

Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación de las Propiedades Mecánicas y Físicas de elementos de Madera Plástica en Diferentes Dosificaciones de Polímeros Reciclados.

Elmer Román Díaz Ruíz

Bogotá, D.C., 6 de Marzo de 2020



Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación de las Propiedades Mecánicas y Físicas de elementos de Madera Plástica en Diferentes Dosificaciones de Polímeros Reciclados.

Elmer Román Díaz Ruíz

Bogotá, D.C., 6 de Marzo de 2020



La tesis de maestría titulada Evaluación de las Propiedades Mecánicas y Físicas de elementos de Madera Plástica en Diferentes Dosificaciones de Polímeros Reciclados presentada por Elmer Román Díaz Ruiz, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ambiental.

Director de la Tesis

Maria Paulina Villegas De Brigard

Jurado

Fernando Estrada Sánchez

Jurado

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Dedicatoria

Este trabajo de grado tiene en especial un componente de sacrificio por lo vivido para el desarrollo del mismo, quiero en especial dedicarlo a la memoria de mis padres que desde el cielo están velando el día a día de mi vida también a mis hijitos Gabriel y Samuel quienes son el cimiento de mi vida, y por quien construyo el más sólido edificio llamado futuro, a mis Hermanos Jimena y Rolando por sus miles de voces de aliento para llevarlo hasta el final. A mis amigos, y en especial al ingeniero Carlos Reyes y su familia por su acompañamiento.

Agradecimientos

A Dios por permitir que se culminara en buena medida este gran trabajo de grado, a mi Directora la Ingeniera María Paulina Villegas por su apoyo y tiempo, a la ingeniera Sandra Ximena Campagnoli Martínez y al ingeniero Fernando Estrada Sánchez, Jurados del trabajo, a la Universidad de Boyacá, docentes, y amigos.

A MAPLECO S.A.S, empresa Boyacense, por su continuo apoyo en la elaboración de las placas estudiadas en el presente trabajo

Resumen

MAPLECO S.A.S, (Madera Plástica Ecológica), es una empresa boyacense que, por más de 5 años en el sector de reuso de plástico, fabrica elementos 100% con materia prima proveniente de diferentes cooperativas del sector y algunas de Bogotá, las cuales llevan su material al municipio de Ventaquemada donde se localiza la fábrica.

El trabajo de grado consistió fundamentalmente en la realización de ensayos físicos y mecánicos sobre tabletas de madera plástica de 20x10x2.5 cm, con 5 mezclas diferentes de dosificaciones certificadas por Mapleco S.A.S. Se realizaron ensayos de densidad, absorción, flexo -tracción y envejecimiento.

A partir de los resultados de las propiedades analizadas se concluye que la madera plástica presenta un muy bajo porcentaje de absorción lo cual la hace resistente a condiciones ambientales agresivas. En cuanto al Módulo de Rotura calculado, demuestra una alta resistencia comparado con materiales convencionales.

Si bien hay que continuar investigando otras propiedades de la madera plástica, lo anterior indica que ésta puede constituirse en un material alternativo al concreto y a la arcilla en la fabricación de adoquines contribuyendo a la sostenibilidad dentro de la construcción de pavimentos articulados.

Palabras Claves

Madera plástica, polímeros, extruido, flexibilidad, Módulo de elasticidad, Módulo de rotura, peletizado, flexo tracción, absorción, densidad, reciclaje,

Índice General

Capítulo 1 - Planteamiento y justificación del problema	12
1. Planteamiento del Problema	12
2. Objetivos	18
2.1. Objetivo General	18
2.2. Objetivos Específicos	18
3. Metodología	19
Capítulo 2 - Estado del Arte	22
4. Forma de reciclaje y su uso.....	30
5. Pruebas aplicadas a los adoquines.....	56
Capítulo 3 – Normativa aplicable	58
Capítulo 4 - Resultados	60
6. Mezclas	60
Construcción de elemento tipo tableta a ensayar.....	61
7. Ensayos	62
7.1. -Densidad.....	62
7.2. Absorción	67
7.3. Flexo Tracción	72
7.4. Módulo de Rotura	77
7.5. Otros Ensayos	80
7.5.1. Envejecimiento.....	80
Capítulo 5 – Análisis de Resultados	81
8. Flexo tracción y módulo de rotura.	83
Conclusiones	93
Bibliografía	95
Anexos	99

Índice de Tablas

Tabla 1 Componentes y características de los polímeros.	29
Tabla 2 Valores de densidades obtenidos experimentalmente para los polímeros reciclados	50
Tabla 3 Módulo de rotura máximo (NTC 2017).....	55
Tabla 4 Normatividad de INVIAS para aplicación de ensayos específicos en materiales. 58	
Tabla 5 Especificaciones técnicas para Adoquines NTC	58
Tabla 6 Dosificación de materiales para análisis en ensayos físicos y mecánicos.....	60
Tabla 7 Estadísticas descriptivas de las Pruebas de Densidad	64
Tabla 8 Densidades típicas de los plásticos	65
Tabla 9 Análisis de varianza de la Densidades, ANOVA.....	66
Tabla 10 Promedio de resultados ensayo de absorción.....	68
Tabla 11 Valores típicos de % Absorción en adoquines.....	70
Tabla 12 Análisis de varianza de la Absorción, ANOVA.....	71
Tabla 13 Carga máxima ensayo Flexotracción	72
Tabla 14 Análisis de varianza para Flexo tracción, ANOVA.....	76
Tabla 15 resultado general Mr y porcentajes de ubicación de falla.....	77
Tabla 16 Valores de módulo de rotura en adoquines	79
Tabla 17 comparación resultados con NTC 3829.....	82
Tabla 18 comparación general madera plástica con materiales convencionales	90
Tabla 19 valores de aceptación para los adoquines en concreto.....	92
Tabla 20 Resultados globales ensayos.....	92

Índice de Figuras

Figura 1 Pirámide de Residuos	12
Figura 2 . Evaluación de las propiedades mecánicas de elementos de madera plástica en dosificaciones de Polímeros Reciclados.....	16
Figura 3 Código SPI De Los Plásticos Reciclados	27
Figura 4 Características y usos de los plásticos según su código SPI	28
Figura 5 Empresa Mapleco, bomper de vehículo.	32
Figura 6 Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura	34
Figura 7 Valores caloríficos de los plásticos más comunes frente a los combustibles	36
Figura 8 Verificación del material	37
Figura 9 Peso de las 3 muestras de PP de fibra y PP aglutinado.....	45
Figura 10 Resultados de las pruebas de Flexión.....	46
Figura 11 En el suelo material sobrante denominado reuso	61
Figura 12 Laboratorio y ensayos.....	62
Figura 13 Adoquines o tabletas a ensayar con sus medidas aproximadas	62
Figura 14 . Resultados ensayo densidad Mezcla 5	64
Figura 15 Diagrama de cajas, Comparativo de las 5 mezclas en ensayo de densidad ...	66
Figura 16 Test de Turkey para la Densidades.....	67
Figura 17 Ensayo de Absorción en sumersión de H ₂ O.....	68
Figura 18 Comportamiento de ensayo de absorción en mezcla 4	69
Figura 19 Diagrama de cajas, Comportamiento de 5 mezclas en ensayo de Absorción .	70
Figura 20 Test de Turkey para la Absorción	71
Figura 21 18 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 1	73
Figura 22 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 2	73
Figura 23 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 3	74
Figura 24 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 4	75
Figura 25 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 5	75
Figura 26 Diagrama de cajas, Comparación de las cargas máximas.....	76
Figura 27 Test de Turkey para la Flexo tracción.	77
Figura 28 Esfuerzo vs deformación mezcla 1	85
Figura 29 Curva simplificada mezcal 1, análisis de rangos.....	85
Figura 30 Esfuerzo vs deformación mezcla 2.....	86

Figura 31	Curva simplificada mezcál 2 , análisis de rangos.....	86
Figura 32	Curva simplificada mezcál 3, análisis de rangos.....	87
Figura 33	Esfuerzo vs deformación mezcla 3.....	87
Figura 34	Curva simplificada mezcál 4 análisis de rangos.....	88
Figura 35	Esfuerzo vs deformación mezcla 4.....	88
Figura 36	Curva simplificada mezcál 5 análisis de rangos.....	89
Figura 37	Curva simplificada mezcál 5 análisis de rangos.....	89

Introducción

En el área de ingeniería y arquitectura del país, actualmente se buscan materiales que sean amigables con el medio ambiente y que cumplan parámetros de resistencia y durabilidad además de ser competitivos en el sector de la construcción.

La madera plástica, producto del reciclaje de plásticos, es una alternativa como material para mobiliario urbano, postes de cercas, pisos de carrocerías y parques infantiles, entre otros. En la empresa MAPLECO SAS, se elabora principalmente a partir de plásticos de baja densidad, alta densidad, polipropileno y residuos de su propia fabricación. Se exceptúa el material que tiene PVC, dado que en volúmenes altos de fabricación puede llegar a generar un ambiente tóxico. Con las propiedades analizadas se verificarán propiedades exclusivas de los polímeros, como son flexibilidad, impermeabilidad, y resistencia a agentes externos (ensayo de envejecimiento), que son analizados durante las pruebas que soportan el presente trabajo.

Con el desarrollo de la investigación se busca conocer, las propiedades físicas y mecánica de un total de 5 mezclas de polímeros de alta y baja densidad, además de polipropilenos; los cuales van a sustituir en un futuro cercano aquellos que generan un impacto a los recursos naturales, tales como el cemento, arcilla entre otros.

Capítulo 1 - Planteamiento y justificación del problema

Planteamiento del Problema

El uso masivo de plástico atiende a diversas necesidades que suple el ser humano en su vida diaria pero el abuso origina enormes cantidades de residuos sólidos que generan un grave problema ambiental.

La baja capacidad de los materiales de ser biodegradables y en especial del plástico material del estudio, hace pensar e insertarse en la pirámide de la gestión de residuos (Figura 1), con relación a la reutilización y reciclaje. Es importante generar consciencia sobre las buenas prácticas para disminuir los desechos y residuos y para disponerlos adecuadamente para evitar la contaminación de los cuerpos de agua y el mar.

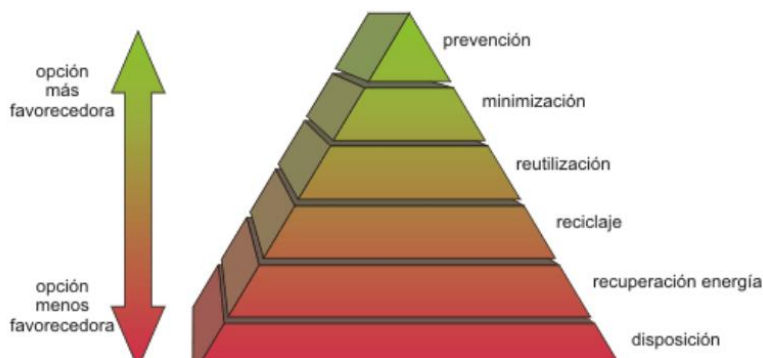


Figura 1 Pirámide de Residuos

Fuente :<https://www.recytrans.com/blog/jerarquia-de-residuos/>

reutilizarla reutilización del plástico, en particular en un proceso de extrusión y fabricación de piezas nuevas que cumplirán una función diferente a su origen, será aspecto primordial de este trabajo, buscando contribuir a disminuir de manera importante los impactos negativos sobre el medio ambiente.

Muchas bolsas plásticas, millones de bolsas plásticas en un planeta, parece poco; pero realmente ¿qué se está haciendo con todas ellas?, son arrojados al mar, dejadas por ahí, tiradas, como si nada, ejerciendo también contaminación visual.

Algunos envases de plástico tardan cientos de años en degradarse en la naturaleza. Otros tardan miles de años. La demanda creciente de este tipo de envase lleva a que la producción se incremente año a año. Así las cosas, todas las iniciativas en ese sentido deben ser alentadas. Las bolsitas que se ven volando por las calles pueden terminar en cualquier parte y no están siendo reutilizadas.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA, realizó un estudio en el que fotografió y analizó miles de millas de mares y océanos del planeta. La conclusión es terrible: en cada kilómetro cuadrado de agua salada hay 18 mil restos plásticos flotando.

Si no existieran sistemas de reciclado de residuos la única forma de deshacerse de ellos sería enterrarlos o incinerarlos para librarse del problema, pero en vez de ello, podría empeorar aún más. El problema de disponer los residuos en rellenos sanitarios radica en ocupar grandes terrenos que se requieren para otras actividades del hombre, además del manejo de gases y lixiviados y del costo de operarlos, mientras que el de incinerarlos es el alto costo y la posible contaminación del aire. El material reciclable tiene un valor importante pues, al tener posibilidades de aprovechamiento, deja de ser un residuo y se convierte en un insumo.

Los plásticos tienen un reducido índice de degradación lo que causa un deterioro del paisaje, además de que son un derivado del petróleo, una materia prima agotable. Por ello, el depósito de plásticos en los rellenos está siendo eliminado, se está reflexionando sobre la recuperación, es decir, en **RECICLAR EL PLÁSTICO**. (Pérez Méndez, 2010, p. 34).

Según la revista Semana del mes de noviembre de 2019, se evidencia la falta de cultura del reciclaje en Colombia, en donde solo 3 de cada 10 botellas son recicladas, las demás se disponen en rellenos sanitarios, o seguramente en ríos y mares afectando de manera. Se deja claro que la industria que emplea materiales no cubre la demanda generada por las compañías de alimentos o bebidas para ser sostenibles 100 % del reciclaje.

En resumen, el documento narra los aspectos de la falta de conciencia desde los hogares para el proceso de reciclado, y se espera que en el 2030 se llegue a un 50% del proceso en mejora continua.

