menor peso, porque el primero es una forma análoga de representar la flexibilidad de materiales para pisos resilientes [48] y, el segundo, es información utilizada para los análisis tecno-económico y ambiental.

2.6.1 Análisis complementario

Con base a la comparación de los resultados de cada muestra bajo los criterios de la Tabla 2.7, se determinó la mezcla con mejor desempeño. Esta se sometió a microscopía electrónica de barrido, termogravimetría y medición de ángulo de contacto para estudiar la microestructura, comportamiento térmico y reciclabilidad, y compatibilidad entre fases, respectivamente.

2.6.1.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se observó la microestructura del material mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM). El equipo fue operado en modo de bajo vacío con un voltaje de 10-20 kV, spot de 2-4 y detector BSED.

2.6.1.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

Se investigó la estabilidad térmica mediante un análisis termogravimétrico. El análisis se realizó con una tasa de calentamiento de 10 °C/min de 25 a 700 °C en una atmósfera controlada de nitrógeno.

2.6.1.3 Medición del ángulo de contacto

Para la compatibilidad entre fases, se midió el ángulo de contacto de los componentes de la muestra con el mejor desempeño, utilizando un analizador

óptico. Se empleó agua y dimetilsulfóxido como líquidos base y se reportaron los valores promedio de cinco mediciones para cada muestra a 20 °C.

Se usó la ecuación de media armónica [31] para calcular tensión interfacial (mN/m) entre cada par de componentes en el sistema, de la siguiente forma:

$$\gamma_{ij} = \gamma_i + \gamma_j - \frac{4\gamma_i^d \gamma_j^d}{\gamma_i^d + \gamma_j^d} - \frac{4\gamma_i^p \gamma_j^p}{\gamma_i^p + \gamma_j^p} \quad (2.2)$$

Donde:

- γ_{ij} es la tensión interfacial entre componentes i y j
- γ_i es la tensión superficial del material i
- γ_i^d y γ_i^p son la contribuciones dispersiva y polar de la tensión superficial del material i

En este contexto, la minimización de tensiones interfaciales entre pares causa la migración de un componente sobre la superficie de otro, por lo que es posible identificar afinidad entre polímeros. Sin embargo, la morfología puede predecirse a través del coeficiente de esparcimiento (λ_{ijk}), y para un sistema con dos fases discretas menores (*j* y *k*) en una matriz (*i*), este se define como [49]:

$$\lambda_{ijk} = \gamma_{ik} - \gamma_{ij} - \gamma_{jk} \quad (2.3)$$

Donde γ son las tensiones interfaciales entre pares calculadas previamente; y la morfología ideal se da cuando $\lambda_{ijk} > 0$ pues se produce interacción o un mojado completo (estructura núcleo-carcasa) [50] entre fases dentro de una matriz.

2.7 Análisis tecno-económico

Se efectuó un estudio tecno-económico para la producción de losetas a base del material con mejor calificación de la matriz de decisión. En el estudio se incluyó la estimación del capital total de inversión y rentabilidad del proyecto mediante la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Valor Actual Neto (VAN) y el Período de Retorno de Inversión (PRI), según la metodología propuesta por [35], cuyas ecuaciones se detallan en el APÉNDICE A.

2.8 Cálculo de huella de carbono y demanda energética

Se llevó a cabo una ecoauditoría de la huella de carbono y la demanda energética del producto final, utilizando la metodología de Ashby [51]. Este método permite evaluar de forma rápida la demanda energética y las emisiones de carbono de la vida útil de un producto. Las fases del análisis se basaron en material, manufactura, transporte, uso y tipo de disposición para el producto final, según las ecuaciones de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Ecuaciones empleadas en la ecoauditoría

| | |
|--|--|
| Energía y huella de carbono por disposición | $E_{disposición} = E_{Re} + E_C [MJ/kg]$ (2.4) |
| | $CO_{2disposición} = 0.07 * E_{disposición} [kg CO_2]$ (2.5) |
| Energía y huella de carbono al fin de la vida (End of Life, EoL) | $H_r = r(\tilde{H} - H_{RC}) [MJ/kg]$ (2.6) |
| | $CO_{2r} = r(\tilde{C} - C_{RC}) [kg/kg]$ (2.7) |
| Energía y huella de carbono efectiva | $\tilde{H} = RH_{RC} + (1 - R)H_m [MJ/kg]$ (2.8) |
| | $\tilde{C} = RH_{RC} + (1 - R)C_m [kg/kg]$ (2.9) |

- E_{Re} y E_C son la energía equivalente por recolección y clasificación de materiales, respectivamente. r es el contenido de reciclaje final al ciclo de vida. H_{RC} y C_{RC} son la energía y huella de carbono incorporada en el proceso de reciclaje, respectivamente. H_m y C_m son la energía y huella de carbono incorporada de material virgen, respectivamente. R es el contenido inicial de material reciclado al inicio de la vida.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se analizaron los resultados de los ensayos mecánicos, químicos y de consumo energético para la elaboración de losetas, a través de un estudio estadístico para determinar si existe diferencia significativa entre los factores propuestos y las propiedades analizadas. Se presentan resultados de caracterización termogravimétrica, microscópica, compatibilidad y un análisis económico-ambiental para la producción de losetas de la mejor alternativa.

3.1 Ensayo de Flexión

La Figura 3.1 muestra el módulo de flexión de las muestras con diferentes porcentajes de rEVA y rPA. En vista de que la aplicación requiere materiales flexibles, la formulación destacada con menor módulo fue M-10rEVA-5rPA con 69,14 MPa y la más rígida fue M-0rEVA-0rPA con 159,90 MPa. Con base al diagrama de Pareto de los efectos estandarizados (APÉNDICE C), los factores con influencia significativa en esta propiedad fueron el porcentaje rEVA y rPA, individualmente.

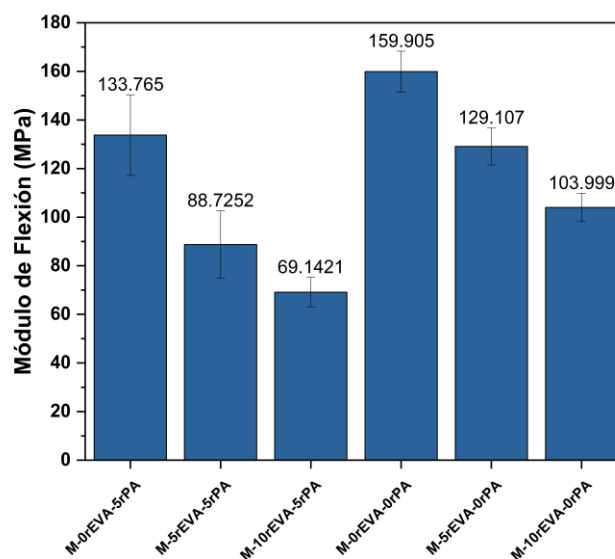


Figura 3.1 Módulo de flexión

En el caso del rEVA, el incremento de flexibilidad se vincula a su carácter compatibilizante, capaz de formar interacciones intermoleculares con el GTR [52] y rHDPE [53] que facilitan la adherencia entre fases y mejora la deformabilidad del compuesto. Otro factor importante es la posible del reducción del módulo de flexión del rEVA [54] debido a la variación de su cristalinidad al reprocesarse [53]. En el caso de las fibras, la reducción del módulo se debe a que, al agregarse, estas reemplazan parte del rHDPE dentro de la formulación. No obstante, estos resultados aún señalaron una mayor rigidez en comparación con lo reportado en estudios similares [14], [55], [56]. Esto podría asociarse a aditivos [57] y entrecruzamiento o degradación [58] del rEVA durante su obtención, y/o por la movilidad limitada de los polímeros causada por las fibras rPA.

3.2 Ensayo de Impacto

En la Figura 3.2 se ilustra la cantidad de energía de impacto absorbida de cada material. Aunque ninguno de los especímenes sufrió fractura, la muestra con mejor desempeño en impacto fue M-10rEVA-0rPA con 247,9 J/m, en contraste con M-5rEVA-5rPA, que absorbió 160,4 J/m. Además, la mayoría de las muestras con rPA no alcanzaron el umbral de energía absorbida para TPE de 175 J/m [19]. De acuerdo con el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados (APÉNDICE C), los factores con influencia en este parámetro fueron rEVA y rPA, individualmente.

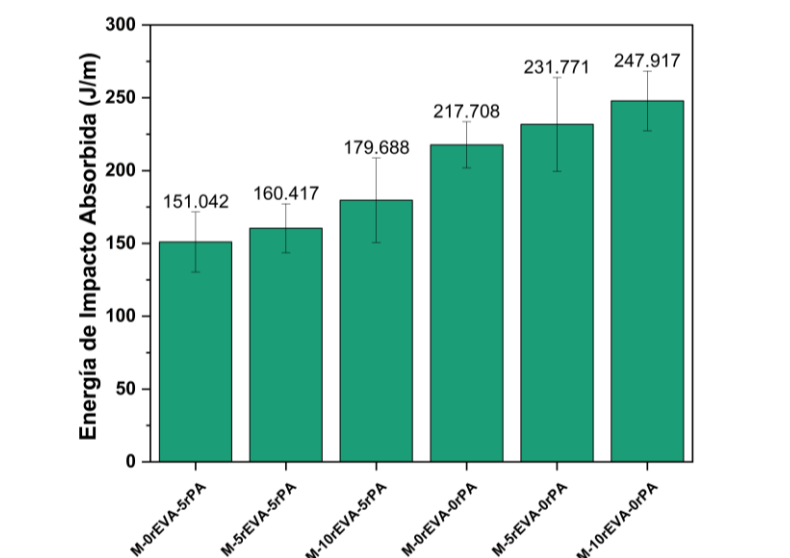


Figura 3.2 Energía de Impacto Absorbida

Estos resultados señalaron que el compatibilizante tuvo un efecto positivo en la absorción de energía de impacto. Según [59], adicional al carácter elastomérico del rEVA, este copolímero disminuye la energía perdida en interfases rEVA-rHDPE-GTR durante el impacto. Estos resultados fueron positivos porque el aumento de la energía de impacto absorbida es fundamental para la prevención de lesiones por caídas [60], y la absorción de fuerza generada por extremidades inferiores [61]. Esto fue contrario a la interfase con rPA, donde existe mayor probabilidad de aglomeración y porosidad por la incompatibilidad estructural [52], [55] ocasionando que el compuesto se debilite y facilite el agrietamiento.