El plástico como agente contaminante, es un detonante del daño ambiental, así, es preciso que el ser humano se concientice y reduzca su uso y aplicación. Ante tal perspectiva, la ingeniería civil puede contribuir, de algún modo, a utilizar la cantidad de residuos que el hombre genera, aprovechando el reciclaje de materiales. Por todo lo anterior, el presente estudio pretende exponer una alternativa de solución al problema, buscando hacer uso razonable y apropiado de los residuos plásticos a partir de su transformación en bloques de madera plástica, que serán sometidos a esfuerzos mecánicos para analizar su comportamiento como un primer paso hacia el estudio de su aplicación como adoquines u otros elementos en obras de ingeniería.

Por todo lo anterior, se busca realizar el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de piezas fabricadas por la empresa MAPLECO S.A.S de la ciudad de Tunja, con diferentes proporciones de diversos tipos de plástico en porcentajes determinados para su análisis.

Es un trabajo que tiene dos componentes dentro de la Maestría con el énfasis en Ingeniería Ambiental, porque se analiza la problemática de los residuos plásticos y el proceso de reciclaje, y un componente estructural relacionado con el análisis de las propiedades mecánicas de elementos de madera plástica obtenidos mediante un proceso de extrusión.

El problema planteado es relevante, pues aportará de manera significativa a la obtención de resultados del comportamiento de una tableta con una determinada configuración geométrica, elaborada con madera plástica. El aporte de este trabajo también será importante dentro del estado de arte local, dado que no se tienen resultados similares en el departamento de Boyacá. La problemática en el departamento va en crecimiento con cifras que alarman y hacen pensar en el correcto manejo del plástico; tanto que en julio de 2019 el departamento de Boyacá prohibió los plásticos de un solo uso¹.

Este trabajo es el inicio de una profundización más relevante en el tema del uso de madera plástica en obras de ingeniería, por ejemplo, como adoquines para pavimentos articulados.

El árbol del problema se representa en la figura 2 mostrando en el contexto social, todo lo relacionado con generar conciencia ambiental en el uso del plástico reciclado, analizando su comportamiento y dejando precedente abierto en el campo de investigación de proyectos sostenibles, importantes hoy en día.

¹ <http://www.colombiainforma.info/boyaca-prohibe-plasticos-de-un-solo-uso/>targetText=%E2%80%9CMuchas%20veces%20lo%20C3%BAnico%20que,el%20respeto%20por%20el%20medioambiente.

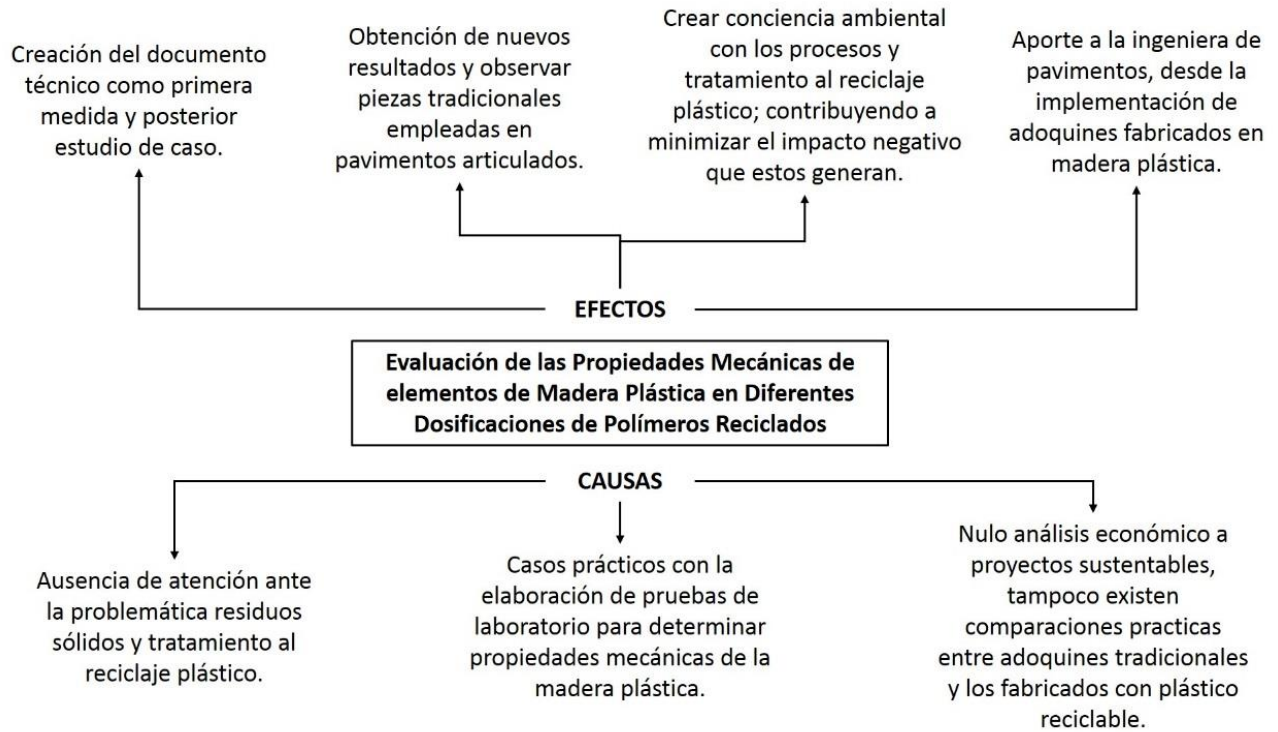


Figura 2 . Evaluación de las propiedades mecánicas de elementos de madera plástica en dosificaciones de Polímeros Reciclados

Con el proyecto se busca conocer algunas propiedades mecánicas y físicas de la madera plástica y recomendar la mejor dosificación en la mezcla de distintos tipos de plástico con el propósito de establecer si el material tiene un potencial alto para ser usado en elementos empelados en obra civil.

La empresa MAPLECO, produce diferentes materiales como postes, pisos para camiones, elementos para parques, pero en realidad no conoce las propiedades mecánicas ni físicas de su propio material y en especial de las 5 mezclas que durante ya varios años lleva produciendo. Es entonces este aspecto el que más justifica la realización de esta investigación, en donde la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, será pionera en incursionar en el departamento de Boyacá pues a la fecha de este documento no se conoce estudio similar.

Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar propiedades mecánicas y físicas de una pieza de madera plástica estándar producida con distintas dosificaciones de polímeros reciclados, obtenidos en un proceso de extrusión.

2.2. Objetivos Específicos

- Identificar la mezcla según dosificación, que ofrezca mejores resistencias mecánicas.
- Analizar el proceso de la elaboración de la madera plástica en la empresa MAPLECO S.A.S.
- Describir los resultados de los ensayos mecánicos correspondientes a la tableta de dimensiones establecidas, fabricadas POR MAPLECO S.A.S
- Evaluar bajo normas técnicas las propiedades mecánicas de las piezas de madera producidas.

Metodología

Se inició con una revisión bibliográfica detallada de los aspectos y temas relacionados con el reciclaje del plástico en Colombia, la información encontrada es escasa y se relaciona principalmente con temas de planes de negocio de empresas que manejan el producto (plástico), pero no se abordan los temas de comportamiento mecánico del plástico y en especial, no se encuentra información específica sobre la madera plástica.

Se consultaron algunas normas colombianas que se aplican a materiales convencionales como adoquines de arcilla y concreto, los cuales servirán de comparativo con la madera plástica en el desarrollo del presente trabajo.

Para la realización de este estudio se contó con el apoyo de una empresa que produce madera plástica a partir de material residual entregado por cooperativas² del sector. Los plásticos recibidos son:

Polietileno de alta densidad, HDPE: representado en bomper o parachoques de vehículos

Polietileno de baja densidad, LDPE: correspondiente a empaques usados de champú (cojines).

Polipropileno: representado en zunchos usados y defectuosos para el embalaje de cajas de cartón.

Teniendo en cuenta la experiencia de la empresa en cuanto a los materiales y dosificaciones utilizados para elaborar productos tales como postes para cercas, pisos para carrocerías, y algunos elementos para la construcción de parques, se definieron las posibles mezclas para el estudio.

² Las cooperativas son asociaciones de los municipios de Tunja, Ventaquemada y Nuevo Colón, en el departamento de Boyacá la cuales semanalmente descargan los materiales ya limpios a la empresa.

En lo que tiene que ver con las dimensiones de las plaquetas, por facilidad de fabricación y aprovechamiento del aditamento disponible para el ensayo de flexo-tracción se utilizó una formaleta tipo que tenía la empresa para producir elementos de 2.5x10 cm de sección y .3.0 m de largo que se cortaron cada 20 cm, trabajando en conclusión elementos de 2.5x10x20 cm. para todos los ensayos.

En relación a los ensayos para determinar las propiedades de la madera plástica se estableció realizar los siguientes:

- Densidad
- Absorción
- Flexo tracción
- Análisis de envejecimiento.

Para obtener resultados representativos, el cálculo del número de plaquetas se realizó por medio de un modelo estadístico experimental unifactorial de efectos fijos, dando como resultado 20 especímenes para cada ensayo. Para el ensayo de envejecimiento se decidió ensayar solo 5 plaquetas.

El trabajo se desarrolló en un alto porcentaje (ensayos de densidad, absorción y flexo tracción) en las instalaciones del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de Boyacá. El análisis de envejecimiento fue realizado en la cubierta y en la zona interior de una vivienda ubicada en el barrio Asís de la ciudad de Tunja. Aprovechando la fabricación de un número mayor de tabletas, se ejecutó en un tramo experimental en Los parqueaderos internos de la Universidad de Boyacá al cuál se le realizó un ensayo de esclerometría como complemento del presente estudio.

Tras la recolección de los datos de densidad, absorción y flexo tracción se presenta un análisis estadístico descriptivo tal como lo propone el Instituto Nacional de Vías en su guía de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” en la sección de “herramientas estadísticas de análisis de resultados para la aceptación de los trabajos”.

Luego a cada dimensión se realiza un análisis de la varianza (ANOVA) seguidas de un test post hoc de Turkey, para encontrar las diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas empleadas.

Tras la recolección de los datos de densidad, absorción y flexo tracción se presenta un análisis estadístico descriptivo tal como lo propone el Instituto Nacional de Vías en su guía de “Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras” en la sección de “herramientas estadísticas de análisis de resultados para la aceptación de los trabajos”. Luego a cada dimensión se realiza un análisis de la varianza (ANOVA) seguidas de un test post hoc de Turkey, para encontrar las diferencias estadísticamente significativas entre las mezclas empleadas.

Para la realización de los diferentes ensayos se emplearon los siguientes equipos:

- Marco de carga digital multifunción
- MARCA: HUMBOLDT –Capacidad de carga 10 KN-Ensayo de Flexo tracción.
- Balanza modelo T31P de 20 kg de capacidad y 1 g de sensibilidad
- Microscopio Electrónico 1000x Usb Con Luz Led Graduable.
- Cámara fotográfica Nikon 3100.
- Equipos oficina.

Capítulo 2 - Estado del Arte

Historia del plástico

El plástico es creado por el hombre y es considerado el primer material sintético pese que con anterioridad el hombre ya utilizaba algunas resinas naturales, con las cuales podían fabricar productos que le facilitaban la cotidianidad y lograba aplicaciones diversas. A Través de la historia en algunos puntos geográficos como Egipto, Babilonia, India, Grecia y China, se caracterizaban por diversificar sus aplicaciones desde el modelo básico de artículos rituales hasta la impregnación de los muertos para su momificación.

A Partir de 1860, el inventor estadounidense Wesley Hyatt patentó el celuloide.



Formula que dio inicio a la utilización de está para diferentes productos, y objetos, de los que se puede destacar a través de la historia: las placas dentales, cuellos de camisa, sin olvidar su aplicación en el cine. Esta fórmula, de acuerdo con diferentes textos tuvo un notable éxito comercial a pesar de que una de sus características era ser inflamable y deteriorarse al exponerlo a la luz. En 1907 se inició la industrialización del polímero Sintéticos. Tras el descubrimiento de El Dr. Leo Baeckeland quien le da paso al de fenol-formaldehído al cual denomina “baquelita” y que se comercializa en 1909.

¿Qué es el plástico?

De acuerdo con la revisión bibliográfica se puede determinar que *“Los plásticos hacen parte de un grupo de compuestos orgánicos denominados polímeros, los cuales están conformados por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno. Principalmente se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural.”*

Características generales del plástico

Debido a la variedad existente de este material no es fácil generalizar las propiedades de los plásticos. Sin embargo, en este apartado se establecerán las propiedades más significativas que le otorgan las bases para el desarrollo de la investigación

- Conductividad eléctrica. - Los plásticos son malos conductores de la electricidad, por lo que se pueden emplear como aislantes eléctricos. Por ejemplo, en el recubrimiento de cables

- Conductividad térmica. - Los plásticos tienen una baja conductividad térmica. Suelen ser materiales aislantes, es decir, transmiten el calor muy lentamente. Pero como punto a favor durante las pruebas se registró la temperatura de las plaquetas, la cual prácticamente constante en la mayoría de ellas, con un valor de 14°C como promedio.

- Resistencia mecánica. - Teniendo en cuenta lo ligeros que son los plásticos, resultan muy resistentes. Esto explica por qué se usan junto a las aleaciones metálicas para construir aviones. En el ensayo de flexo tracción la respuesta del material es buena si es analizada respecto a su masa.

- Resistencia química. - Es una de las propiedades que ha generado una producción masiva de plásticos. Casi todos resisten muy bien el ataque de agentes químicos, como los ácidos, que alteran los materiales, en especial a la mayoría de los metales.

- Combustibilidad. - La mayoría de los plásticos arde con facilidad, ya que se componen de carbono e hidrógeno. Por ejemplo, las bolsas de basura.

- Plasticidad. - Muchos plásticos se reblandecen con el calor y, sin llegar a fundir, son fácilmente moldeables. Esto permite fabricar con ellos piezas de formas complicadas. El proceso de extrusión y moldeo hacen que esta propiedad sea de gran valor en la fabricación de las tabletas analizadas.

Obtención de los plásticos

El origen de los plásticos se inicia por el conocido proceso de polimerización, cuyo proceso se entiende como esa reacción química por la cual las partículas de bajo peso molecular se unen con las de gran peso para generar, la fuente y materia principal con la que se dio este trabajo, los llamados polímeros.

Clasificación de los plásticos según composición molecular

Valle Mayorga (2013) menciona la disposición de las moléculas que forman los polímeros que distinguen tres grupos de plásticos.

Termoestables: Sus macromoléculas se entrecruzan formando una red. Debido a esta disposición sólo se les puede dar forma una vez. Un segundo calentamiento produciría su degradación

Termoplásticos: Las macromoléculas están dispuestas libremente sin entrelazarse. Tienen la propiedad de reblandecerse con el calor, adquiriendo una forma que conserva al enfriarse. Siendo estos los más empelados en la fabricación de las plaquetas objeto del estudio.

Elastómeros: Las macromoléculas están ordenadas formando una red de pocos enlaces. Recuperan su forma y dimensiones cuando la fuerza que actúa sobre ellos cede.

Plásticos termoestables

Resina de poliéster: Se comercializa en dos envases separados, uno para la resina y otro para el catalizador, que se mezclan en el momento de emplearlo. Aplicando capas sucesivas sobre un molde se hacen piscinas, carrocerías para coches, etc.

Resina epoxi: Posee mayor dureza que la de poliéster. Se utiliza como adhesivo en construcción, como cimentación para las bancadas de máquinas y para la fabricación de pinturas que repelen el polvo.

Baquelita: Es duro y muy resistente a los ácidos. Buen aislante del calor y de la electricidad.

Melamina: Es más resistente a los golpes que la baquelita, se comercializa en forma de chapas con las que se fabrican tableros para mesas y mobiliario de cocina.

Poliestireno: La forma rígida se utiliza para fabricar utensilios del hogar, juguetes, pilotos de automóvil. La forma espumada se emplea para la fabricación de aislantes térmicos y como elemento de protección para embalajes.

Polivinilo (PVC): Es muy resistente a los agentes atmosféricos, por lo que se utiliza para fabricar tubos y canalones de desagüe, puertas, ventanas y pavimentos. No empleado en la fabricación de las plaquetas por su alto índice tóxico en el proceso de fundición

Termoplásticos

Nylon: Es un material muy duro y resistente, se utiliza para fabricar hilo de pescar. Debido a que ofrece mucha resistencia al desgaste y poca al rozamiento se utiliza para fabricar piezas de máquinas como levas y engranajes. En la industria textil se emplea para la fabricación de todo tipo de tejidos.

Polipropileno: Es el termoplástico que posee mayor resistencia al impacto, es más duro que el polietileno, pero menos que el poliestireno. Puede soportar temperaturas de 100 °C. Es un buen dieléctrico. Se utiliza para fabricar parachoques de automóviles, juguetes, tubos, botellas, este tipo de plástico fue empleado en dosificaciones establecidas en las mezclas estudiadas.

Polietileno: según Paz, M. (2016). Existen dos tipos:

El de alta densidad que es duro, frágil y puede resistir temperaturas próximas a los 100 °C.

El de baja densidad que es más blando, flexible y que admite temperaturas cercanas a los 70°C.

Es un plástico muy resistente al ataque de ácidos por lo que se emplea para fabricar depósitos, tuberías, y envases de cualquier tipo. Debido a la facilidad con la que se moldea se utiliza para fabricar objetos de diversas formas: juguetes, cubos, bolsas.

Los porcentajes altos del estudio obedecen a estos tipos de plásticos, presentes en las 5 mezclas estudiadas.

Plásticos elastómeros

Caucho: El caucho natural se utiliza para fabricar neumáticos de coches, mediante un proceso de vulcanización. El caucho sintético es más resistente al ataque de agentes químicos y es mejor aislante térmico y eléctrico. Se emplea para fabricar suelas de zapatos, mangueras de riego, correas de transmisión.

Neopreno: Debido a su impermeabilidad se utiliza para fabricar trajes de inmersión. Absorbe muy bien las vibraciones por lo que se utiliza en cimentaciones de edificios, apoyo para grandes vigas.

Silicona: Es muy resistente al ataque de agentes químicos y atmosféricos y posee una gran elasticidad. Debido a sus múltiples propiedades tiene usos tan diversos como el sellado de juntas, aislante eléctrico o en prótesis mamarias.

Clasificación y caracterización de los plásticos reciclados según su código SPI

En la siguiente tabla se muestra la codificación de los plásticos más comunes, reciclados a nivel mundial








CODIGO SPI	DESCRIPCION
	Poliétileno tereftalato (PET)
	Poliétileno de alta densidad (HDPE)
	Policloruro de vinilo (PVC)
	Poliétileno de baja densidad (LDPE)
	Polipropileno (PP)
	Poliestireno (PS)
	Otros (ejemplo: ABS, SAN, PC)

Figura 3 Código SPI De Los Plásticos Reciclados

Fuente Tomada de Rivera Távora, R. (2012). Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura.

	(1) PET	(2) HDPE	(3) PVC	(4) LPDE	(5) PP	(6) PS	(7) OTROS
NOMBRE COMPLETO	POLIETILENO TEREFALATO	POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD	POLICLORURO DE VINILO	POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	POLIPROPILENO	POLIESTIRENO	PC; ABS; SAN; EVA; PMMA
PUNTO DE FUSIÓN	250 – 270 °C	125 – 135 °C	150 – 200 °C	110 – 120 °C	160 – 170 °C	70 – 115 °C	
DENSIDAD	1.37 – 1.40 g/cm ³	0.95 – 0.97 g/cm ³	1.16 – 1.45 g/cm ³	0.91 – 0.94 g/cm ³	0.90 – 0.91 g/cm ³	1.04 / 1.09 g/cm ³	
USOS Y APLICACIONES	Envases para gaseosas, Aceites, Agua mineral, cosmética, películas transparentes, fibras textiles, laminados de barrera (productos alimenticios), bandejas para microondas, geotextiles (pavimentación /caminos), películas radiográficas	Envases para detergentes, aceites de motor, champú, lácteos, bolsas para supermercados, bazar y menaje, cajones para gaseosas, cervezas, baldes para pintura, helados, caños para gas, agua, drenaje y uso sanitario, macetas, bolsas tejidas.	Botellas para aceites, agua mineral, yogurt, etc. Tuberías para agua, desagüe, suelas de calzado, sandalias, botas, capas, tapas de libros, artículos para oficina, balones, manteles, etc.	Bolsas de todo tipo: supermercados, boutiques, panificación, etc, películas para agricultura (invernaderos), base para pañales descartables, bolsas para suero, contenedores herméticos domésticos.	Película / Film (para alimentos, golosinas, indumentaria), bolsas de rafia tejidas, envases industriales (Big Bag), hilos, tapas en general, envases, cajas para bebidas, baldes para pintura, fibras para tapicería, cajas de baterías	Envases para lácteos (yogurt, postres, etc.), helados, dulces, etc., vasos, bandejas de supermercado, contrapuestas y anaqueles, máquinas de afeitar descartables, platos, cubiertos, juguetes, cassettes, planchas de PS espumado	Partes de computadoras. Teléfonos, electrodomésticos, CD's, Accesorios náuticos y deportivos, Piezas de ingeniería aeroespacial, Artículos para cosmetología; botellones de agua
VENTAJAS Y BENEFICIOS	<ul style="list-style-type: none"> • Barrera a los gases • Transparente • Irrompible • Liviano • Impermeable • No tóxico • Inerte (al contenido) 	<ul style="list-style-type: none"> • Resistente a las bajas temperaturas. • Irrompible • Liviano • Impermeable • Inerte (al contenido) • No tóxico 	<ul style="list-style-type: none"> • Liviano • Ignífugo • Resistente a la intemperie y a la corrosión • Transparente • No tóxico • Inerte (al contenido) • Buena permeabilidad. • Resistente al impacto • No es atacado por bacterias o insectos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tóxico • Flexible • Liviano • Transparente • Inerte (al contenido) • Impermeable • Económico 	<ul style="list-style-type: none"> • Inerte (al contenido) • Resistente a la temperatura (hasta 135°C) • Barrera a los aromas • Impermeable • Irrompible • Brillo • Liviano • Transparente en películas • No tóxico • Alta resistencia química 	<ul style="list-style-type: none"> • Brillo • Ignífugo • Liviano • Irrompible • Impermeable • Inerte y no tóxico • Transparente • Fácil limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia a la intemperie y cambios de temperatura. • Mejor resistencia química. • Buenas propiedades como aislante • Mayor rigidez y dureza • Transparente
SE RECICLA EN	Alfombras, fibras, films, envases para alimentos y productos no alimenticios.	Bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura.	Tuberías para electricidad y desagüe, cubrecables, suelas de calzado.	Bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura.	Tabla de plástico, muebles de jardín, pilotes, postes y vallas, pitas de rafia, baldes y conos.	Desde macetas para plantas, accesorios de oficina, aislamientos térmicos.	

Figura 4 Características y usos de los plásticos según su código SPI

Fuente: de Rivera Távora, R. (2012). Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura

Tabla 1 Componentes y características de los polímeros.

POLÍMERO	CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES	APLICACIONES
<p align="center">Policloruro de vinilo PVC</p>	<p>Versatilidad, ligero, resistente a la intemperie, alta tenacidad (soporta altos requerimientos mecánicos), fácil instalación, baja toma de humedad (cañerías), Resistente a la abrasión, al impacto, y a la corrosión, buen aislante térmico, eléctrico y acústico, no propaga llamas, resistente a la mayoría de los reactivos químicos, duradero.</p> <p>Sin duda es el más utilizado.</p>	<p>Membranas para impermeabilizar suelos, láminas para carteles, sobretodo en una gran variedad de cañerías tanto de domicilios como públicos. Electricidad: recubrimiento aislante de cables, cajas de distribución, enchufes.</p> <p>Recubrimiento de paredes, techos, piscina.</p> <p>Alfombras, cortinas tapizados, ventanas puertas, persianas muebles de exterior e interior, mangueras, carpas y recintos inflables.</p>
<p align="center">Poliuretano PU</p>	<p>Resistente a la corrosión, Flexibilidad, ligero, no tóxico, alta resistencia a la temperatura, propiedades mecánicas y productos químicos.</p>	<p>Sobre todo su uso en construcción se basa como materiales de aislamiento, en techos, cañerías, paneles.</p>
<p align="center">Poliestireno expandido EPS y PS</p>	<p>Baja conductividad térmica, gran capacidad aislante (térmico), resistencia a la compresión, alto poder de amortiguación, fácil de trabajar y manipular, estabilidad a bajas temperaturas y soporta también altas temperaturas (cañerías de agua fría y caliente)</p>	<p>Se basan fundamentalmente en aislamientos sobre todo térmicos, en cañerías, suelos flotantes, ladrillos, techos, paredes y suelos, en hormigón liviano.</p> <p>Construcción prefabricada, sistemas de calefacción, cámaras frigoríficas.</p> <p>Embalajes de transporte frágil (amortiguación). Espuma de EPS se utiliza como relleno de vacío por ejemplo en puentes reduciendo peso total.</p> <p>Electrodomésticos.</p>
<p align="center">Polietileno de alta densidad HDPE</p>	<p>Resistente a las bajas temperaturas.</p> <p>Ligero, impermeable, flexible duradero, siendo así de bajo mantenimiento y económico.</p>	<p>Recubrimiento de cañerías, como aislante ya que el HDPE aguanta de -20°C a 85°C.</p> <p>Revestimiento de cables. Caños para gas, telefonía, agua potable, minería. Láminas plásticas para aislamiento hidrófugo.</p>
<p align="center">Polietileno de baja densidad LDPE</p>	<p>Características similares, Flexible, ligero transparente, impermeable, económico</p>	<p>Revestimiento para suelos, recubrimiento de obras en construcción (cobertores de seguridad).</p> <p>Protección, tuberías para riego.</p>

<p style="text-align: center;">Polipropileno PP</p>	<p>Es el más ligero de todos los materiales plásticos buenas propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. Alta temperatura de reblandecimiento, óptima resistencia química, a la abrasión, impermeable, larga vida útil...</p>	<p>Alfombras, cañerías e instalaciones de agua fría y caliente, cajas de electricidad, enchufes. Sacos y bolsas para cargar cemento y arena y otros materiales granulados o en polvo. Se distinguen por que repelen el agua, no se ensucian ni pudren y son resistentes a la luz.</p> <p>Membranas de asfalto modificado para techos, fibras de PP para reforzar.</p> <p>Ideal para elementos de electrodomésticos. En maquinaria para la construcción.</p>
<p style="text-align: center;">Policarbonato PC</p>	<p>Inerte, alta resistencia a la temperatura, propiedades mecánicas, y productos químicos</p>	<p>Se utilizan como "vidrios" de seguridad, como vallas y cercos de seguridad transparentes.</p>
<p style="text-align: center;">Polietileno tereftalato PET</p>	<p>Gran resistencia al impacto transparente ligero impermeable.</p>	<p>Carteles y exhibidores por su resistencia a la radiación UV, el viento, clima.</p> <p>Alfombras, cortinas, muebles de exterior (jardín...)</p>

Fuente: de Rivera Távora, R. (2012). Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura

Forma de reciclaje y su uso

Polietileno Tereftalato (PET)

El PET se recicla de la siguiente forma: Una vez recolectado, los envases de PET es molidos en forma de residuos. luego estos fragmentos son separados y lavados de acuerdo con las especificaciones del mercado. Y finalmente comercializados

En Colombia según el portal www.plasticos.com la empresa Agroplast, desde el año 2008 es pionera en el tema del reciclado de botellas, para producirlas nuevamente, generando con esto un excelente ciclo productivo para aplicaciones de alto nivel.

En países como Estados Unidos, el PET en un porcentaje del 75% es recuperado y usado para hacer fibras de alfombras, ropa y geotextiles, según la sociedad de la

industria del plástico en su informe anual de reciclaje a nivel mundial. El resto es extruido en hojas para termo formado, inyectado / soplado en envases para productos no alimenticios, o compuesto para aplicaciones de moldeo.