3.3 Dureza Shore A

Esta propiedad está influenciada principalmente por el módulo elástico y el grado de entrecruzamiento del caucho [62], por lo que al usar 70% de GTR del mismo tipo en todas las muestras, la Figura 3.3 demuestra relativa homogeneidad entre ellas. No obstante, el análisis estadístico señaló que el aumento del porcentaje de rPA y rEVA redujeron la dureza del material (APÉNDICE C). Esto podría vincularse a la reducción en el porcentaje de rHDPE al agregar rEVA y rPA. Por ejemplo, la dureza disminuyó 6,53 puntos cuando el porcentaje de rHDPE fue de 30% a 15% en M-0rEVA-0rPA y M-10rEVA-5rPA, respectivamente.

De acuerdo a [63], los polímeros con menor dureza podrían restituir energía hacia el usuario y evitar su fatiga, debido a su carácter visco-elástico, por ende, M-10rEVA-5rPA tuvo el mejor desempeño. Además, a pesar de que las durezas encontradas coinciden con lo obtenido en estudios de TPE con GTR [31], [64], estas superan lo reportado en losetas comerciales internacionales para actividades deportivas [65]–[67], lo cual limita su competitividad en este sector. Esta variación podría asociarse a que la dureza del rEVA cambia con el índice de fluidez [54], el cual podría fluctuar al reprocesarse [68].

Finalmente, las losetas fabricadas con los materiales sintetizados se catalogarían como Grado 1 según ASTM F1344, ya que las durezas fueron superiores a 85 Shore A. Según la norma ISO 16905 [69], el material podría usarse en aplicaciones

industriales ligeras de tráfico general y alto, como pasillos de producción y ensamblaje con bajo tráfico vehicular.

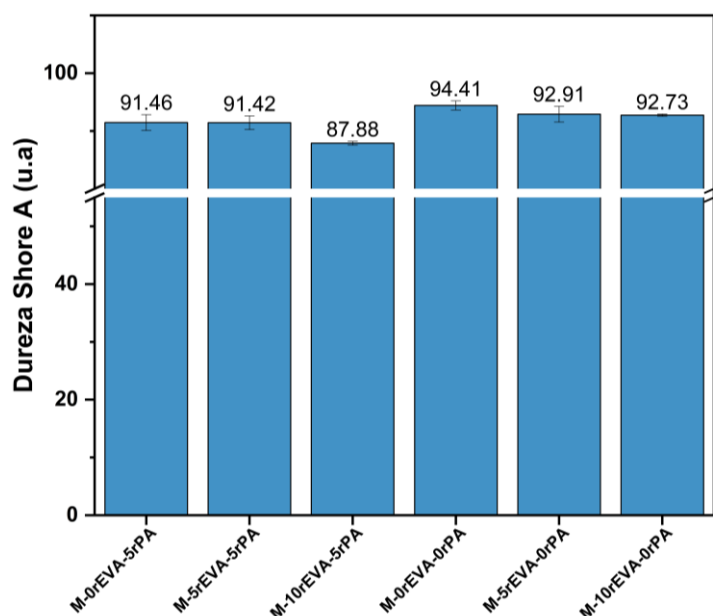


Figura 3.3 Dureza Shore A

3.4 Compression Set

Con base a la Tabla 3.1, las formulaciones con desempeño positivo fueron las de bajo compression set, puesto que valores mínimos implican mayor capacidad de recuperación elástica. En consecuencia, M-0rEVA-0rPA destacó con 36,67% al ser la única muestra que estuvo por debajo del límite de 50 % para TPE [43].

Adicionalmente, no se identificó una tendencia clara en los resultados, ya que esta propiedad está influenciada por múltiples factores como el grado de entrecruzamiento del caucho, homogeneidad, cristalinidad [70], tipo de termoplástico [71], entre otros. Sin embargo, es probable que las fibras y el rEVA, aumentaron la heterogeneidad [72] y/o permitieron cierta deformación plástica del compuesto [70], respectivamente.

Tabla 3.1 Compression Set

| Muestra | Compression Set (%) | Desviación Estándar |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| M-0rEVA-5rPA | 61,82 | 1,82 |
| M-5rEVA-5rPA | 80,16 | 8,73 |
| M-10RrEVA-5rPA | 57,14 | 7,14 |
| M-0rEVA-0rPA | 36,67 | 3,33 |
| M-5rEVA-0rPA | 61,93 | 3,59 |
| M-10rEVA-0rPA | 51,79 | 0,06 |

3.5 Resistencia a Exposición Química a Corto Plazo

Se evaluó la resistencia química para cada muestra en 7 sustancias comunes de uso industrial, doméstico y comercial tras 1 hora de exposición. Ningún cambio superficial fue observado en términos de embotamiento, ataque químico o formación de manchas, por lo que no se consideró dentro de los criterios en la selección de material con mejor desempeño. Esta reactividad limitada de los materiales fue causada principalmente por el entrecruzamiento en el GTR y la ausencia de grupos funcionales o sitios activos en el rHDPE [73].

3.6 Consumo Energético Específico

Se estableció que una procesabilidad óptima es representada mediante la minimización del consumo energético específico. Según la Figura 3.4, el material con menor consumo fue M-0rEVA-0RPA y el de mayor consumo fue M-10rEVA-5RPA. Este contraste demostró que al agregar fibras y compatibilizante, aumenta la energía necesaria para la homogeneización del material. Esto se debe a la aglomeración de fibras y, reducción del volumen libre y restricción de movilidad al adicionar rEVA [74]. Este comportamiento se evidenció también en las curvas torque en función de tiempo consideradas para el cálculo de la energía consumida (APÉNDICE B), donde los valores de torque más bajos pertenecieron a la muestra sin ningún agregado. Finalmente, la influencia de rPA y rEVA fue corroborada con el análisis estadístico (APÉNDICE C).

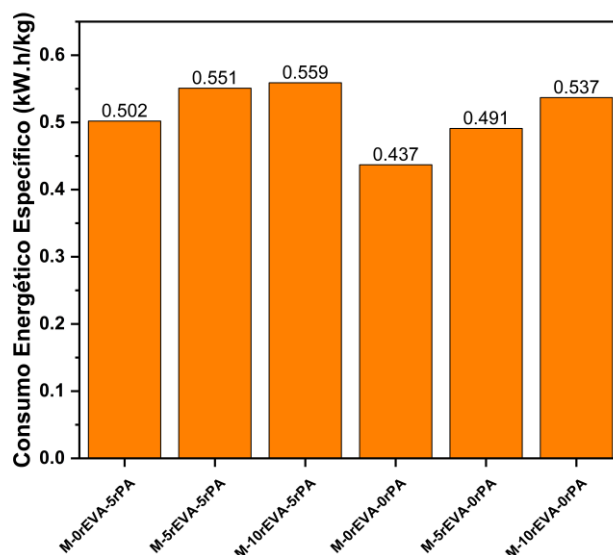


Figura 3.4 Consumo Energético Específico

3.7 Selección del Material con Mejor Desempeño

La Tabla 3.2 representa la matriz de selección de alternativas de material obtenida tras comparar los resultados dentro de 5 categorías. Esta fue construida con base a los pesos asignados en la Tabla 3.2, otorgando una calificación de 0, 0,5 y 1 al comparar entre muestras. La opción con mejor calificación fue M-10rEVA-0rPA.

Tabla 3.2 Matriz de Selección de Alternativas

| Muestras | Módulo de Flexión | Energía de Impacto Absorbida | Dureza Shore A | Consumo Energético Específico | Compression Set | Suma | Prioridad |
|---------------|-------------------|------------------------------|----------------|-------------------------------|-----------------|-------|-----------|
| M-0rEVA-5rPA | 0,003 | 0,000 | 0,060 | 0,010 | 0,053 | 0,127 | 4 |
| M-5rEVA-5rPA | 0,007 | 0,013 | 0,080 | 0,003 | 0,000 | 0,103 | 6 |
| M-10rEVA-5rPA | 0,017 | 0,027 | 0,100 | 0,000 | 0,080 | 0,223 | 2 |
| M-0rEVA-0rPA | 0,000 | 0,040 | 0,000 | 0,017 | 0,133 | 0,190 | 3 |
| M-5rEVA-0rPA | 0,010 | 0,053 | 0,020 | 0,013 | 0,027 | 0,123 | 5 |
| M-10rEVA-0rPA | 0,013 | 0,067 | 0,040 | 0,007 | 0,107 | 0,233 | 1 |

3.8 Microscopía Electrónica de Barrido

Se analizó la microestructura del material seleccionado y M-0rEVA-0rPA bajo diferentes magnificaciones (500X y 2500X). Figura 3.5a corresponde a M-rEVA-0rPA, en la cual se observó partículas de caucho con superficie lisa rodeadas del termoplástico reciclado. Sin embargo, el espacio presente entre estas fases (Figura

3.5b) reflejó su incompatibilidad. Además, esta superficie de fractura mostró que las partículas de caucho se separaron con facilidad del rHDPE, dejando un espacio intacto en el mismo como se reporta en [31]. En contraste, la Figura 3.5c y Figura 3.5d son micrografías del material seleccionado (con 10% rEVA) que presentan mejor interacción. La fase rEVA-rHDPE tuvo mayor deformación plástica gracias al compatibilizante y cubrió de manera más uniforme a la fase elastomérica. No obstante, aún se evidenciaron espacios alrededor de partículas de caucho de mayor tamaño. Estos podrían reducirse mediante tratamientos superficiales avanzados (físicos o químicos) del GTR [40].