Polietileno (PE)

Dentro de este tipo de plásticos encontramos el polietileno de alta densidad (0.940 - 0.970 g/cm³, HDPE) y el polietileno de baja densidad (0.910 - 0.940 g/cm.³, LDPE). El polietileno reciclado es utilizado para fabricar bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura, etc.

El análisis de la densidad del material estudiado y las distintas dosificaciones, lo ubica dentro de estos dos tipos, dado el resultado de su densidad, que más adelante se explica.

El polietileno, como todo residuo plástico, contiene energía comparable con la de los combustibles fósiles, de ahí que constituye una excelente alternativa para ser usado como combustible para producir energía eléctrica y calor (poder calorífico 46 MJ/kg).

El polietileno, al igual que otros plásticos, es un material demasiado valioso como para desecharlo; por lo que su valorización es siempre la opción preferible para su tratamiento. Pero de no mediar otra opción, si tienen que ser enterrados en un relleno sanitario, es importante saber que los residuos de polietileno son absolutamente inocuos para el medio ambiente. Por su naturaleza son inertes y no sufren degradación lo cual nos garantiza que no generan lixiviados de productos de degradación, líquidos o gases que puedan emitirse al suelo, aire o aguas subterráneas.

De LDPE se constituyen las bolsas Para su reciclado, las bolsas se seleccionan manualmente para separar contaminantes, se procesan mediante molienda, lavado y peletización. El mayor problema es que las tintas de impresión en las bolsas

originales producen un regranulado de color oscuro; la solución ha sido la utilización de colorantes oscuros.

Los artículos de consumo más frecuentemente producidos a partir de HDPE reciclado son botellas de detergentes y recipientes para aceite de motor. Las botellas se hacen generalmente en tres capas, la capa intermedia contiene el material reciclado. La capa interior de resina virgen proporciona una barrera fiable y la capa exterior el color y un aspecto uniforme. El HDPE reciclado se utiliza también para envolturas protectoras, bolsas de plástico, tuberías y productos moldeados como juguetes y cubos, para nuestro caso el material proveniente como alta densidad, es el material sobrante de parachoques de empresas que realizan pruebas a vehículos nuevos en el país.



Figura 5 Empresa Mapleco, bomper de vehículo.

Fuente : autor

Policloruro de vinilo (PVC)

Son productos típicamente reciclados dentro de nuestro contexto diario como : recipientes que no son para comida, cortinas para duchas, recubrimientos para tolvas de camiones, alfombras de plástico para laboratorios, suelas de calzado, mangueras, azulejos de suelo, tuberías de riego, tuberías de drenaje, accesorios, tiestos para plantas, juguetes, láminas y piezas moldeadas. Químicamente, el PVC puede ser reciclado mediante degradación térmica, la cual se inicia siempre por la emisión de HCl, formando una poli olefina que se descompone posteriormente. Se comprende así que la presencia de PVC en la mezcla de partida afecta la termólisis de todos los demás polímeros.

Una de las dificultades con el reciclaje de PVC se presenta con la recolección y la selección. Lo que no permite la identificación de las características del fondo en las botellas de PVC moldeadas mediante soplado. Este fue excluido del proceso como se ha manifestado en varios apartes de la investigación por su alto índice de toxicidad en el momento de la combustión.

Polipropileno (PP)

La mayor parte del polipropileno reciclado se deja en fragmentos mezclados, utilizados solamente para productos con bajas especificaciones como tabla de plástico, muebles de jardín, cajas, pilotes, postes y vallas. También se utiliza para elaborar pitas de rafia, baldes y conos. Este también empleado en las dosificaciones de las tabletas fabricadas.

Poliestireno (PS)

Las mejoras tecnológicas en la fabricación de la resina, sumadas a la utilización de diseños innovadores de los productos permiten que los envases de alimentos hayan

tenido una considerable disminución de peso. Los diferentes tipos de envases o contenedores de comida de PS pueden recuperarse separadamente o juntos. El PS reciclado se utiliza para fabricar tabla de espuma aislante de cimentación, accesorios de oficina, bandejas para servir comida, recipientes de basura, aislamiento, macetas, hueveras y productos moldeados por inyección.

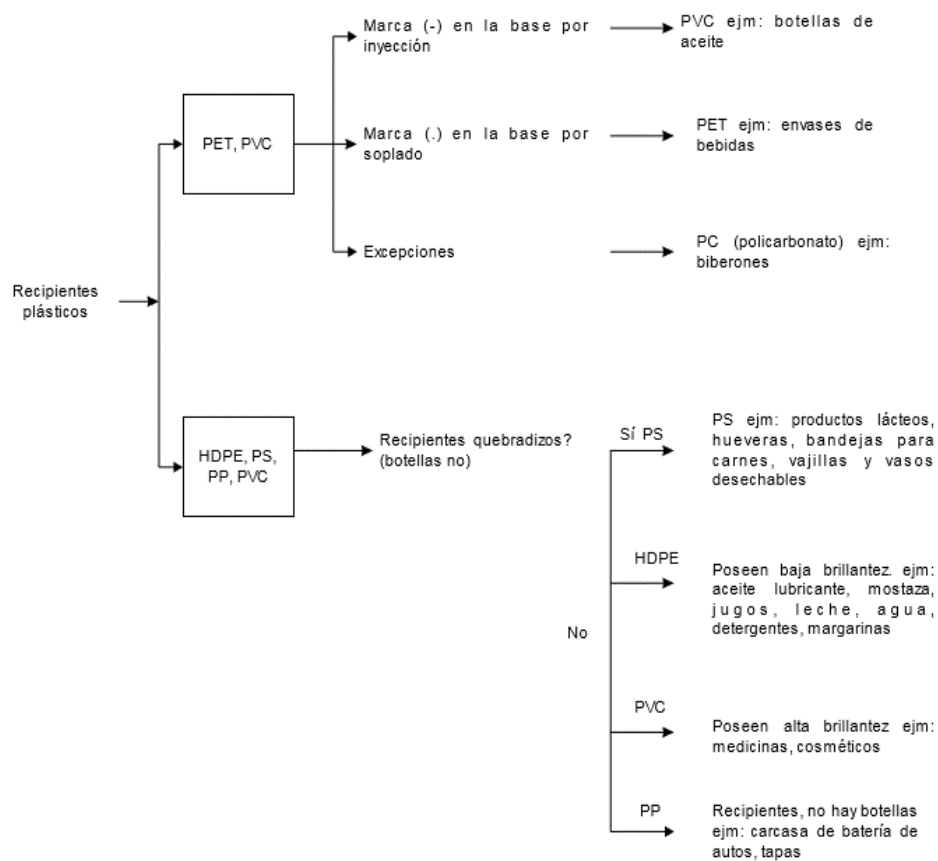


Figura 6 Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura

Fuente: de Rivera Távora, R. (2012). Propuesta de reciclaje mecánico de plásticos en la ciudad de Piura

Reciclaje De Materiales Plásticos

Procesos de Clasificación de Plástico

El reciclaje de los plásticos se describe como el proceso de recuperación y la reprocesamiento de los mismos, Debido al amplio uso en el embalaje y el envasado, la mayor parte de los desperdicios plásticos son de origen doméstico. Puede considerarse que los plásticos empleados en el embalaje, envasado y en agricultura tienen una vida inferior a un año, mientras que los que son utilizados en artículos domésticos o eléctricos presentan una duración de entre uno y diez años y los del sector del mobiliario y del automóvil no aparecen como residuos antes de los diez años.

El impacto ambiental generado por los plásticos es muy importante debido a. Su resistencia a la degradación, circunstancia que motiva su acumulación en los vertederos. De los plásticos contienen usualmente una variedad de aditivos como estabilizadores, agentes reforzantes, plastificantes, así que para obtener una tonelada de plástico es necesario recoger 20,000 botellas aproximadamente.

Valoración energética de los materiales plásticos

Es muy altamente productiva la recuperación de energía. Los plásticos se producen a base de petróleo y tienen un valor calorífico elevado, a veces incluso más elevado que el del carbón. En el siguiente Cuadro se compara los valores caloríficos de los plásticos más comunes con los de los combustibles frecuentemente usados

Material	Contenido Energético* (Kcal/kg)
Plásticos mezclas	8.902
Poliétileno PE	10.529
Poliestireno PS	9.128
Poliuretano	6.524
Policloruro de vinilo PVC	5.547
PET	5.550
Polipropileno PP	S / D
Petróleo *1	10.080
Fuel oil	10.511
Carbón	5.750
Gas natural	11.400
Maderas duras	4.668
Papel periódico	4.784
Residuos de comida	3.989

Figura 7 Valores caloríficos de los plásticos más comunes frente a los combustibles

Fuente : Tomada de Tchobanoglous, G. Gestión integral de residuos sólidos. Vol. I pag. 90-91 tabla

Según Espinosa (2009) “El Laboratorio de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Extremadura se determinó el poder calorífico de residuos plásticos mediante experiencia de laboratorio con una bomba calorimétrica PARR (norma UNE-ISO 1716)”

Identificación de plásticos

Los materiales termoplásticos pueden ser reutilizados mediante diferentes procesos de reciclaje, para los cuales, el paso más importante lo constituye la clasificación de los materiales. Las pruebas de laboratorio pueden servir para determinar los componentes de un material desconocido. Algunos métodos de pruebas muy sencillas se muestran a continuación con el fin de dar las pautas necesarias para identificar fácilmente los tipos básicos de polímeros.

Aspecto físico

El aspecto físico o visual puede identificar los materiales plásticos. Es más difícil identificar los plásticos como materia prima sin mezclar, o en pellets, que los productos acabados. Los termoplásticos se producen generalmente en forma de pellets, granulados. (Mapleco). Los materiales termoestables se suelen obtener como polvos o resinas. De las resinas termoplásticas más comunes, el polietileno Tereftalato (PET) y polipropileno (PP) tienen una textura translúcida, cerosa. Los métodos de fabricación y aplicación del producto también describen un plástico.



Figura 8 Verificación del material

Fuente: autor

Habitualmente, los materiales termoplásticos se extruyen o se someten a conformado por inyección, calandrado, moldeo por soplado y moldeo al vacío. El polietileno, el poliestireno y los celulósicos se suelen emplear en la industria de recipientes y envasados. Las sustancias como polietileno, politetrafluoretileno, poliacetales y poliamidas tienen un tacto ceroso característico. Los plásticos termoendurecibles se suelen moldear por compresión (por transferencia).

Densidad relativa

La clasificación por densidad con un sistema de flotación se realiza comparando las densidades del material plástico y sustancias líquidas de densidad conocida. Si un plástico flota en una solución con una densidad de 0.94 g/cm^3 , puede ser un plástico de polietileno de densidad media o baja. Si la muestra flota en una solución de 0.92 g/cm^3 , puede tratarse de un polietileno de baja densidad o polipropileno. Si se hunde en todas las soluciones por debajo de una densidad de 2.00 g/cm^3 , la muestra será un plástico de fluorcarbono. La presencia de cargas u otros aditivos y el grado de polimerización pueden dificultar la identificación de los plásticos por la densidad relativa, pues pueden hacer que cambie bastante la densidad de un plástico. Poliolefinas, iónomeros y poliestirenos de baja densidad flotarán en el agua (que tiene una densidad de 1.00 g/cm^3).

Madera plástica un material alternativo

El desarrollo de nuevos materiales derivados del reciclaje de plástico desde hace unos años se ha convertido de una alternativa con ventajas en diferentes ámbitos basadas en sus propiedades ya que soporta condiciones climáticas extremas y no requiere un mantenimiento, además de su valor ecológico que permite la fabricación de estructuras recicladas y reciclables que favorece el reuso y les da valor a los residuos

La madera plástica es una de las alternativas modernas más ecológicas que existen actualmente y uno de los productos manufacturados que se fabrica con el uso de residuos plásticos mezclados recuperados en programas de reciclaje. Normalmente, 50% o más de la materia prima utilizada para la madera plástica se compone de polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP). El polietileno de alta actúa como adhesivo y encapsula plásticos de alta fusión y aditivos (fibras de vidrio y fibras de madera) dentro de una estructura rígida. Otros aditivos son normalmente incorporados dentro de una extrusión mixta para mejorar la apariencia o el rendimiento de los productos de madera. Estos aditivos incluyen agentes espumantes, estabilizadores UV y pigmentos. Pruebas anteriores y programas de investigación han mostrado las propiedades ingenieriles de perfiles de madera plástica que permiten ser usados en variedades de aplicaciones tales como pilotes marinos, muelles y sus superficies, cercas y bancas para parques. (Vincent T. Breslin a, 1998)

La madera plástica es ampliamente comercializada como alternativa a la madera tratada con arseniato de cobre cromado (CCA) para aplicaciones marinas. La madera plástica está diseñada para durar más que los productos de madera convencionales y se afirma que poseen propiedades beneficiosas tales como alta resistencia, durabilidad y resistencia a la corrección. También se comercializa como un material ambientalmente preferible al CCA para tratar la madera. La madera

plástica de construcción posee una densa superficie lisa, dura resistente al daño debido a la polilla de mar y no necesita ser tratada con conservantes antes de su uso en el entorno marino. Estudios recientes han demostrado que la liberación de cobre, cromo y arsénico de la madera tratada con CCA es continua en el medio ambiente. La madera tratada con CCA también ha sido identificada como una fuente de contaminación en los sedimentos marinos. En contraste, se demostró que la lixiviación de metales y contaminantes orgánicos de la madera de construcción de plástico en 15 agua de río era baja y no se identificaron altos compuestos tóxicos. (Vincent T. Breslin a, 1998)

Tipos de Madera Plástica

Plastic Lumber: Madera 100% de plástico reciclado obtenida del proceso de reciclaje de materiales HDPE (polietileno de alta densidad y otros materiales termoplásticos)

Características

- Impermeable ya que no deja pasar el agua ni la humedad
- Anticorrosivo no se deteriora ante la acción de productos químicos
- Resistencia a la intemperie es posible someter este material a cambios extremos climatológicos
- Resistencia mecánica
- Higiénico: inmune a microorganismos, roedores e insectos
- Seguro no se agrieta ni produce astilla

La fabricación de la madera plástica tiene dentro de sus ventajas un proceso limpio, el cual inicia con la recolección del plástico reciclado en la planta en donde se separan los termoplásticos, se trituran se mezclan homogéneamente y se funden en un proceso de extrusión a alta temperatura, posteriormente a este compuesto se le

añaden aditivos para mejorar su resistencia frente a la intemperie y el envejecimiento

Moldeo por extrusión. La extrusión de polímeros es un proceso industrial, basado en el mismo principio de la extrusión general, sin embargo, la ingeniería de polímeros ha desarrollado parámetros específicos para el plástico, de manera que se estudia este proceso aparte de la extrusión de metales u otros materiales. En el moldeo por extrusión se utiliza un transportador de tornillo helicoidal. Las mezclas de polímeros son transportadas desde la tolva, a través de la cámara de calentamiento, hasta la boquilla del molde. Las muestras de plásticos reciclados se adicionan a la tolva, en donde el material es dosificado y pasa al husillo, (tornillo de Arquímedes) que gira concéntricamente en un cilindro a temperaturas controladas, allí es fundido, arrastrado por medio de presión y finalmente es forzado a pasar a través de un Dado también llamado boquilla, y se obtiene el perfil geométrico preestablecido, para los ensayos realizados se utilizan estacones y tablonés.

Recolección: La materia prima es obtenida en el Urabá antioqueño, en especial de aquellos cultivos de plátano y banano, es clasificada como recolección del plástico reciclado en la fuente, ya que la separación de los diferentes polímeros se realiza directamente en los cultivos, es una forma práctica y económica de lograr una preselección efectiva. Las condiciones más importantes para que este método funcione de manera correcta, es la capacitación que se hace necesaria para que las personas encargadas de la recolección selectiva estén preparadas para reconocer los diversos materiales plásticos de los demás desechos de los cultivos

Selección: Una vez el material ha sido separado de los desechos no plásticos, se procede a la clasificación según el tipo de plástico. El material es clasificado en: “guantelete” (polietileno de baja densidad) y “rafia” (polipropileno), este último se clasifica de primera y de segunda, donde la rafia de primera es aquella que se almacena directamente después de ser utilizada, y rafia de segunda, material que

se encuentra enterrado en los mismos cultivos, por lo que sus propiedades difieren de la primera.

Lavado y Secado: Se dan en el lugar de recolección, utilizando un tambor giratorio y presión de agua, con esto se busca eliminar los restos de desechos, impurezas y tierra, etc. El proceso de secado se da por los rayos directos del sol. La calidad de la limpieza del material no está determinada solo por la pureza y el tipo de plástico involucrado, sino también por el grado de impurezas residuales.

Prensado Y Empacado: Ya separados y lavados, los materiales son prensados y empacados, listos para ser transportados a la empresa donde serán procesados.

Picado: Al llegar a la empresa la materia prima es descargada y desempacada para luego ser llevada a una picadora, donde se trituran los materiales para disminuirles el tamaño y hacer más fácil el proceso de aglutinado.

Aglutinado: El material picado se lleva a la maquina aglutinadora, donde se compacta incrementando Recolección Selección Lavado y secado Empaque y distribución Aglutinado Picado Proceso De Recolección, Separación, Y Preparación De Materia Prima De Plásticos Reciclados Prensado y empacado Limpieza Paris et al. 1456 Rev. LatinAm. Metal. Mater. 2009; S1 (4): 1453-1460 temperatura y formando así una especie de granos o crispetas, de tamaño y forma un poco más homogénea y reducida.

Empaque Y Distribución: El material aglutinado es empacado en costales, y luego distribuido a la planta de procesamiento

La madera plastica es un material versátil el cual se está usando en cuantiosas aplicaciones durables. Las aplicaciones más comunes de este material son

- Mobiliario Urbano

- Decks
- Puentes
- Bancos
- Papeleras
- Paneles
- Jardineras
- Pisos para caballerizas y establos

Según MJ Spear , .M.Carus, en Wood Composites, 2015 Los compuestos de madera y plástico (WPC) han demostrado los requisitos técnicos y de precios para convertirse en nuevos materiales producidos en masa, de forma similar al uso de materiales termoplásticos reciclados. El moldeo por inyección, el termoformado y posiblemente otras tecnologías cobrarán importancia en Europa más allá del sector de plataformas ya bien desarrollado. Aquí la técnica de moldeo por inyección tiene el mayor potencial de aplicación en comparación con otras técnicas. Las máquinas están disponibles y se pueden usar de muchas maneras, tanto dentro como fuera de la industria automotriz.

Y de acuerdo a investigaciones realizada en Estados Unidos y Europa se ha demostrado que los WPC poseen un rendimiento estructural comparable al de algunos productos de madera. También se ha demostrado que estos compuestos se pueden diseñar para soportar cargas ambientales y estructurales significativas. Sobre la base de estos desarrollos, la capacidad de diseñar formulaciones y manipular la geometría del producto ofrece oportunidades emocionantes para el futuro.

Dejando claro que la industria está explorando aplicaciones más sofisticadas para estos compuestos únicos. Hay pocas dudas de que esta clase emergente de materiales tiene numerosas oportunidades actuales y potenciales tanto en aplicaciones estructurales como no estructurales. Los WPC, como sustitutos de la madera en varias aplicaciones al aire libre, ya han capturado una notable cuota de mercado; y parece que no hay una razón convincente por la cual esta tendencia

deba cesar. A medida que surgen aplicaciones más exigentes, se deben desarrollar medidas de rendimiento más sofisticadas y significativas

Dentro de este campo, se puede utilizar una amplia gama de variaciones y técnicas para mejorar las propiedades, ya sea mediante el uso de fibra de madera o fibra de hoja o estera picada de mayor relación de aspecto para crear un material reforzado en lugar de relleno (Joseph et al., 1993; Raj et al., 1989a) Gran parte de la investigación se ha centrado en aspectos de compatibilidad entre los plásticos de uso común y la fibra o harina de madera para aumentar el rendimiento. Se han realizado otros esfuerzos para reducir la densidad, haciendo espuma en el núcleo del perfil extruido o diseñando secciones huecas para aplicaciones específicas. Con la transición al moldeo por inyección, se realizó un trabajo considerable para abordar la calidad de la superficie y la capacidad de llenado del molde de la masa fundida WPC, ya que la viscosidad aumenta por la presencia de harina o fibra.

Propiedades Mecánicas

Para determinar la capacidad que tiene este material se determinó las siguientes propiedades como objeto de estudio. explorando la estructura básica y las propiedades de los polímeros y la madera individualmente para sentar las bases para una mayor comprensión de los compuestos hechos a partir de ellos. Los conceptos y propiedades básicos se resumen brevemente con énfasis en los materiales comunes a la tecnología comercial actual y su resistencia.

Densidad

Se tomó como referencia la siguiente investigación Evaluación De Las Propiedades Mecánicas De Los Perfiles Extruidos A Partir De Mezclas De Polímeros Reciclados Para La Fabricación De Estibas De Maderas Plásticas En Maderpol S.A.S.

Peso del Material	g.		PP Fibra	PP Aglutinado
PP Fibra (1)	143.7	Volumen del Material Cm ³	400	400
PP Fibra (2)	148	Densidad aparente del Material g/cm ³ (1)	0.36	0.34
PP Fibra (3)	142.4	Densidad aparente del Material g/cm ³ (2)	0.37	0.35
PP Aglutinado (1)	137.5	Densidad aparente del Material g/cm ³ (3)	0.36	0.33
PP Aglutinado (2)	139.8			
PP Aglutinado (3)	130.9			

Figura 9 Peso de las 3 muestras de PP de fibra v PP aglutinado
Autor. Universidad EAFIT

Absorción

Se habla de absorción como una de las propiedades físicas que se analizó en la investigación de este nuevo elemento que es la madera plástica, es su capacidad de soportar la humedad.

El efecto de la humedad se modeló considerando la contracción de las escalas de tiempo a través de un factor de cambio de humedad. La base de este método es el aumento de la movilidad de las cadenas plastificadas (material suavizado) que acelera los mecanismos de relajación del polímero, reduciendo los intervalos de tiempo en los que ocurren. Un ejemplo de su uso en la fluencia a largo plazo de la madera se puede encontrar en el trabajo de Tissaoui (1996)

Flexo

Tabla	Composición	Carga (N)	Esfuerzo (MPa)
1	PP(50%);PE(50%)	4008	30.98
2	PP(50%);PE(50%)	3810	29.45
3	PP(50%);PE(50%)	3944	30.49
4	PP(50%);PE(50%)	3668	28.35
5	PP(50%);PE(50%)	3523	27.23
6	PP(70%);PE(30%)	4085	31.58
7	PP(70%);PE(30%)	4236	32.74
8	PP(70%);PE(30%)	4367	33.76
9	PP(70%);PE(30%)	4342	33.56
10	PP(70%);PE(30%)	4422	34.18
11	PP(30%);PE(70%)	3033	23.45
12	PP(30%);PE(70%)	3460	26.75
13	PP(30%);PE(70%)	3838	29.67
14	PP(30%);PE(70%)	3985	30.80
15	PP(30%);PE(70%)	3969	30.68

Figura 10 Resultados de las pruebas de Flexión

Autor. Universidad EAFIT

Los resultados que se observan en la ilustración anterior son la referencia tomada de la investigación de la Universidad EAFIT Después de hacer cada prueba de flexión son resultados de fuerza en Newton con las gráficas de fuerza vs desplazamiento que está anexa a esta investigación; después de obtener estos resultados se procede a calcular los esfuerzos de flexión para cada una de las pruebas y su grafica de esfuerzo vs deformación. Los siguientes son los resultados de la prueba para las tablas y los largueros, estos resultados son expedidos por la máquina y se dan en fuerza en Newton (N) los cuales son valores máximos de resistencia a la flexión de los perfiles antes de la ruptura o en 83 su deflexión

máxima; también se muestra en la tabla el esfuerzo máximo de cada perfil en mega pascales (MPa) calculado con la fórmula de flexión.

Table 1. Major nonfibrous plastics uses (millions of lb).

Plastics Use	1992	1993
Packaging	16,519	17,338
Building	11,414	12,764
Transportation	2,475	2,406
Appliances	1,346	1,479
Electrical/Electronic	1,975	2,072
Furniture	1,143	1,289
Toys	846	921
Housewares	1,546	1,600

Source: *Modern Plastics*, 1994.

Table 6. Average mechanical properties measured at three strain rates.

Strain Rate	0.0083% per min			0.83% per min			83% per min		
	Modulus MPa	Yield Stress MPa	Ultimate Strength MPa	Modulus MPa	Yield Stress MPa	Ultimate Strength MPa	Modulus MPa	Yield Stress MPa	Ultimate Strength MPa
B	317	6.20	9.46	441	9.72	13.2	591	12.9	18.1
D(br)	340	6.92	10.3	571	11.5	16.0	839	18.2	25.3
F	484	9.24	13.6	727	14.7	20.1	950	21.2	28.8
L	1140	7.95	9.04	1320	12.4	13.7	1840	17.4	18.2

Table 7. Coefficient of variation for the mechanical properties measured at three strain rates.

Strain Rate	0.0083% per min			0.83% per min			83% per min		
	Modulus %	Yield Stress %	Ultimate Strength %	Modulus %	Yield Stress %	Ultimate Strength %	Modulus %	Yield Stress %	Ultimate Strength %
B	6.24	2.29	1.69	6.65	4.68	2.94	9.66	7.96	11.56
D(br)	4.04	1.57	2.19	7.99	3.87	4.91	13.8	13.57	6.67
F	11.5	1.99	1.13	9.48	2.80	3.10	5.39	4.16	2.94
L	3.12	8.96	3.87	2.76	10.04	6.25	10.2	8.6	6.90

Figure 11 Development an Testing of Plastic Lumber **Figure 12** Development an Testing of Plastic Lumber Material Material

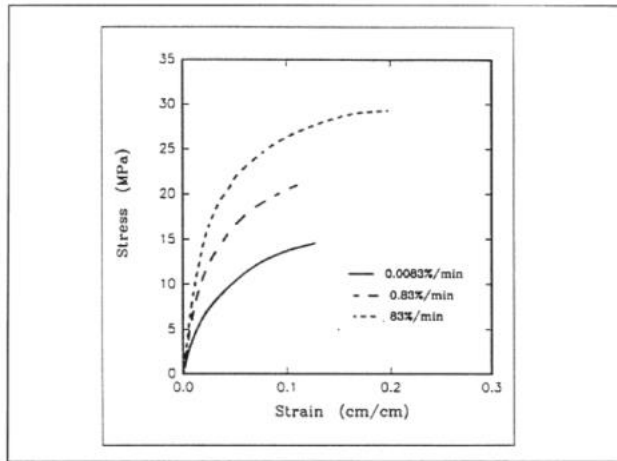


Figure 18. Company B—Stress-strain curves at three different strain rates.

Figure 13 Development an Testing of Plastic Lumber Material

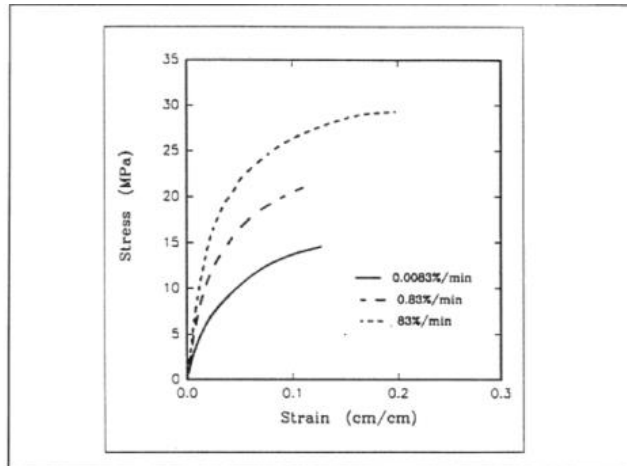


Figure 18. Company B—Stress-strain curves at three different strain rates.