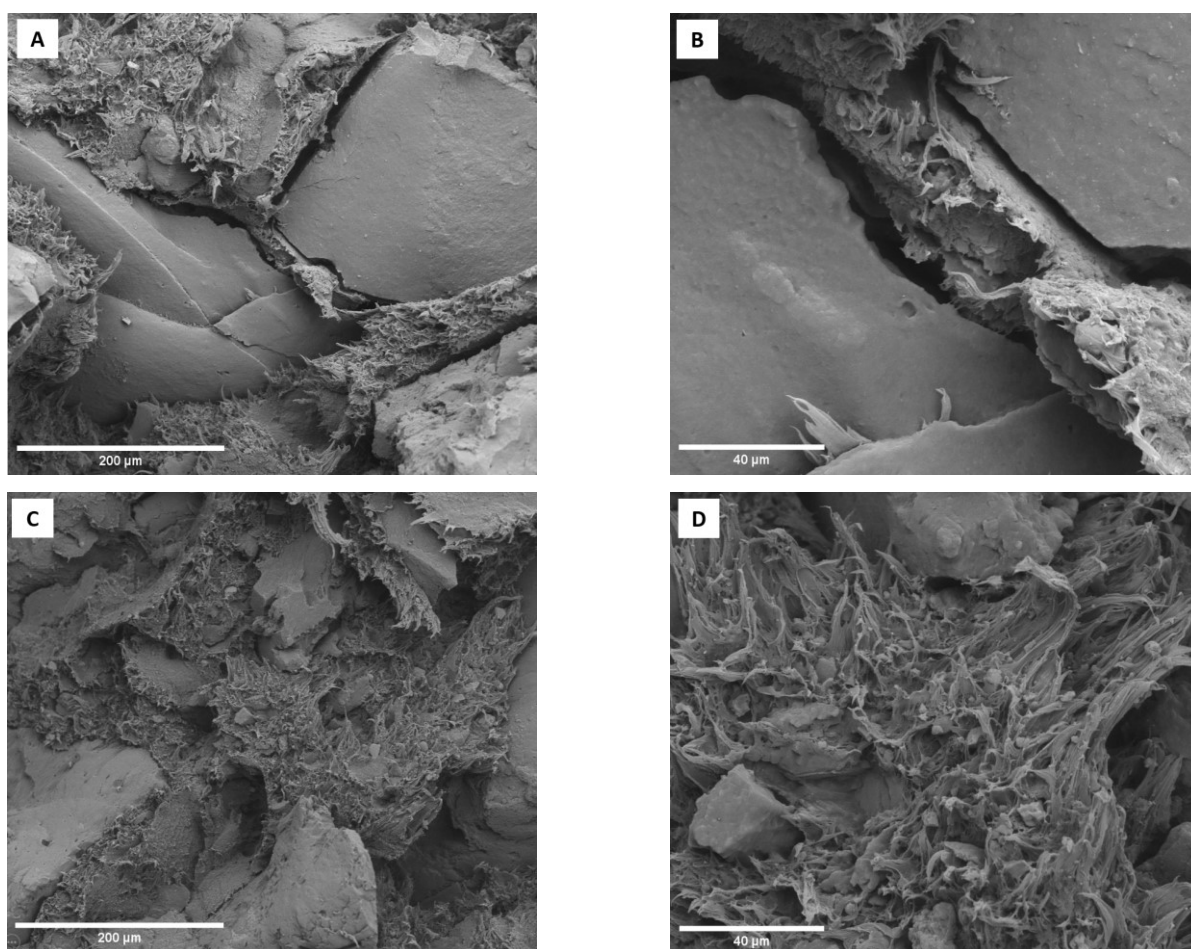


Figura 3.5 Micrografías SEM de a) y b) M-0Reva-0rPA (500X y 2500X), c) y d) M-10rEVA-0rPA

3.9 Análisis Termogravimétrico

La Figura 3.6a muestra la curva termogravimétrica del material seleccionado y, a modo de comparación, se incluyeron M-0REVA-0RPA y M-10rEVA-5rPA. Inicialmente se observó la salida de volátiles de aceites de procesamiento o aditivos como una reducción de 18-20 % del peso cerca de los 50 °C. A continuación, se produjo una pérdida de masa de 43,4 %, asociada a la degradación térmica de los elastómeros naturales, sintéticos, y del termoplástico reciclado [75], [76] entre 380 °C - 480 °C. Los componentes restantes (38%) fueron el negro de carbono y rellenos inorgánicos como sílice. En consecuencia, es posible que el material posea estabilidad térmica suficiente para poder ser reprocesado bajo las mismas condiciones con las que se sintetizó. Por último, la Figura 3.6b representa la derivada del cambio del peso respecto a la temperatura, y a partir de esta no se encontró variación significativa en la posición de los picos debido a la presencia de rEVA y/o rPA.

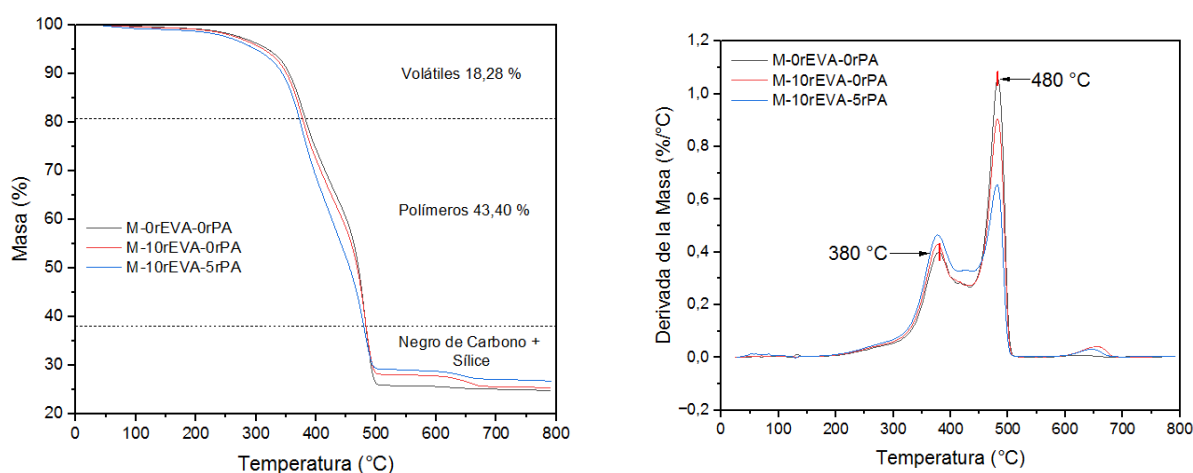


Figura 3.6 a) Curva Termogravimétrica y b) Derivada de la Masa respecto a la Temperatura de Materiales Sintetizados

3.10 Ángulo de Contacto

Se obtuvo la tensión interfacial entre los componentes de M-10rEVA-0rPA y los coeficientes de esparcimiento para conocer la morfología de las fases [77]. Con base a la Tabla 3.3, existe gran inmiscibilidad en el par GTR/rHDPE considerando su alta tensión interfacial (5,98 mN/m) y valor negativo de coeficiente (-3,69), por lo que estos materiales tendieron a separarse.

La menor energía de rHDPE/rEVA, respecto a GTR/rEVA y GTR/rHDPE; y un coeficiente positivo (2,43), sugieren que el sistema es termodinámicamente más estable cuando el rEVA encapsula el rHDPE en la matriz de caucho. Esta morfología se podría explicar gracias a las interacciones intermoleculares de dispersión de London entre segmentos etileno del rHDPE y rEVA, y fuerzas de Van der Waals entre el acetato del rEVA [53] y muy escasos grupos funcionales con oxígeno en la superficie del GTR [52].

Tabla 3.3 Tensión Interfacial y Coeficiente de Esparcimiento entre Componentes

| Pares de Polímeros | Tensión Interfacial (mN/m) | Coefficiente de Esparcimiento |
|--------------------|----------------------------|-------------------------------|
| GTR/rHDPE | 5,98 | -3,69 |
| GTR/rEVA | 2,92 | -8,26 |
| rHDPE/rEVA | 0,63 | 2,43 |

3.11 Proceso de Manufactura Propuesto

El proceso básico de manufactura propuesto se centró en el material escogido en la sección 3.7 mediante extrusión y moldeo por compresión en frío, como se ilustra en la Figura 3.7. Esto debido a la capacidad de procesamiento por fusión y reciclabilidad de los TPE [78]. El dimensionamiento del producto (Figura 3.8) se basó en la oferta actual de losetas de caucho [79]. Finalmente, se elaboró un análisis tecno-económico y ambiental con el fin de valorar la viabilidad del proyecto y, comparar el impacto de huella de carbono con el proceso convencional (conformado de GTR con resinas epóxicas) [11].

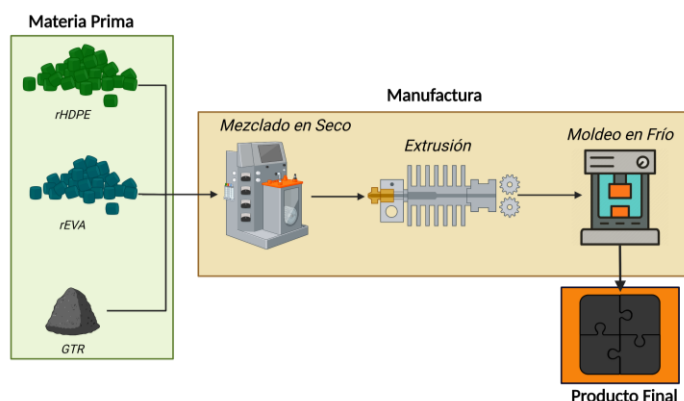


Figura 3.7 Proceso propuesto de producción de losetas de caucho

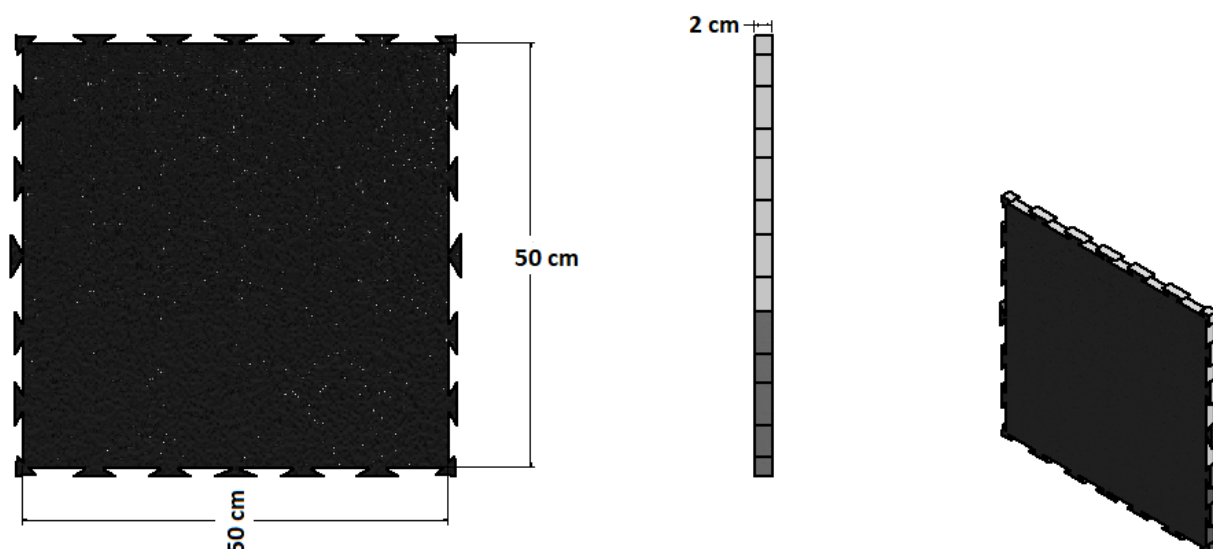


Figura 3.8 Diseño y dimensionamiento de losetas de caucho

3.11.1 Análisis Tecno-económico

Se basó en el estudio de parámetros financieros: TIR, VAN y PRI. Se consideraron como factores de inversión: maquinaria, mano de obra, consumo energético y materia prima [35], así mismo, se tomó en cuenta la tasa de descuento, tasa impositiva e inflación.