Figure 14 Development an Testing of Plastic Lumber Material

Experiencias a nivel global

A lo largo de la investigación realizada se hallaron diferentes trabajos y pruebas en el mundo en las que se indica y sugiere que el plástico reciclado es un material alternativo en la construcción de infraestructura.

En el proyecto PlasticRoad, en Zwolle, Países Bajos, se relaciona el empleo de plástico para la construcción de módulos en los que, a través de orificios se acomodan todas las instalaciones que conforman las estructuras de la ciudad; algo

muy pertinente para el presente trabajo, dado que será la base para otros estudios que permitan establecer el uso de elementos en madera plástica para pavimentos. (residuosprofesioal.com 2016)

Los estudios en Europa relacionados con el empleo de madera plástica, muestran un crecimiento del 10% al 15%, llegando a cifras de 260.000 toneladas en el año 2012³. Es Alemania el pionero en el empleo de este material el cual emplea el mismo proceso de extrusión llevado y utilizado por MAPLECO.

La empresa alemana fabricante de automóviles BMW desde el 2012 hace sus tableros y partes de sus puertas de madera plástica.

Un caso reciente en Europa es la fabricación de vías y ciclorrutas elaboradas a partir del plástico reciclado como su material principal⁴.(Herctor Rodriguez 2016)

Respecto a Suramérica, Perú ocupa el primer lugar como productor de elementos elaborados a partir de polímeros reciclados llevados a extrusión y en especial la empresa Madecoplast. Se resalta la fabricación de pisos calientes en madera plástica y que a la par con el presente trabajo podría tener acierto en el empleo de pavimentos cálidos, en ciudades frías, esto es de acuerdo a una investigación realizada en la universidad de Los Andes⁵. (

Colombia apenas inicia su ingreso en la innovación con madera plástica, empresas como: Eco maderas plásticas (Bogotá), MPC (Neiva), Maderplastic (Valle del Cauca), Mapleco (Tunja), empiezan a posicionarse en el sector.

³Información tomada de <http://www.plastico.com/> (2015) "Madera plástica: en un mercado que no parará de crecer, el polietileno es rey": <http://www.plastico.com/temas/Madera-plastica,-en-un-mercado-que-no-parara-de-crecer,-el-polietileno-es-rey+108640>

⁴ Tomado de, <https://www.nationalgeographic.com.es/> (2018) "Carreteras fabricadas con plástico": https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/actualidad/carreteras-fabricadas-plastico_13133

⁵Estos datos son tomados de una investigación de la universidad de los andes Delgado y Medina (2016) Extrusión De Perfiles Espumados De Madera Plástica

La economía circular es tendencia en el mundo con el reciclaje de materiales que vuelven a ser usados para producir elementos iguales o diferentes de los originales.

De acuerdo con la rentabilidad económica y ambiental de la madera plástica, es evidente que logrará posicionarse dentro del mercado y más como un material que en temas de sostenibilidad llevará las de ganar.

El análisis costo/beneficio/durabilidad de la madera plástica sin duda alguna es un criterio muy importante. A manera de ejemplo si un adoquín en arcilla de un pavimento articulado, tiene una durabilidad promedio de 7 a 10 años en deterioro físico, probablemente uno en madera plástica estará por encima de los 20 años fácilmente.

Según (Paris Londoño & González Villa, 2009) En el valor de la densidad de manera macroscópica, se puede definir lo siguiente: “La densidad de una sustancia homogénea, como la relación entre la masa de una cantidad determinada de la sustancia y el volumen ocupado por ella: $\rho = m/v$, donde ρ = Densidad, m = Masa de la muestra y v = Volumen ocupado por la masa”. Así mismo, (Paris Londoño & González Villa, 2009) relacionan valores de densidades experimentalmente obtenidos para los polímeros reciclados.

Tabla 2 Valores de densidades obtenidos experimentalmente para los polímeros reciclados

MATERIAL	DENSIDAD PROMEDIO (gr/cm ³)
PP1	0.818
PP2	0.673
LDPE	0.683

De acuerdo con (Wechsler, 2008) Algunas de las principales ventajas de los compuestos de plástico de madera (WPC), son su resistencia contra el deterioro biológico para aplicaciones al aire libre, donde los productos madereros no tratados no son adecuados. La sostenibilidad de esta tecnología se hace más atractiva cuando se considera el bajo costo y la alta disponibilidad de partículas finas de residuos de madera.

Pavimentos

Generalidades

De acuerdo con Fredy Reyes Lizcano y Hugo Rondón (2004) los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales compuestas por conjuntos de capas superpuestas relativamente horizontales diseñadas con el fin de soportar las cargas establecidas por el tránsito y por las condiciones ambientales. Tienen como fin ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie.

En otras palabras, el pavimento es la conformación de una estructura física por capas con materiales de unas características especiales de capacidad de soporte, aplicados bajo procesos constructivos adecuados, con una función específica de proporcionar comodidad, transpirabilidad, durabilidad, economía, resistencia a los esfuerzos transmitidos por el tránsito, asociado con obras de drenajes y protección asegurando la estabilidad de banca y taludes donde sea necesario, de acuerdo a los estudios y diseños establecidos. Esta estructura estratificada o de capas se apoyan sobre la subyacente de una vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos que las cargas repetidas del tránsito le transmiten durante el periodo para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

En síntesis, el pavimento se caracteriza por tener una superficie de rodadura de color y textura apropiados, resistente a la acción del tránsito, intemperismo y otros agentes erosivos, transmitiendo a las capas y al terreno natural, los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito, de tal forma que no sobrepasen los esfuerzos que éstas resisten.

Tipos de pavimentos

Los pavimentos, de acuerdo con los criterios tradicionales, pueden clasificarse en rígidos, flexibles y articulados o compuestos.

El pavimento rígido es la conformación de una estructura con una capa de mejoramiento de la subrasante con material granular de ciertas especificaciones, si se requiere, una capa de material granular con características más específicas de soporte como base o sub base, y una capa de rodadura en concreto hidráulico con características debidamente diseñadas de acuerdo el nivel de complejidad de la vía. Su costo de construcción es muy elevado.

El pavimento flexible puede definirse como una estructura vial conformada por una capa asfáltica apoyada sobre capas de menor rigidez. La resistencia mecánica del suelo que la compone debe ser capaz de resistir dicho esfuerzo sin generar deformaciones que causen el deterioro funcional o estructural de la vía. Además de ello debe resistir la influencia del medio ambiente.

El pavimento debe estar construido de tal forma que sea resistente a los fenómenos de fatiga y acumulación de las deformaciones permanentes inducidas por las cargas constantes vehiculares que se repiten en el tiempo. Debe permitir la circulación segura y correcta del parque automotor durante su vida útil e impedir la penetración directa del agua a las capas subyacentes, restringiendo la pérdida de resistencia al corte que pueden experimentar las capas granulares de la base y la sub base

El pavimento articulado está compuesto por una capa de rodadura elaborada con bloques de concreto prefabricado o arcilla, llamados adoquines, de espesor uniforme e iguales entre sí. Esta puede ir sobre una capa delgada de arena la cual, a su vez, se apoya sobre la capa de base granular o directamente sobre la subrasante, dependiendo de su calidad y de la magnitud y frecuencia de las cargas soportadas por el pavimento.

La sub base y la base se colocan entre la subrasante y la capa de rodadura dándole mayor espesor y capacidad estructural al pavimento. Pueden estar compuestas por dos o más capas de material seleccionado de acuerdo a la complejidad de la vía.

La capa de arena es una capa de poco espesor, de arena gruesa y limpia que se coloca directamente sobre la base; sirve de asiento a los adoquines y como filtro para el agua que eventualmente pueda penetrar por las juntas entre estos. Se deberá utilizar una arena cuya procedencia sea de origen natural o de trituración, no deberá contener residuos sólidos, residuos vegetales, ni materia orgánica y deberá cumplir las especificaciones de la norma INV E – 133-07.

El sello de arena está constituido por arena fina que se coloca como llenante de las juntas entre los adoquines y contribuye al funcionamiento, como un todo, de los elementos de la capa de rodadura.

De acuerdo conceptualización y especificaciones técnicas por las normas establecidas especialmente INVIAS - Capítulo 5 Art. 510, los adoquines deberán cumplir los requisitos generales establecidos en la norma NTC 2017, “Adoquines de concreto para pavimentos”, los cuales fueron reemplazados por los requisitos de calidad establecidos o indicados en la Tabla 510 - 1 Norma INVIAS relacionada, para resistencia a la flexotracción, absorción de agua y resistencia a la abrasión.

Los adoquines en concreto son elementos no aligerados en su masa, de concreto prefabricado utilizados como material de acabado para la construcción de superficies para tránsito peatonal y pavimentos de tráfico vehicular sobre llanta neumática. Estos adoquines no están diseñados para pavimentos que requieran soportar cargas puntuales (estáticas o dinámicas), tráfico de vehículos con llantas metálicas, orugas, llantas con cadenas o taches, u otros tipos de tráfico altamente abrasivos.

Los adoquines de concreto se clasifican según la geometría general y según la masa; la selección dependerá del diseño, del uso y de las características de la superficie adoquinada en concordancia a lo determinado en la norma NTC 2017. Esto quiere decir, que el adoquín es de una forma única, básicamente rectangular, que se puede colocar siguiendo diversos patrones de colocación como espina de pescado, hileras, tejido de canasto etc. Según su masa, están constituidos por dos capas de concreto de características diferentes, la inferior contra la cara de apoyo y de concreto gris y la superior contra la cara de desgaste y de diferentes características que el anterior por su dosificación, textura, color, o por la incorporación de diversos tipos de agregados.

Los adoquines en general, deben tener una absorción de agua total ($A_a\%$) (para todo el volumen del espécimen) no superior al 7% como valor promedio para los especímenes de muestra. El ensayo de absorción se debe realizar de acuerdo a lo establecido en la NTC 2017, antes mencionada.

Los adoquines de concreto deberán cumplir los requisitos a la flexotracción ó módulo de rotura (M_r) establecidos en la NTC 2017 (Tabla 2) de Especificación técnica de adoquines – Desarrollo Urbano de Alcaldía mayor de Bogotá, como fuente de apoyo o referencia.

Tabla 3 Módulo de rotura máximo (NTC 2017)

Módulo de rotura (Mr) a los 28 días mínimo (MPa)		Longitud de la huella (lh) Máximo mm
Promedio de 5 adoquines	Individual	Promedio de 5 adoquines
5,0	4,2	-
4,2	3,8	23

Fuente: IDU

El pavimento articulado deberá cumplir con los siguientes estándares de calidad:

- Deberá presentar una superficie uniforme cumpliendo con las cotas y pendientes especificadas en el diseño.
- La cota de cualquier punto del pavimento terminado no deberá variar en más de cinco milímetros (5 mm) de la proyectada.
- La superficie terminada no podrá presentar irregularidades mayores a cinco milímetros (5 mm) cuando se compruebe con una regla de tres metros en cualquier punto que se escoja.
- Deberá cumplir con el patrón de diseño y colocación especificados en él.
- El alineamiento de los adoquines no deberá variar en más de tres milímetros (3 mm).
- El pavimento adoquinado deberá presentar sensata uniformidad en el color. No deberá presentar manchas.
- No se recibirán elementos que presenten desportillamiento y fisuras. Las piezas no podrán ser menores a 1/3 de su tamaño.
- No se recibirá el pavimento adoquinado si no cumple con los requerimientos del sellado de juntas.
- El supervisor emitirá un informe escrito referente al cumplimiento de los trabajos, en caso que el pavimento adoquinado no cumpla con algunos de los requisitos anteriormente expuestos, la actividad no podrá ser recibida a satisfacción

y el contratista tendrá la obligación de realizar las modificaciones necesarias para el correcto recibo de los trabajos y así poder dar continuidad con la actividad.

Pruebas aplicadas a los adoquines

Entre las pruebas aplicadas a los adoquines, y que se realizaron a los elementos de madera plástica en el presente trabajo están la densidad, la absorción y el ensayo de flexo tracción y módulo de rotura.

Ensayo de Densidad

En el ámbito de la química y de la física, la densidad es la relación entre la masa de un cuerpo o sustancia y el volumen que ocupa. Esta propiedad describe el grado de compacidad del cuerpo o sustancia, es decir, qué tan unidos están los átomos, moléculas o partículas. Ya que cada material tiene diferente densidad, esta medida es útil para diferenciarlos.

Ensayo de Absorción

El ensayo tiene como objetivo determinar la capacidad de absorción de agua de los materiales relacionando la masa de la pieza en seco y la masa de la pieza saturada en agua después de haber sido puesta en inmersión.

La prueba consiste en someter un número determinado de elementos a la impregnación en agua, determinando la cantidad de agua que ha sido capaz de absorber cada uno de ellas. Esta es una de las propiedades que permite evaluar la aptitud de un material como adoquín desde el punto de vista de su impermeabilidad.

Ensayo de Flexo tracción y Módulo de Rotura

El módulo de rotura es el esfuerzo máximo que puede resistir un material cuando es sometido a una carga. En el caso del concreto, corresponde al esfuerzo máximo en la fibra extrema, que se desarrolla al someter una viga a la flexión. Es entonces

una medida de resistencia del material y se determina a partir del ensayo de flexo tracción.

La resistencia a la flexión del concreto, que se usó como referencia para los ensayos sobre las tabletas de madera plástica, se determina por medio de ensayos con vigas de sección cuadrada elaboradas, tomando como referencia la norma ASTM C-192 y C-31. A menudo se refiere al módulo de rotura. El ensayo, el cual se encuentra descrito en la norma ASTM C-78, consiste en apoyar las vigas a 2,5 cm como mínimo de sus extremos, dejando una luz de 45 cm y cargándolas en dos puntos situados en los dos tercios medios de la luz. Cuando se alcanza su esfuerzo máximo, éste es llamado módulo de rotura (MR) y se calcula de la siguiente manera siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la luz libre de la viga:

$$MR = \frac{PL}{bd}$$

Donde:

MR=módulo de rotura del concreto en kg/cm²

P=Carga máxima aplicada en kg L=Luz libre entre apoyos en cm

b=Ancho de la viga en cm

d=Altura de la viga en cm

Si la falla se diera fuera del tercio medio de la viga, pero no se encuentra separada de ésta por más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre, el módulo de rotura se calcula de la siguiente forma:

$$MR = \frac{Pa}{bd}$$

Donde:

a=distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga en cm.

Capítulo 3 – Normativa aplicable

Como se mencionó con anterioridad no existen normas específicas para la aplicación de los ensayos físicos y mecánicos en la madera plástica. Sin embargo, teniendo en cuenta que este trabajo es la base para futuras investigaciones de este material para emplearlo en pavimentos, se recurrió a la normatividad colombiana disponible en cuanto a los ensayos y a los valores de referencia. Los ensayos fueron adaptados para el material en estudio.

En la tabla 2 se relacionan las normas adaptadas por El Instituto Nacional de Vías, las cuales hacen referencia a los ensayos de absorción y flexo tracción.

Tabla 4 Normatividad de INVIAS para aplicación de ensayos específicos en materiales.

ENSAYO	NORMA REALIZACIÓN Y MONTAJE ENSAYO
Absorción	1. INV E - 427 – 13, (Absorción de agua por los adoquines de concreto)
Flexo tracción	1. INVIAS 414-07 Resistencia a la flexión del concreto método de la viga simple cargada en los tercios de la luz.

En la tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas para adoquines de arcilla.

Tabla 5 Especificaciones técnicas para Adoquines NTC

ENSAYO	NORMA	Valor admisible	
Absorción de agua fría. Max %	NTC 3829 “Adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano”	Adoquín Tipo I	11
		Adoquín Tipo II	17
		Adoquín Tipo III	NO HAY LIMITE

<p>Flexo tracción/Módulo de Rotura. Mpa</p>	<p>NTC 2017 Requisitos de resistencia a la flexo tracción Módulo de Rotura.</p>	<p>3.8 -4.2</p>
--	---	-----------------

Fuente: Autor

- Tipo I= Adoquines expuestos a alta abrasión.
- Tipo II= Adoquines expuestos a una abrasión intermedia.
- Tipo III= Adoquines expuestos a baja abrasión.

En cuanto al aprovechamiento de los materiales reciclables para generar alternativas ecológicas dentro de los procesos industriales del país, en Colombia existen diferentes Normas que regulan la disposición y tratamiento de los residuos sólidos. Entre ellas está la resolución 1407 del 2018 *“que fomenta el aprovechamiento, la innovación y el ecodiseño de los envases y empaques que se ponen en el mercado”*.

Capítulo 4 - Resultados

Mezclas

Los adoquines a ensayar están constituidos por plástico 100% reciclado, cuyo proceso de manufactura es por extrusión del material a partir de diferentes mezclas compuestas de:

- Polietileno de alta densidad, HDPE: Bomper o parachoques de carro que llegan en tamaños considerables y son reducidos a tamaños que permitan su homogeneidad con los demás plásticos
- Polietileno de y baja densidad, LDPE: Empaques de cojines de champú (sachets)
- Polipropileno, PP: zunchos para embalaje de cajas de cartón
- Reuso: hace referencia a los sobrantes que se generan en el momento de la fabricación de las piezas de madera plástica. Dicho material vuelve al ciclo de producción de las plaquetas, cerrándolo de manera que prácticamente no hay residuos que disponer o sobrantes que recoger.

En la tabla 5 se describen las dosificaciones empleadas y el número de plaquetas de cada lote para analizar y realizar cada uno de los ensayos especificados.

Tabla 6 Dosificación de materiales para análisis en ensayos físicos y mecánicos

DOSIFICACIÓN		PROPORCIÓN	UNIDADES POR LOTE
1	HPDE	50 %	60
	LDPE	50 %	
2	LDPE	50 %	60
	PP	50 %	
3	REUSO 2	20 %	60
	LDPE	50 %	
	PP	30 %	
4	REUSO 3	20 %	60
	LDPE	50 %	

DOSIFICACIÓN		PROPORCIÓN	UNIDADES POR LOTE
	PP	30 %	
5	REUSO 4	20 %	60
	LDPE	50 %	
	PP	30 %	

Fuente: Autor

- Reuso 2: material sobrante de la mezcla 2
- Reuso 3: material sobrante de la mezcla 3
- Reuso 4: material sobrante de la mezcla 4



Figura 11 En el suelo material sobrante denominado reuso

Fuente: autor

Construcción de elemento tipo tableta a ensayar.

La elaboración de las tabletas a ensayar se realizó luego de determinar cada mezcla anteriormente descrita, Estas se elaboraron en una formaleta de medidas 0,10x0.025x3m, posteriormente con sierra eléctrica se cortaron cada 20 cm. Finalizando este proceso.

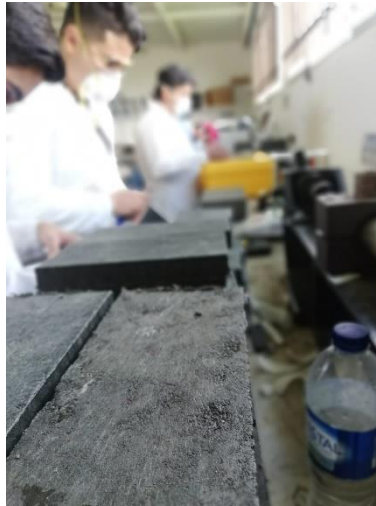


Figura 12 Laboratorio y ensayos

Fuente Autor

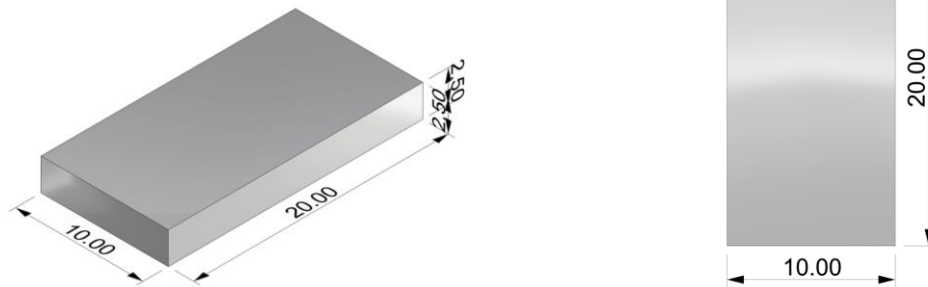


figura 13 Adoquines o tabletas a ensayar con sus medidas aproximadas

Fuente Autor

Ensayos

7.1. -Densidad

Para cada plaqueta se determinaron sus dimensiones y masa, calculando así la densidad del material de cada dosificación.

Para la realización de este ensayo, se tuvieron en cuenta 20 plaquetas por cada dosificación, para un total de 100. El paso a seguir fue medirlas y pesarlas para calcular su densidad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V = L \times B \times H$$

$$\rho = \frac{M}{V}$$

En donde:

V = volumen de la plaqueta, cm³

L = largo de la plaqueta, cm

B= ancho de la plaqueta en cm

H= espesor plaqueta en cm

En la **Tabla 7 Estadísticas descriptivas de las Pruebas de Densidad** se presentan los estadísticos descriptivos de las 5 mezclas respecto a la densidad, Cabe destacar que la mezcla 3 obtuvo el menor valor promedio con 0.89 g/cm³, mientras la mezcla 4 con una densidad de 1.050 g/cm³, sin embargo con una desviación estándar baja hace que los intervalos de confianza estén cercanos a la media, comprobando de esta manera que las cinco mezclas estudiadas se encuentran dentro de los valores promedios de este material en el marco de referencia estudiado y propuesto en el trabajo.

Por otra parte, tanto la media como la mediana son valores casi idénticos, lo que nos lleva a pensar que la muestras presentan una distribución normal.

En el anexo c se encuentran todos los resultados obtenidos. En la figura 13 se observan los resultados de manera gráfica para la mezcla 5. Este comportamiento es similar en todas las mezclas.

Tabla 7 Estadísticas descriptivas de las Pruebas de Densidad

Estadístico	Mezcla 1 (50% HPDE + 50% LDPE 50%)	Mezcla 2 (50% LDPE + 50% PP)	Mezcla 3 (20 % REUSO 2 + 50% LDPE + 30 % PP)	Mezcla 4 (20 % REUSO 3 + 50 % LDPE + 30 % PP)	Mezcla 5 (20% REUSO 4 + 50% LDPE + 30 % PP)
No. de observaciones	20	20	20	20	20
Mínimo	0.850	0.849	0.806	0.920	0.915
Máximo	0.963	1.057	0.957	1.198	1.087
1° Cuartil	0.877	0.954	0.856	0.974	0.932
Mediana	0.889	0.979	0.894	1.021	0.970
3° Cuartil	0.913	0.998	0.928	1.125	1.019
Media	0.893	0.976	0.890	1.050	0.980
Varianza (n-1)	0.001	0.002	0.002	0.009	0.003
Desviación típica (n-1)	0.027	0.044	0.042	0.095	0.050
Límite inferior de la media (95%)	0.880	0.955	0.871	1.006	0.956
Límite superior de la media (95%)	0.906	0.996	0.910	1.094	1.003

Fuente Autor

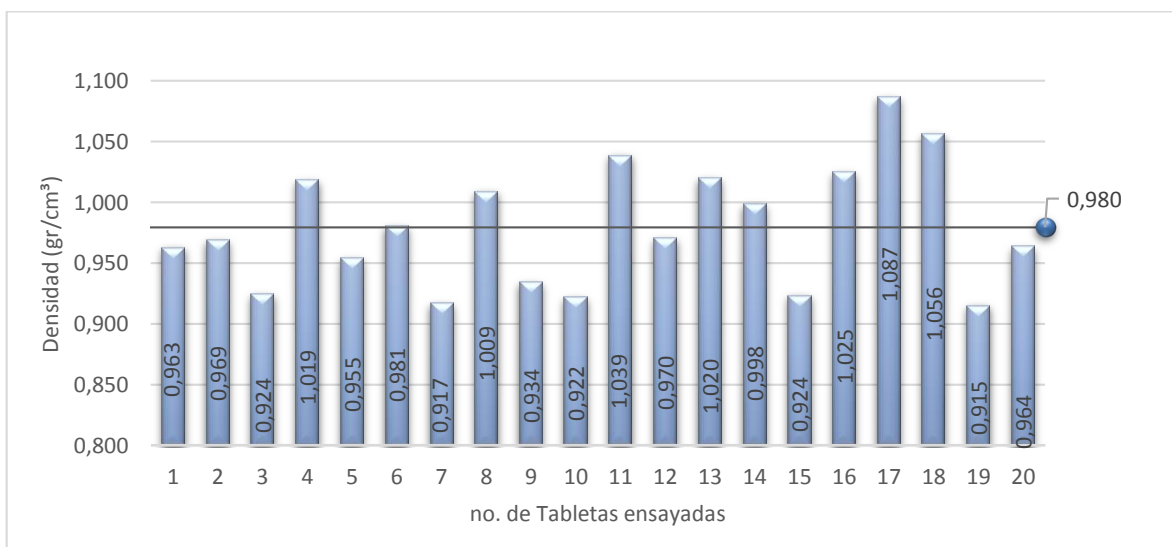


Figura 14. Resultados ensayo densidad Mezcla 5

Fuente: Autor

A continuación, en la **Tabla 8** *Densidades típicas de los plásticos* se evidencia que las densidades típicas de los plásticos se asemejan las presentadas para cada una de las mezclas utilizadas.

Tabla 8 *Densidades típicas de los plásticos*

CÓDIGO SPI	NOMBRE DEL PLÁSTICO	DENSIDAD g/cm3	USOS
1	PETE (Tereftalato de Polietileno)	1.38-1.39	Botellas de agua y bebidas, envase de aderezos
2	HDPE (Polietileno de a la densidad)	0.95-0.96	Cajas de leche, limpiadores domésticos, envases de aceites
3	LDPE (Polietileno de baja densidad)	0.92-0.94	Botellas dispensadoras, distintas bolsas,
4	Polipropileno	0.90-0.91	Botellas de medicamentos, tapas

La Figura 14 se presentan los diagramas de caja para cada resultado de las 5 mezclas estudiadas, de tal forma que gráficamente se deduce que las mezclas 1 y 3 comparten densidades parecidas, y las mezcla 2, 4 y 5 igualmente similares, pero con una densidad un poco más alta. j. Los resultados completos se presentan en el anexo del documento.

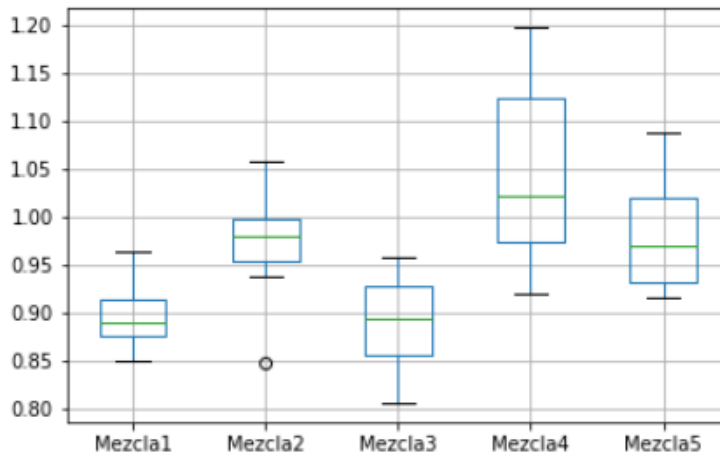


Figura 15 Diagrama de cajas, Comparativo de las 5 mezclas en ensayo de densidad

Fuente: Autor

Para verificar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre las densidades estudiadas se procede a realizar un análisis de varianza con un alfa del 5%. Como se observa en la Tabla 8, el valor Pr es inferior al alfa establecido, llevando al rechazo de H0, indicando que existe evidencia para indicar diferencias entre las mezclas y su densidad.