En la Tabla 3.4 se contempla la inversión inicial estimada para la puesta a punto de una planta de procesamiento de plásticos.

Tabla 3.4 Estimación de capital de inversión fijo inicial

| Equipo | Costo estimado (USD) |
|--|----------------------|
| Extrusora de tornillo doble con capacidad de 120 kg/h [80] | 35,000.00 |
| Máquina de moldeo por compresión para losetas de caucho con presión de cierre de 30 t [81] | 13,020.00 |
| Total | 48,020.00 |

Los resultados de la Tabla 3.5 fueron calculados considerando una producción diaria de 800 kg de material en base a la demanda actual de empresas manufactureras de losetas. Además, se incluyeron sueldos básicos para 5 trabajadores, alquiler de planta de 900 USD/mes y un precio de venta de 30 USD/m², en base a los precios actuales del mercado [79].

Tabla 3.5 Resultados de Análisis Tecno-económico de producción de losetas de caucho

| Tiempo de Retorno | TIR (%) | VAN (USD) |
|-------------------|---------|------------|
| 2 años y 5 meses | 46,87 | 117,050.61 |

Análisis realizado para una proyección de 10 años. Los costos incluidos fueron calculados de forma anual, con una tasa de descuento del 8.49% [82].

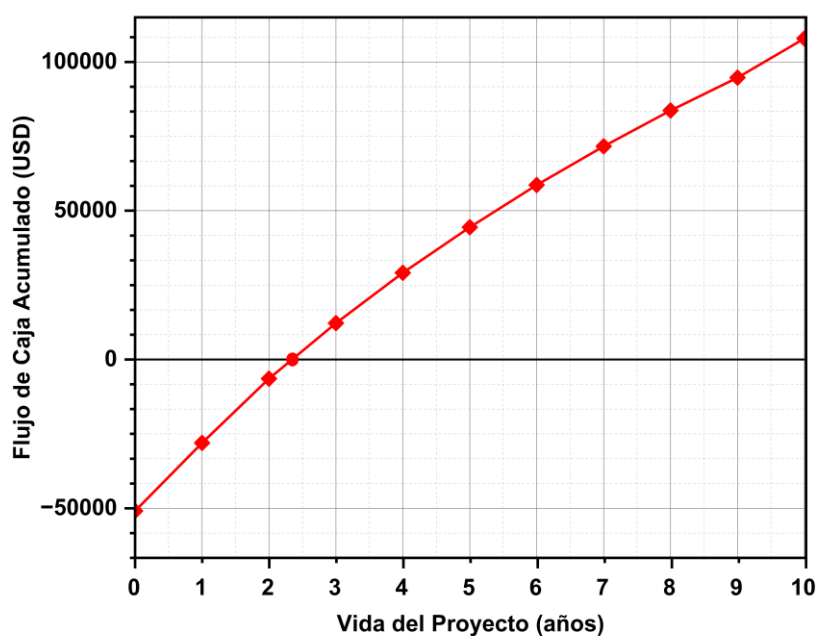


Figura 3.9. Diagrama de Flujo de Caja en función del tiempo de proyecto

El VAN de la Tabla 3.5 reflejó un valor positivo y elevado, lo cual implica que el proyecto sea rentable [83] [83]. Por otro lado, se obtuvo un TIR aproximado del 46%, siendo este valor mayor a la tasa de descuento, proyectando una alta obtención de ganancias netas. Por último, el anteproyecto demostró un período de recuperación de inversión de 25% del tiempo de vida establecido, lo cual se observó en la Figura 3.9, donde durante el primer año se produjo una salida de dinero relacionada a los gastos de capital fijo y fondos rotatorios [84]. Luego de este período, se evidenció un aumento en los flujos de caja hasta alcanzar un valor máximo en el año 10.

3.11.2 Ecoauditoría

Se evaluó la demanda energética y huella de carbono para la obtención de 1 m² de losetas de caucho, comparando la metodología propuesta y la convencional (mezclado en frío y compresión en caliente en tiempos prolongados) a lo largo de su ciclo de vida. Con base en la Figura 3.10, se evidenció que implementar el proceso propuesto representa un ahorro global del 32,27 % y 21,49 % en demanda energética y huella de carbono, respectivamente. Esta diferencia se debe principalmente al proceso de manufactura, tipo de materiales y su reciclabilidad [85].

El efecto positivo del uso de materias primas recicladas se reflejó en la fase *Material*, esto por su alta accesibilidad y fácil preprocesamiento [51], causando una reducción en demanda energética (19%) y huella de carbono (13%).

Los resultados de la etapa *Manufactura* señalaron la ineficiencia energética del proceso convencional respecto al proceso propuesto, empero, su huella de carbono fue 15% inferior debido a la menor cantidad de componentes.

Por último, la reciclabilidad de M-10rEVA-0rPA permite que este posea una fracción de reciclado inicial para la elaboración de otro producto, a diferencia de los materiales termoestables convencionales [33]. En consecuencia, esta característica se tradujo en crédito en las variables ambientales al final de su vida (EoL) [51].

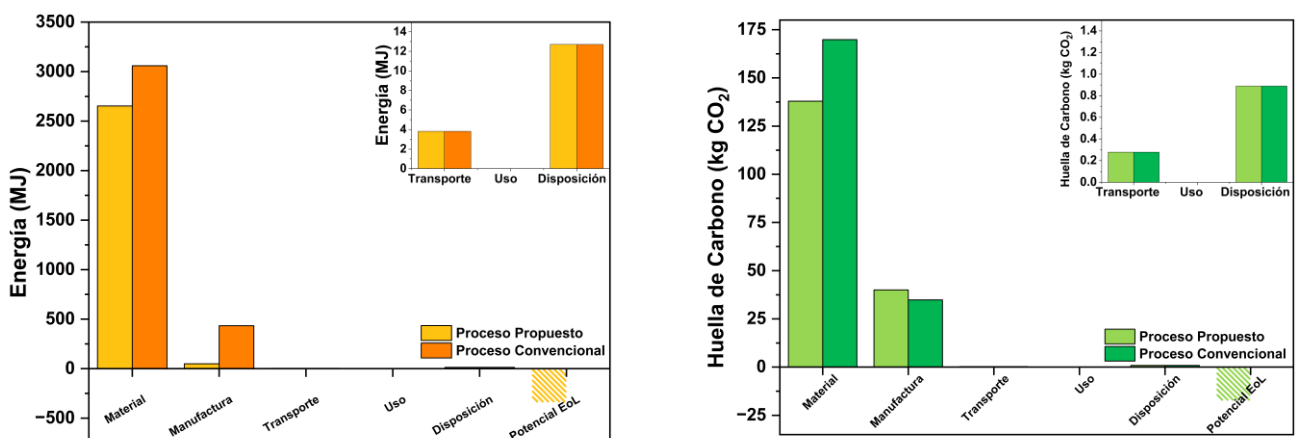


Figura 3.10 Ecoauditoría de a) Demanda Energética y b) Huella de Carbono

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se diseñó un material termoplástico elastomérico a partir de caucho neumático granulado y termoplásticos reciclados. Mediante un diseño factorial 3x2 y una matriz de decisión, se logró definir a la mezcla M-10rEVA-0rPA como la composición ideal para la producción de losetas de caucho, considerando condiciones de servicio en referencia a la normativa ASTM F1344. Este material fue procesado mediante fusión a 200 °C y 70 rpm durante 10 minutos, y tuvo excelente desempeño mecánico y químico.

El material es flexible (103,99 MPa) y tiene gran capacidad de absorción de energía de impacto (247,9 J/m) gracias al efecto compatibilizante del rEVA entre rHDPE y GTR. Esto resulta positivo porque es fundamental a nivel ergonómico como la prevención de lesiones por caídas. Por otra parte, el compression set fue aceptable (51,79%), considerando el umbral para TPE y que es una propiedad influenciada por múltiples factores intrínsecos a los componentes. Por último, la dureza del material alcanzada (92,73) implica mayor capacidad de restitución de energía hacia el usuario y, acorde a normativas internacionales, podría ser usada a nivel industrial. Además, este material mostró excelente resistencia a la exposición química a corto plazo gracias a la baja reactividad de sus componentes.

Por otra parte, el aumento del consumo energético específico en la composición seleccionada (0,537 kWh/kg) respecto al material base (0,437 kWh/kg), se asoció con la reducción del volumen libre en la mezcla fundida al agregar el compatibilizante. Este punto por mejorar se contrarresta considerando la información de los ensayos complementarios. Con base a la medición de ángulo de contacto y micrografías SEM, se encontró una morfología termodinámicamente estable, constituida por rHDPE encapsulada con rEVA en matriz de GTR. Es decir, el rEVA optimizó la transferencia de esfuerzos, adhesión, dispersión y estabilidad

entre fases. Adicionalmente, el análisis termogravimétrico señaló que el material sufre degradación de polímeros entre 380-480 °C, por lo que podría reprocesarse.

Mediante una ecoauditoría se pudo comparar las emisiones de dióxido de carbono y demanda energética para las metodologías de producción de losetas analizadas en la sección 3.11, obteniéndose un ahorro del 32,27% y 21,49%, respectivamente, evidenciando un menor impacto ambiental de la metodología de producción propuesta respecto a la convencional, donde los factores con más influencia fueron el uso de materiales 100% reciclados y menor requerimiento de energía para la extrusión del material seleccionado.

Por último, bajo el proceso de manufactura presentado en la Figura 3.7, una inversión estimada de 48 mil dólares y un precio de venta de losetas de 30 USD/m², se obtuvo un TIR del 46,87%, con un VAN mayor que cero y un PRI de 2 años y 5 meses, pudiéndose concluir que el anteproyecto tiene una alta viabilidad económica en el mercado local.

4.2 Recomendaciones

- Someter al material seleccionado a ensayos adicionales indicados en la norma ASTM F1344, como resistencia al calor, abrasión, y estabilidad dimensional; para asegurar el cumplimiento y calidad total del producto.
- Analizar aspectos no mecánicos de las losetas como la capacidad de transmisión de sonido de impacto, coeficiente de reducción de ruido, y flamabilidad del material para garantizar la seguridad y confort del usuario.
- Complementar la ecoauditoría realizada con un análisis de ciclo de vida de 1 m² de loseta, contemplando todas las etapas de entradas y salidas durante su fabricación, además, considerar factores de emisión de CO₂, para así poder obtener una comparación más completa frente a la elaboración de losetas de caucho actuales.

- Analizar el efecto del reprocesamiento del material de las losetas en sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas, mediante ensayos que permitan conocer el comportamiento mecánico, reológico y morfológico; para poder identificar grados de degradación en diferentes ciclos de homogeneizado y conocer cuantas veces el material puede ser reprocesado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Patrício, Y. Andersson-Sköld, and M. Gustafsson, “End-of-life tyres applications: technologies and environmental impacts (VTI rapport 1100A),” 2021. Accessed: Oct. 15, 2022. [Online]. Available: <http://vti.diva-portal.org/smash/get/diva2:1611409/FULLTEXT01.pdf>.
- [2] HCH, “Waste Management un the LATAM region. Business Opportunities for the Netherlands in Waste/Circular Economy sector in eight countries of Latin America,” p. 85, 2021.
- [3] L. Naranjo, “Ecuador importó \$ 3,6 millones en reciclado plástico,” *El Universo*, Jun. 21, 2019.
- [4] M. F. Solíz, “La Red Basura Cero Ecuador se pronuncia frente a la Importación de plásticos en Ecuador,” *Global Alliance for Incinerator Alternatives*, Oct. 2011. <https://www.no-burn.org/la-red-basura-cero-ecuador-se-pronuncia-frente-a-la-importacion-de-plasticos-en-ecuador/> (accessed Oct. 15, 2022).
- [5] PLAN V, “¿Cuáles son las ciudades de Ecuador con la peor gestión de su basura?,” *PLAN V*, Jul. 25, 2022.
- [6] INEN, “Disposición de desechos plásticos post-consumo: Requisitos,” *Inst. Ecuatoriano Norm.*, p. 14, 2012, [Online]. Available: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/NTE-INENE-2634-Plasticos-post-consumo.pdf>.
- [7] T. B. Edil, “A review of environmental impacts and environmental applications of shredded scrap tires,” *Proc. Int. Work. Scrap Tire Deriv. Geomaterials - Oppor. Challenges, IW-TDGM 2007*, pp. 3–18, 2008.
- [8] S. Magni *et al.*, “Ecological Impact of End-of-Life-Tire (ELT)-Derived Rubbers: Acute and Chronic Effects at Organism and Population Levels,” *Toxics*, vol. 10, no. 5, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/toxics10050201.
- [9] V. Sorgato, “Llantas, un desecho peligroso y reciclable,” *El Comer.*, no. 1, p. 1, 2016, Accessed: Oct. 16, 2022. [Online]. Available: <https://www.elcomercio.com/tendencias/sociedad/llantas-desecho-reciclaje-contaminacion-medioambiente.html>.
- [10] EL UNIVERSO, “A nivel económico y social, el reencauche de llantas es beneficioso,” 2021. <https://www.eluniverso.com/larevista/sociedad/a-nivel-economico-y-social-el-reencauche-de-llantas-es-beneficioso-nota/> (accessed Oct. 16, 2022).
- [11] “Ecocaucho - Primera opción de productos de caucho en Ecuador.” <https://www.ecocaucho.com.ec/> (accessed Oct. 16, 2022).
- [12] Biocaucho, “Empresa líder en productos de caucho en Ecuador - Biocaucho,” 2015. <https://biocaucho.com.ec/> (accessed Oct. 16, 2022).
- [13] “Home - ambi.” <https://ambiecuador.com/> (accessed Oct. 16, 2022).
- [14] A. Fazli and D. Rodrigue, “Waste Rubber Recycling: A Review on the Evolution and Properties of Thermoplastic Elastomers,” *Mater. 2020, Vol. 13, Page 782*, vol. 13, no. 3, p. 782, Feb. 2020, doi: 10.3390/MA13030782.

- [15] A. S. Mohite, Y. D. Rajpurkar, and A. P. More, "Bridging the gap between rubbers and plastics: a review on thermoplastic polyolefin elastomers," *Polymer Bulletin*, vol. 79, no. 2. pp. 1309–1343, 2022, doi: 10.1007/s00289-020-03522-8.
- [16] P. Toensmeier, "Plastics and the Circular Economy," *Plast. Eng.*, vol. 76, no. 6, pp. 12–15, 2020, doi: 10.1002/peng.20326.
- [17] N. Gao, F. Wang, C. Quan, L. Santamaria, G. Lopez, and P. T. Williams, "Tire pyrolysis char: Processes, properties, upgrading and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 93, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.PECS.2022.101022.
- [18] Continental Reifen, "Tyre Basics: Passenger Car Tyres," *Tdc 06/2008*, pp. 1–30, 2013, Accessed: Oct. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.continental-tires.com/car/media-services/downloads>.
- [19] A. Fazli and D. Rodrigue, "Recycling waste tires into ground tire rubber (Gtr)/rubber compounds: A review," *J. Compos. Sci.*, vol. 4, no. 3, 2020, doi: 10.3390/JCS4030103.
- [20] U.S. Tire Manufacturers Association, "What's In a Tire | U.S. Tire Manufacturers Association," 2021. .
- [21] A. Fazli and D. Rodrigue, "Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (GTR) / Rubber Compounds : A Review," 2020.
- [22] R. C. V. Fletes, E. O. C. López, P. O. Gudiño, E. Mendizábal, R. G. Núñez, and D. Rodrigue, "Ground tire rubber/polyamide 6 thermoplastic elastomers produced by dry blending and compression molding," *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 38–55, Feb. 2022, doi: 10.1177/14777606211038956.
- [23] M. M. Hassan, N. A. Badway, A. M. Gamal, M. Y. Elnaggar, and E. S. A. Hegazy, "Studies on mechanical, thermal and morphological properties of irradiated recycled polyamide and waste rubber powder blends," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 268, no. 9, pp. 1427–1434, May 2010, doi: 10.1016/j.nimb.2010.01.021.
- [24] A. V. Kaliyathan, V. KM, A. S. Nair, and S. Thomas, "Rubber – rubber blends : A critical review Rubber – rubber blends : A critical review," *Prog. Rubber Plast. Recycl. Technol.*, no. December 2019, 2019, doi: 10.1177/1477760619895002.
- [25] C. L. Zhang, L. F. Feng, X. P. Gu, S. Hoppe, and G. H. Hu, "Efficiency of graft copolymers as compatibilizers for immiscible polymer blends," *Polymer (Guildf).*, vol. 48, no. 20, pp. 5940–5949, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.POLYMER.2007.07.042.
- [26] E. Markl and M. Lackner, "Devulcanization technologies for recycling of tire-derived rubber: A review," *Materials (Basel).*, vol. 13, no. 5, 2020, doi: 10.3390/ma13051246.
- [27] S. Ramarad, M. Khalid, C. T. Ratnam, A. L. Chuah, and W. Rashmi, "Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future," *Progress in Materials Science*, vol. 72. pp. 100–140, 2015, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.004.
- [28] M. R. Saeb *et al.*, "GTR/Thermoplastics Blends: How Do Interfacial Interactions Govern Processing and Physico-Mechanical Properties?," *Materials (Basel).*, vol. 15, no. 3, 2022, doi: 10.3390/ma15030841.
- [29] J. Feng, G. Zhang, K. MacInnis, Z. Li, A. Olah, and E. Baer, "Effect of compatibilizer on morphology and properties of HDPE/Nylon 6 blends," *J. Polym. Sci. Part B*

- Polym. Phys.*, vol. 57, no. 5, pp. 281–290, 2019, doi: 10.1002/polb.24783.
- [30] E. J. Barbero, *Introduction to Composite Materiales*, vol. 15, no. 2. 2016.
- [31] A. Fazli and D. Rodrigue, “Thermoplastic elastomers based on recycled high-density polyethylene/ground tire rubber/ethylene vinyl acetate: Effect of ground tire rubber regeneration on morphological and mechanical properties,” *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, vol. 2022, no. 0, pp. 1–26, 2022, doi: 10.1177/08927057221095388.
- [32] ASTM, “ASTM F1344-2015 Standard Specification for Rubber Floor Tile.” University of Edinburgh, pp. 1–4, 2015, Accessed: Oct. 02, 2022. [Online]. Available: <https://tienda.aenor.com/norma-astm-f1344-12e1-084289>.
- [33] R. Morales Ibarra, “Recycling of thermosets and their composites,” in *Thermosets: Structure, Properties, and Applications: Second Edition*, 1st ed., G. Qipeng, Ed. Monterrey: Elsevier, 2018, pp. 639–666.
- [34] M. J. Franchetti and D. Apul, “Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation, and Case Studies,” *Carbon Footpr. Anal. Concepts, Methods, Implementation, Case Stud.*, pp. 1–248, 2012, Accessed: Nov. 09, 2022. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Carbon_Footprint_Analysis.html?id=UIUmD75qyzUC.
- [35] K. D. Alcivar Espinoza and A. N. Risco Bravo, “Diseño de una propuesta sostenible de producción de biodiesel mediante optimización multiobjetivo de factores económicos , ambiental y rendimiento,” ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2022.
- [36] I. Dyott and L. Sajjad, “Carbon footprint analysis,” *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.*, vol. 5, no. 2, pp. 621–627, Feb. 2013, doi: 10.1108/ijccsm.2013.41405baa.010.
- [37] J. Hidalgo-Crespo, J. L. Amaya, M. Soto, and L. Caamaño-Gordillo, “Domestic Plastic Waste in the city of Guayaquil: Generation Rate and Classification,” *Proc. LACCEI Int. Multi-conference Eng. Educ. Technol.*, vol. 2021-July, pp. 19–24, 2021, doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.265.
- [38] S. Moghaddamzadeh, “Thermoplastic elastomers based on polyester recycled tire fibers and ground tire rubber,” 2018.
- [39] S. K. Das *et al.*, “Plastic Recycling of Polyethylene Terephthalate (PET) and Polyhydroxybutyrate (PHB)—a Comprehensive Review,” *Mater. Circ. Econ.*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s42824-021-00025-3.
- [40] S. Ramarad, M. Khalid, C. T. Ratnam, A. L. Chuah, and W. Rashmi, “Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 72, pp. 100–140, 2015, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.02.004.
- [41] S. Zhang, “Analysis the property changes of the thermal recycled HDPE and LDPE,” *Materials (Basel)*, p. 50, 2020.
- [42] K. Formela, Ł. Piszczyk, J. Haponiuk, K. Bajer, and M. Formela, “Interfacial adhesion evaluation in (low-density polyethylene)/elastomer blends,” *J. Vinyl Addit. Technol.*, vol. 22, no. 4, pp. 492–500, 2016, doi: 10.1002/vnl.21474.
- [43] E. Lievana and J. Karger-Kocsis, “Use of ground tyre rubber (GTR) in thermoplastic polyolefin elastomer compositions,” *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*, vol. 20,

- no. 1, pp. 1–10, 2004, doi: 10.1177/147776060402000101.
- [44] N. F. Andhini, “Recuperación de polietileno de baja densidad (LDPE) a partir de empaques tetra pak,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [45] Ministerio del Ambiente y Agua, “Precios de Mercado Referenciales para Materiales Reciclables,” 2019, 2014. <https://ambiecuador.com/> (accessed Oct. 16, 2022).
- [46] L. Mészáros, T. Tábi, J. G. Kovács, and T. Bárány, “The effect of EVA content on the processing parameters and the mechanical properties of LDPE/ground tire rubber blends,” *Polym. Eng. Sci.*, vol. 48, no. 5, pp. 868–874, May 2008, doi: 10.1002/pen.21022.
- [47] R. Cham and M. S. Redfern, “Effect of flooring on standing comfort and fatigue,” *Hum. Factors*, vol. 43, no. 3, pp. 381–391, 2001, doi: 10.1518/001872001775898205.
- [48] ASTM, “Standard Test Method for Thickness of Resilient Flooring Materials Having Flat,” 2013.
- [49] A. Rezaei Kolahchi, A. Aji, and P. J. Carreau, “Surface morphology and properties of ternary polymer blends: Effect of the migration of minor components,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 118, no. 23, pp. 6316–6323, 2014, doi: 10.1021/jp502081g.
- [50] R. P. Wool, “Diffusion and autohesion,” in *Adhesion Science and Engineering*, Elsevier Science B.V., 2002, pp. 351–401.
- [51] M. Ashby, *Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice: Second Edition*. Elsevier Inc., 2012.
- [52] X. X. Zhang, C. H. Lu, and M. Liang, “Preparation of rubber composites from ground tire rubber reinforced with waste-tire fiber through mechanical milling,” *Journal of Applied Polymer Science*, 2007. <https://sci-hub.ru/10.1002/app.25510> (accessed Jan. 28, 2023).
- [53] Z. Yilmaz, “ENHANCEMENT OF COMPATIBILITY OF POLYETHYLENE / POLYVINYL ACETATE BLENDS BY IRRADIATION OF POLYETHYLENE,” 2007.
- [54] A. M. Henderson, “Ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymers: a general review,” no. 1, 1993.
- [55] A. Fazli and D. Rodrigue, “Sustainable Reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTF) as Reinforcements,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/polym14193933.
- [56] A. Fazli and D. Rodrigue, “Phase morphology, mechanical, and thermal properties of fiber-reinforced thermoplastic elastomer: Effects of blend composition and compatibilization,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 41, no. 7–8, pp. 267–283, 2022, doi: 10.1177/07316844211051749.
- [57] M. C. C. de Oliveira, A. S. A. Diniz Cardoso, M. M. Viana, and V. de F. C. Lins, “The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. March, pp. 2299–2317, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.039.
- [58] A. Badiee, “An examination of the response of ethylene-vinyl acetate film to changes in environmental conditions,” *Univ. Nottingham*, p. 182, 2016, Accessed:

- Dec. 28, 2022. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/306258512>.
- [59] Y. Li, Y. Zhang, and Y. Zhang, "Morphology and mechanical properties of HDPE/SRP/elastomer composites: Effect of elastomer polarity," *Polym. Test.*, vol. 23, no. 1, pp. 83–90, 2004, doi: 10.1016/S0142-9418(03)00065-5.
- [60] K. Price-Robinson, "High-Performance Flooring for Sports, Recreation, and Fitness Applications," *CE Cent.*, pp. 1–10, 2021, [Online]. Available: <https://continuingeducation.bnpmmedia.com/courses/ecore/high-performance-flooring-for-sports-recreation-and-fitness-applications/>.
- [61] F2569–07, "Standard Test Method for Evaluating the Force Reduction Properties of Surfaces for Athletic Use," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 7–10, 2007, Accessed: Jan. 03, 2023. [Online]. Available: <https://www.astm.org/f2569-11r19.html>.
- [62] ISO7619-1, "ISO 7619-1: Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of indentation hardness - Part 1: Durometer method (Shore hardness)," vol. 2010, p. 13, 2006.
- [63] H. A. Sherif and F. A. Almufadi, "Models for materials damping, loss factor, and coefficient of restitution," *J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME*, vol. 142, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1115/1.4044281.
- [64] O. P. Grigoryeva, A. M. Fainleb, V. F. Shumskii, V. A. Vilenskii, N. V. Kozak, and N. V. Babkina, "The Effect of multi-reprocessing on the structure and characteristics of thermoplastic elastomers based on recycled polymers," *Polym. Sci. - Ser. A*, vol. 51, no. 2, pp. 216–225, 2009, doi: 10.1134/S0965545X09020114.
- [65] Mats Inc, "1 - FLEX Recycled Rubber Flooring," pp. 1–2.
- [66] E. C. Flooring, "ARCHITECTURAL SPECIFICATIONS GUIDELINES RUBBER FLOORING TILES – INDOOR APPLICATIONS EVOLUTION TILES," pp. 1–7, 2020.
- [67] V. TRADE, "Catalogue: Rubber flooring," 2018.
- [68] M. Fatih Ergin and I. Aydin, "Evaluation of rheological behaviour upon recycling of an ethylene vinyl acetate copolymer by means of twin-screw extrusion process," *Acta Phys. Pol. A*, vol. 131, no. 3, pp. 542–544, 2017, doi: 10.12693/APhysPolA.131.542.
- [69] ISO, "ISO 16905-Resilient floor coverings-Specification for rubber floor covering-Tile/Plank," 2015.
- [70] T. A. N. G. Barber, "Method for Improving Compression Set in Thermoplastic Vulcanizates," US 7,504.458 B2, 2009.
- [71] C. Le Hel, V. Bounor-Legaré, M. Catherin, A. Lucas, A. Thèvenon, and P. Cassagnau, "TPV: A new insight on the rubber morphology and mechanic/elastic properties," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 10, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/polym12102315.
- [72] S. T.D, "Studies on short nylon fiber-reclaimed rubber/elastomer composites," no. May, 2001.
- [73] C. E. C. Jr. and R. B. Seymour, *Structure—Property Relationships in Polymers*. 2012.
- [74] O. Y. Alothman, "Processing and characterization of high density

- polyethylene/ethylene vinyl acetate blends with different VA contents,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/635693.
- [75] H. Wang, P. Apostolidis, J. Zhu, X. Liu, A. Skarpas, and S. Erkens, “The role of thermodynamics and kinetics in rubber–bitumen systems: a theoretical overview,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 22, no. 14, pp. 1785–1800, 2021, doi: 10.1080/10298436.2020.1724289.
- [76] J. W. van Hoek, G. Heideman, J. W. M. Noordermeer, W. K. Dierkes, and A. Blume, “Implications of the use of silica as active filler in passenger car tire compounds on their recycling options,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 5, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/ma12050725.
- [77] S. T. Palakattukunnel, S. Thomas, P. A. Sreekumar, and S. Bandyopadhyay, “Poly(ethylene-co-vinyl acetate)/calcium phosphate nanocomposites: Contact angle, diffusion and gas permeability studies,” *J. Polym. Res.*, vol. 18, no. 6, pp. 1277–1285, 2011, doi: 10.1007/s10965-010-9530-1.
- [78] G. Holden, “Thermoplastic Elastomers,” in *Applied Plastics Engineering Handbook: Processing and Materials*, 2011, pp. 77–91.
- [79] Activelife S.A., “PISO 2CM INTERLOCK 47 X 47 .” <https://activelife.ec/product/mts-de-piso-2cm-interlock-47-x-47/> (accessed Jan. 11, 2023).
- [80] China Extruder Machine and Plastic Recycling Machine, “Plastic Compounding Twin Screw Extruder with Competitive Price,” *Made-in-China*, 2023. <https://chinatengda.en.made-in-china.com/product/BOLfeTNckVWK/China-Plastic-Compounding-Twin-Screw-Extruder-with-Competitive-Price.html> (accessed Jan. 12, 2023).
- [81] Qingdao Suiteque Machinery Co. Ltd, “Rubber Paver Tile Vulcanizing Press / Interlock Rubber Tiles Hydraulic Press / Rubber Floor Hot Molding Press,” *Qingdao Suiteque Machinery Co.,Ltd.* https://suiteque.en.alibaba.com/product/60390528290-801542405/rubber_paver_tile_vulcanizing_press_interlock_rubber_tiles_hydraulic_press_rubber_floor_hot_molding_press.html (accessed Jan. 12, 2023).
- [82] El Telégrafo, “Guayaquil en cifras,” *Guayaquil en Cifras*, p. 1, Oct. 06, 2012.
- [83] M. Stahl, “Net Present Value (NPV),” in *Encyclopedia of Health Care Management*, 2012, pp. 1–3.
- [84] R. Turton, *Analysis Synthesis and Design of Chemical Processes*, 5th ed. 2008.
- [85] V. Mutlu, C. Özgür, and Ş. Ş. Kaplan Bekaroğlu, “Determination of Carbon Footprint In Rubber Industry,” *Bilge Int. J. Sci. Technol. Res.*, pp. 139–146, Nov. 2018, doi: 10.30516/bilgesci.434223.
- [86] G. Reniers, L. Talarico, and N. Paltrinieri, “Cost-Benefit Analysis of Safety Measures,” in *Dynamic Risk Analysis in the Chemical and Petroleum Industry: Evolution and Interaction with Parallel Disciplines in the Perspective of Industrial Application*, Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 195–205.

APÉNDICES

APÉNDICE A: FÓRMULAS

- **Análisis tecno-económico**

Para el análisis de TIR, VAN y PRI, primero se estimaron los costos de manufactura anuales de un producto sin depreciación, como se indica en la siguiente expresión:

$$COM_d = 0.180FCI + 2.73C_{OL} + 1.23(C_{UT} + C_{WT} + C_{RM}) \quad (a.1)$$

Donde,

- FCI es la inversión de capital fijo
- C_{OL} es el costo de mano de obra
- C_{UT} es el costo de servicios básicos (agua, luz, etc.)
- C_{WT} es el costo de tratamiento de residuos, el cual se asume como 0
- C_{RM} es el costo de la materia prima

El VAN permite conocer la rentabilidad de un proyecto al final de su vida, por lo que es posible determinar el precio por el cual el proyecto debe ser vendido para la obtención de una rentabilidad mayor a cero [36].

$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (a.2)$$

Donde,

- C_t : entrada neta de efectivo durante el período 't'
- C_0 : costes totales de inversión inicial
- r : tasa de descuento
- t : número de períodos de tiempo

El TIR es un índice que compara diferentes planes de inversión para un mismo proyecto [84] y muestra el porcentaje de ganancia respecto a la inversión inicial. El TIR es un índice que compara diferentes planes de inversión para un mismo proyecto [84] y muestra el porcentaje de ganancia respecto a la inversión inicial.

$$TIR = R_L + \frac{N_L}{N_L - N_H} \times (R_H - R_L) \quad (a.3)$$

Donde,

- R_H : Tasa de interés más alto
- R_L : Tasa de interés más baja
- N_L : Valor actual neto a tipo de interés bajo
- N_H : Valor actual neto a un tipo de interés elevado

El PRI es un indicador económico que permite conocer el lapso necesario para recuperar una inversión. El PRI se determina mediante la siguiente ecuación [86]:

$$PBP = A + \left(\frac{-B}{C} \times 12 \right) \quad (a.4)$$

Donde,

- A: Año del último flujo negativo
- B: Último valor Flujo Neto Acumulado del año A
- C: Primer Flujo Neto Descontado después del año A

APÉNDICE B: ENSAYOS REALIZADOS

- **Compression Set**

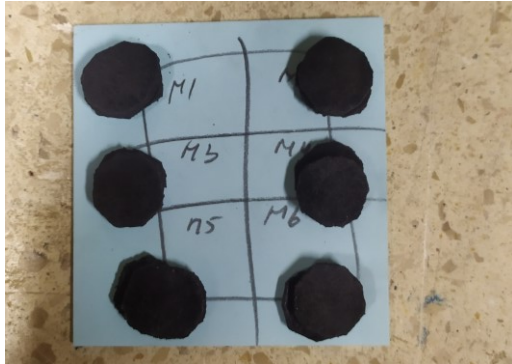


Figura b.4.1 Probetas para compression set

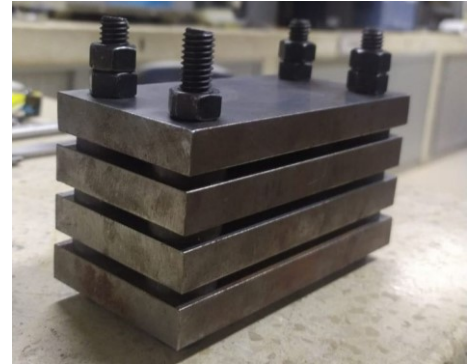


Figura b.4.2 Equipo para Compression Set
ASTM395

- **Dureza-Flexión**

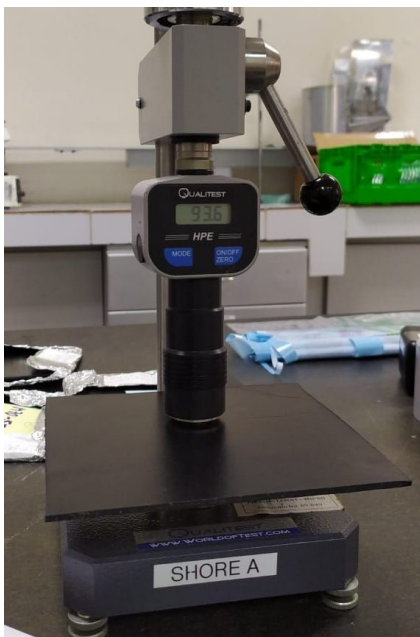


Figura b.4.3 Medición de dureza Shore A
ASTM D2240



Figura b.4.4 Probeta de ensayo de flexión
ASTM D256

- Ensayo químico-Ángulo de contacto



Figura b.4.5 Ensayo de resistencia química
ASTM F925

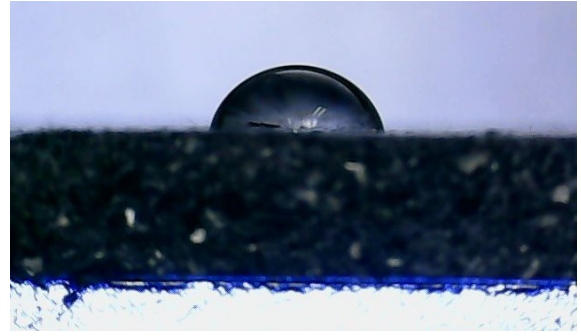


Figura b.4.6 Ensayo de ángulo de contacto

- Consumo Energético (Torque)

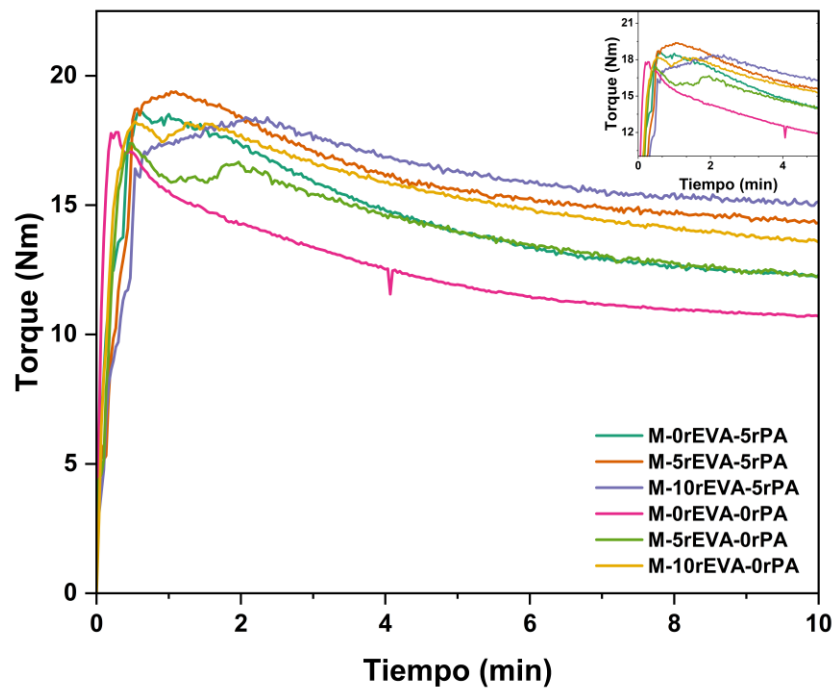


Figura b.4.7 Curvas de torque

APÉNDICE C: ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ENSAYOS

- **Módulo de flexión**

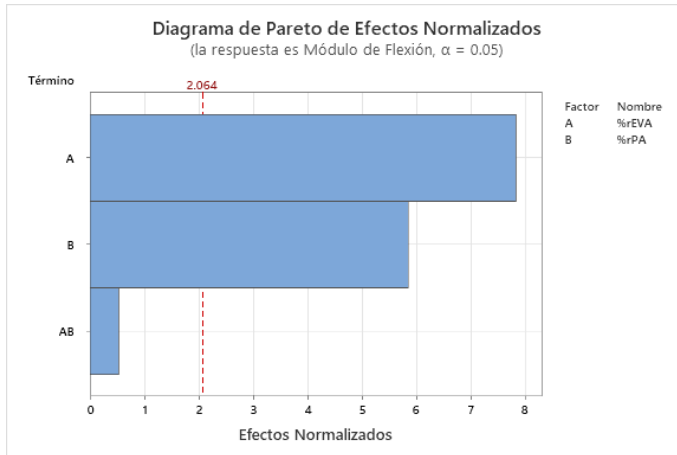


Figura c.1 Significancia estadística mediante diagrama de Pareto para módulo de flexión

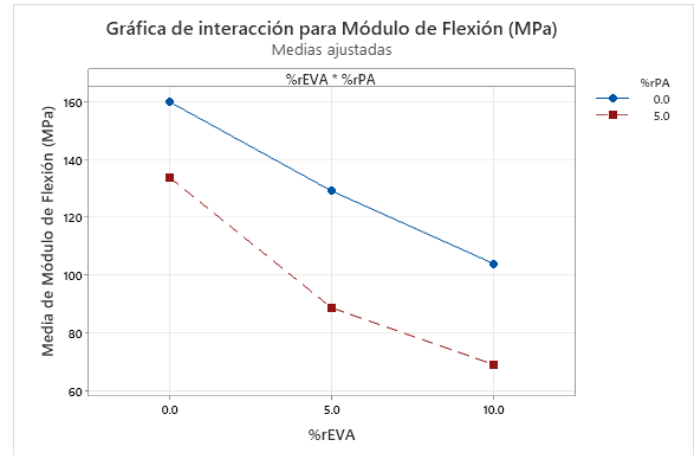


Figura c.2 Diagrama de interacción rEVA-rPA para módulo de flexión

- **Ensayo de impacto**

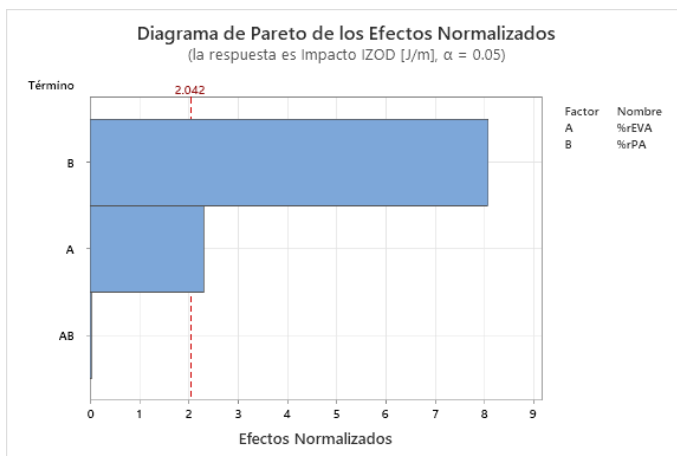


Figura c.3 Significancia estadística mediante diagrama de Pareto para resistencia al impacto IZOD

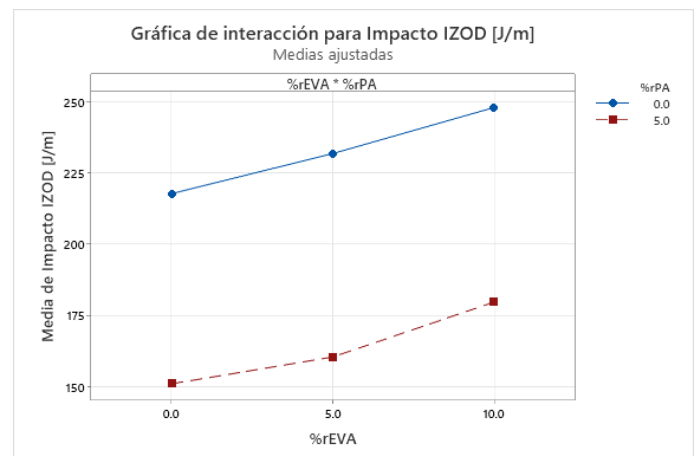


Figura c.4 Diagrama de interacción rEVA-rPA para resistencia al impacto IZOD

- Dureza Shore A

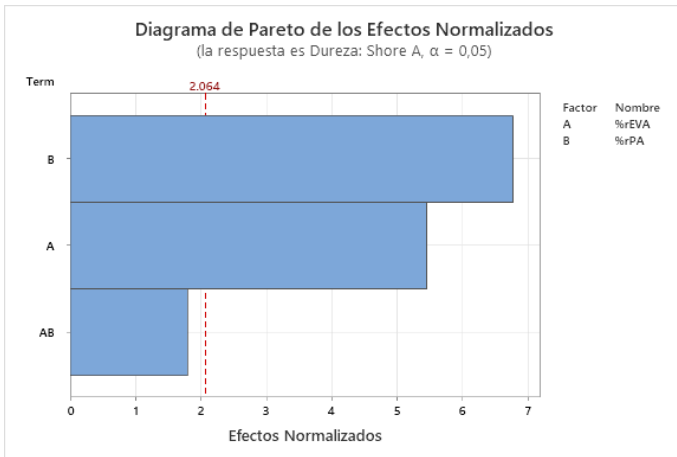


Figura c.5 Significancia estadística mediante diagrama de Pareto para Dureza Shore A

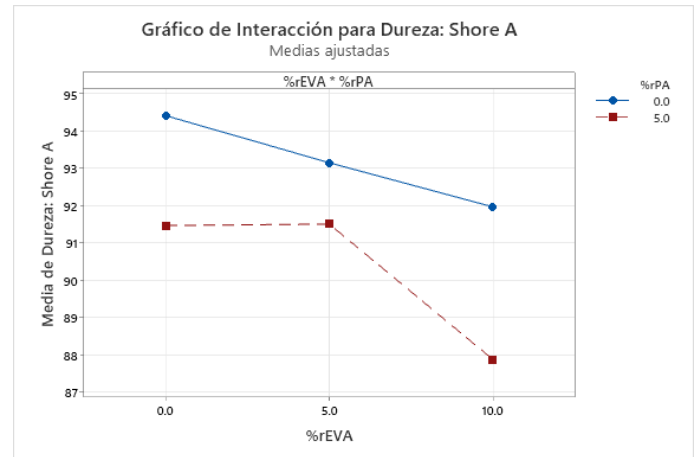


Figura c.6 Diagrama de interacción rEVA-rPA para Dureza Shore A

- Compression Set

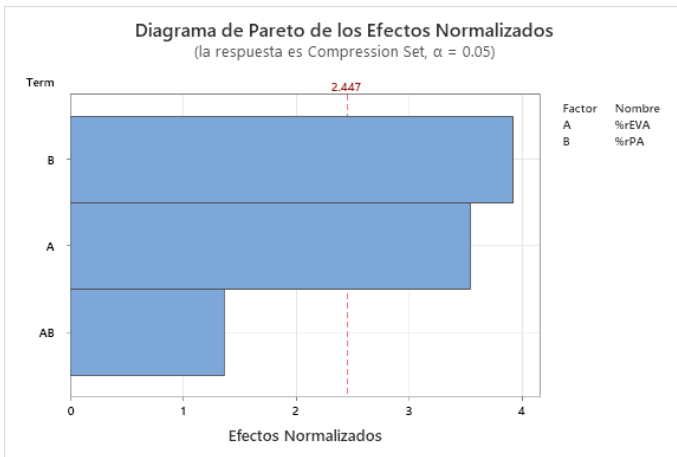


Figura c.7 Significancia estadística mediante diagrama de Pareto para Compression Set

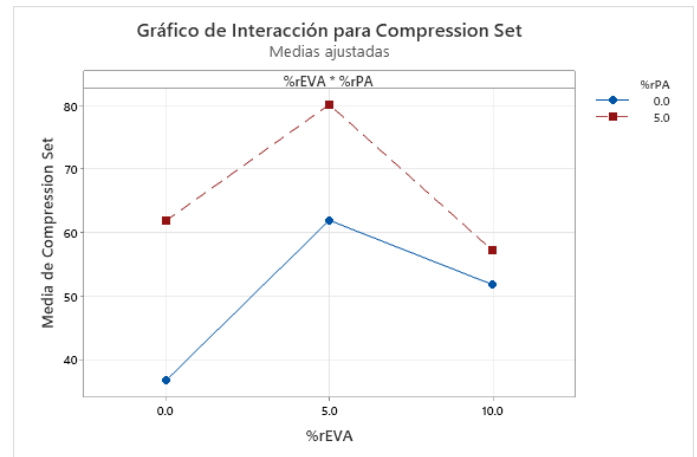


Figura c.8 Diagrama de interacción rEVA-rPA para Compression Set

- **Consumo Energético Específico**

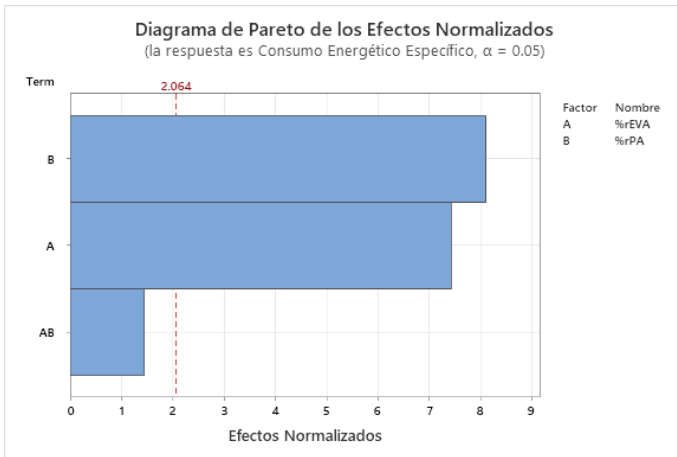


Figura c.9 Significancia estadística mediante diagrama de Pareto para consumo energético

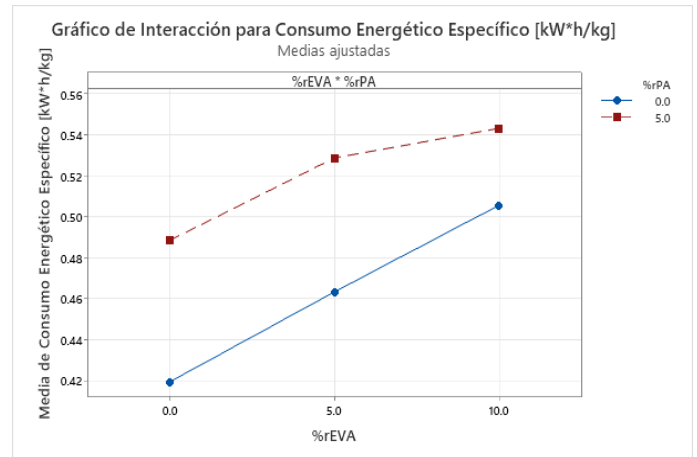


Figura c.10 Diagrama de interacción rEVA-rPA para consumo energético

APÉNDICE D: ANÁLISIS FINANCIERO-FLUJOS DE CAJA

Abreviaturas

FC: Flujo de Caja

ND: No Descontado

FCA: Flujo de Caja Acumulado

D: Descontado

Tabla d.1 Flujo de caja anual para producción de losetas

| Año | Inversión | d_k | $FCI_L - Sd_k$ | Ingresos | COM_d | Ganancia Neta | FC (ND) | FCA (ND) | FC (D) | FCA (D) |
|-----|-------------|-------------|----------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0 | \$55,223.00 | \$ - | \$48,020.00 | \$ - | \$ - | \$ - | \$(55,223.00) | \$(55,223.00) | \$(50,901.47) | \$(50,901.47) |
| 1 | \$ - | \$16,006.67 | \$32,013.33 | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$26,929.18 | \$26,929.18 | \$(28,293.82) | \$22,879.36 | \$(28,022.11) |
| 2 | \$ - | \$21,342.22 | \$10,671.11 | \$76,480.00 | \$ 248,061.38 | \$27,569.45 | \$27,569.45 | \$(724.36) | \$21,590.32 | \$(6,431.80) |
| 3 | \$ - | \$7,114.07 | \$3,557.04 | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,862.07 | \$25,862.07 | \$25,137.71 | \$18,668.29 | \$12,236.49 |
| 4 | \$ - | \$3,557.04 | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,435.23 | \$25,435.23 | \$50,572.94 | \$16,923.38 | \$29,159.87 |
| 5 | \$ - | \$ - | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$25,008.38 | \$75,581.32 | \$15,337.25 | \$44,497.12 |
| 6 | \$ - | \$ - | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$25,008.38 | \$100,589.71 | \$14,137.01 | \$58,634.13 |
| 7 | \$ - | \$ - | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$25,008.38 | \$125,598.09 | \$13,030.71 | \$71,664.84 |
| 8 | \$ - | \$ - | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$25,008.38 | \$150,606.47 | \$12,010.97 | \$83,675.81 |
| 9 | \$ - | \$ - | \$ - | \$276,480.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$25,008.38 | \$175,614.86 | \$11,071.04 | \$94,746.86 |
| 10 | \$ - | \$ - | \$ - | \$230,400.00 | \$ 248,061.38 | \$25,008.38 | \$32,211.38 | \$207,826.24 | \$13,143.85 | \$107,890.71 |