Tabla 9 Análisis de varianza de la Densidades, ANOVA

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	4	0.360	0.090	28.159	<0,0001
Error	95	0.303	0.003		
Total corregido	99	0.663			

Fuente Autor

Como rechazamos H0 se procede con un test post hoc de Turkey para encontrar cuales de las mezclas presentan diferencias, en la Tabla 9, se evidencia que solo la mezcla 1 y 3 son similares entre sí, así como la 2 y 5, las demás mezclas presentan variaciones.

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05

```

=====
group1  group2  meandiff  p-adj   lower   upper  reject
-----
Mezcla1 Mezcla2   0.0826   0.001   0.0329   0.1323   True
Mezcla1 Mezcla3  -0.0026   0.9    -0.0523   0.0471  False
Mezcla1 Mezcla4   0.1567   0.001   0.107    0.2064   True
Mezcla1 Mezcla5   0.0866   0.001   0.0369   0.1363   True
Mezcla2 Mezcla3  -0.0853   0.001  -0.135   -0.0356   True
Mezcla2 Mezcla4   0.0741   0.001   0.0244   0.1238   True
Mezcla2 Mezcla5   0.0039   0.9    -0.0458   0.0536  False
Mezcla3 Mezcla4   0.1594   0.001   0.1097   0.2091   True
Mezcla3 Mezcla5   0.0892   0.001   0.0395   0.1389   True
Mezcla4 Mezcla5  -0.0702  0.0015  -0.1199  -0.0205   True
=====

```

Figura 16 Test de Turkey para la Densidades

Fuente Autor

7.2. Absorción

El ensayo de absorción se realizó siguiendo las indicaciones del montaje y elaboración del ensayo. de la norma E - 427 – 13, del INVIAS, 2013 . La saturación se hizo por inmersión de los especímenes en agua durante 24 horas a una temperatura entre 15,6 y 26,7 °C. Dado que los elementos flotan por tener menor densidad que el agua, se les incorporó un peso adicional mediante pesas de acero (Figura 15)

Se determinaron las dimensiones y masa inicial de cada una de las plaquetas y la masa final después del período de inmersión

Se calculó la absorción porcentual de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{Ws - Wd}{Wd} \times 100$$

En donde:

Ws = Peso plaqueta saturada, kg

Wd= Peso plaqueta seca, kg



Figura 17 Ensayo de Absorción en sumersión de H2O

Fuente: Autor

En la Tabla 8 se presentan los estadísticos descriptivos de las 5 mezclas respecto a la absorción, Cabe destacar que la mezcla 1 obtuvo el menor valor promedio con 1.5% de variación, mientras la mezcla 3 presento una variación promedio en el peso de 4.5%, nuevamente tal como se presentó en la densidad una desviación estándar baja hace que los intervalos de confianza estén cercanos a la media, Resaltando que la absorción de la madera plástica está por debajo de los estándares solicitados para los adoquines tipo I.

Por otra parte, tanto la media como la mediana son valores casi idénticos, lo que nos lleva a pensar que la muestras presentan una distribución normal.

Tabla 10 Promedio de resultados ensayo de absorción

Estadístico	Mezcla 1 (50% HPDE + 50% LDPE 50%)	Mezcla 2(50% LDPE + 50% PP)	Mezcla 3 (20 % REUSO 2 + 50% LDPE + 30 % PP)	Mezcla 4 (20 % REUSO 3 + 50 % LDPE + 30 % PP)	Mezcla 5 (20% REUSO 4 + 50% LDPE + 30 % PP)
No. de observaciones	20	20	20	20	20
Mínimo	0.006	0.010	0.014	0.014	0.014
Máximo	0.026	0.041	0.093	0.072	0.060
1° Cuartil	0.011	0.014	0.034	0.021	0.031
Mediana	0.014	0.018	0.042	0.030	0.042

3° Cuartil	0.020	0.023	0.054	0.040	0.048
Media	0.015	0.019	0.045	0.033	0.039
Varianza (n-1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Desviación típica (n-1)	0.006	0.007	0.017	0.015	0.012
Límite inferior de la media (95%)	0.013	0.016	0.037	0.026	0.034
Límite superior de la media (95%)	0.018	0.023	0.053	0.040	0.045

Fuente Autor

En la figura 16 se observan de manera gráfica los resultados de la mezcla 4 tomada como ejemplo

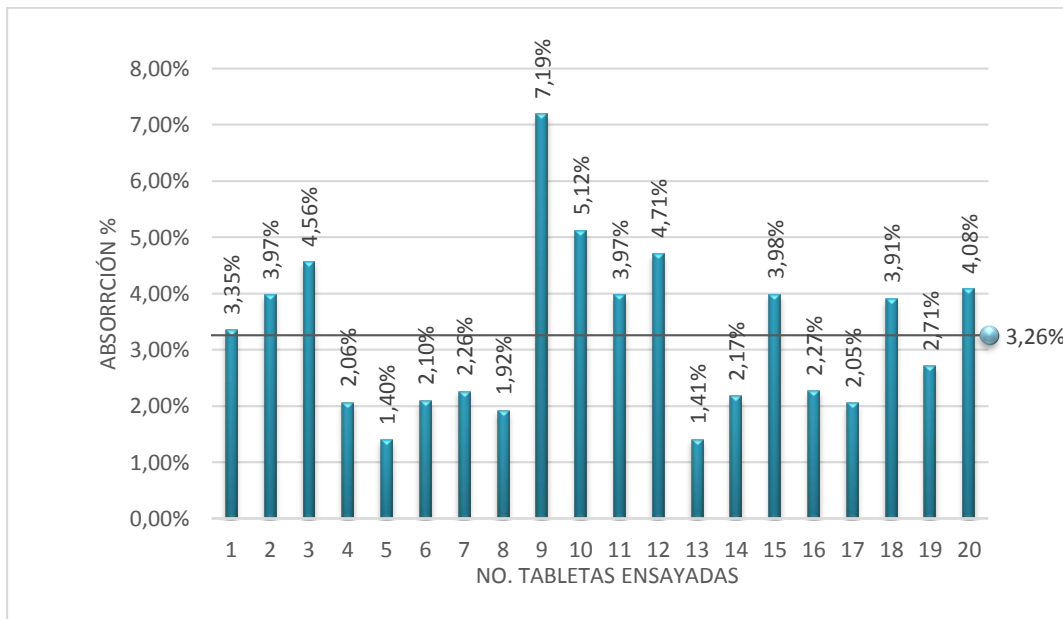


Figura 18 Comportamiento de ensayo de absorción en mezcla 4

Fuente Propia

La Figura 19 se presentan los diagramas de caja para cada resultado de las 5 mezclas estudiadas, de tal forma que gráficamente se deduce que las mezclas 1 y 2 comparten capacidades de absorción parecidas, y las mezcla 3, 4 y 5 presentan mayor variabilidad. Los resultados completos se presentan en el anexo E

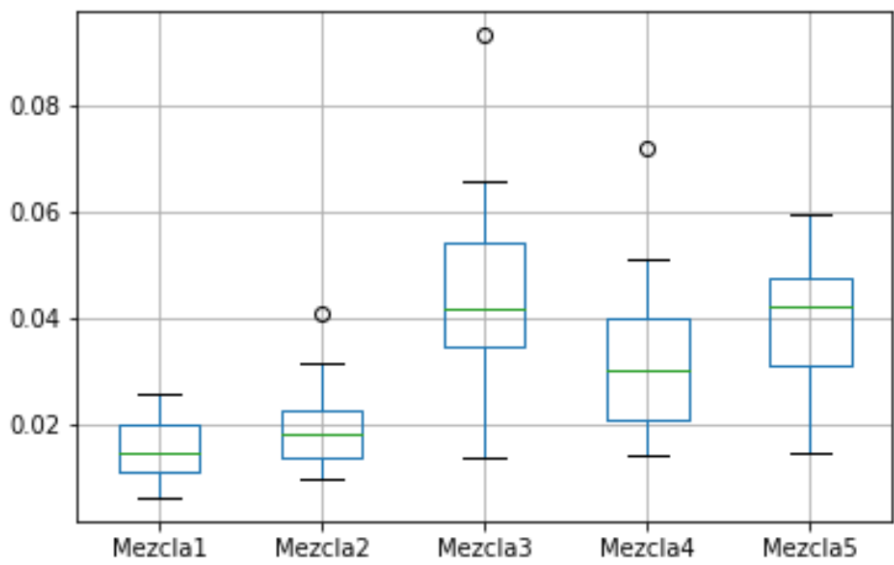


Figura 19 Diagrama de cajas, Comportamiento de 5 mezclas en ensayo de Absorción

Fuente Propia

En la Tabla 10 se presentan valores típicos de % absorción en adoquines en concreto y se comparan con los obtenidos para las diferentes mezclas estudiadas.

Tabla 11 Valores típicos de % Absorción en adoquines.

ENSAYO	VALORES TÍPICOS	VALORES ADMISIBLES NTC
% Absorción en adoquines de concreto tipo 1	6.4	< 11 para Tipo 1 ⁶ < 17 para tipo 2
% Absorción en adoquines de concreto tipo 2	8.9	
% Absorción en tabletas de madera plástica	1.5 a 4.5	

Para verificar si existen diferencias significativas entre las mezclas respecto a la absorción se procedió con un ANOVA, en la Tabla 11, se observa que el valor Pr es inferior a un alfa del 5% lo que nos permite concluir que al rechazar H0, también existe diferencia significativa en la absorción de las mezclas.

⁶ Tipo I= Adoquines expuestos a alta abrasión.
 Tipo II= Adoquines expuestos a una abrasión intermedia.
 Tipo III= Adoquines expuestos a baja abrasión.

Tabla 12 Análisis de varianza de la Absorción, ANOVA

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	4	0.013	0.003	21.183	<0.0001
Error	95	0.014	0.000		
Total corregido	99	0.027			

Para definir donde se encuentran las diferencias en las mezclas se procede con un test post hoc de Turkey, en la Tabla 9, se evidencia que la mezcla 1 y 2 son similares entre sí, así como la 3 y 5 y la 4 y 5, las demás mezclas presentan variaciones entre ellas.

```

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05
=====
group1  group2  meandiff  p-adj   lower   upper   reject
-----
Mezcla1 Mezcla2   0.0037  0.8691 -0.0071  0.0145  False
Mezcla1 Mezcla3   0.0293  0.001  0.0185  0.0401  True
Mezcla1 Mezcla4   0.0171  0.001  0.0063  0.0279  True
Mezcla1 Mezcla5   0.0239  0.001  0.0131  0.0347  True
Mezcla2 Mezcla3   0.0256  0.001  0.0148  0.0364  True
Mezcla2 Mezcla4   0.0135  0.0071  0.0026  0.0243  True
Mezcla2 Mezcla5   0.0203  0.001  0.0094  0.0311  True
Mezcla3 Mezcla4  -0.0122  0.0195 -0.023  -0.0013  True
Mezcla3 Mezcla5  -0.0054  0.6252 -0.0162  0.0055  False
Mezcla4 Mezcla5   0.0068  0.4124 -0.004  0.0176  False
-----

```

Figura 20 Test de Turkey para la Absorción

7.3. Flexo Tracción

Este ensayo se realizó sobre las tabletas de madera plástica adaptando el ensayo I.N.V 414 “Resistencia a la flexión del concreto, método de la viga simple cargada en los tercios de la luz”: Se fabricó un aditamento que permitiera sujetar la plaqueta y posteriormente aplicarle una carga puntual controlada, llevándola a la falla.

Antes de iniciar la prueba cada plaqueta fue pesada y medida. Una vez fallado el elemento, se tomó la temperatura con termómetro digital y se analizó la ubicación de la fisura para realizar posteriormente el cálculo del módulo de rotura.

En la tabla 11 se presentan los estadísticos descriptivos de las 5 mezclas respecto a la carga máxima obtenidos para las diferentes mezclas, relacionadas al ensayo de flexo tracción de la madera plástica. Los resultados indican que la mezcla 3 es la que presenta menor resistencia con un promedio de 4.48 Kn, adicionalmente desviación es baja para todas las mezclas dando confiabilidad a los procesos de fabricación.

En el anexo G se presentan los resultados completos obtenidos en las diferentes mezclas.

Tabla 13 Carga máxima ensayo Flexotracción

Estadístico	Mezcla 1 (50% HPDE + 50% LDPE 50%)	Mezcla 2(50% LDPE + 50% PP)	Mezcla 3 (20 % REUSO 2 + 50% LDPE + 30 % PP)	Mezcla 4 (20 % REUSO 3 + 50 % LDPE + 30 % PP)	Mezcla 5 (20% REUSO 4 + 50% LDPE + 30 % PP)
No. de observaciones	20	20	20	20	20
Mínimo	4.900	5.990	3.010	4.690	4.790
Máximo	7.140	8.900	6.710	9.100	9.440
1° Cuartil	5.325	6.630	4.013	7.295	5.538
Mediana	5.700	7.325	4.290	7.580	6.045
3° Cuartil	5.950	7.885	5.110	8.113	6.853
Media	5.751	7.277	4.480	7.594	6.287
Varianza (n-1)	0.354	0.785	1.044	1.089	1.195

Desviación típica (n-1)	0.595	0.886	1.022	1.044	1.093
Límite inferior de la media (95%)	5.473	6.862	4.001	7.106	5.775
Límite superior de la media (95%)	6.029	7.692	4.958	8.082	6.798

Fuente Autor

En las figuras 18 a 22 se observa el comportamiento de las diferentes mezclas a lo largo del ensayo.

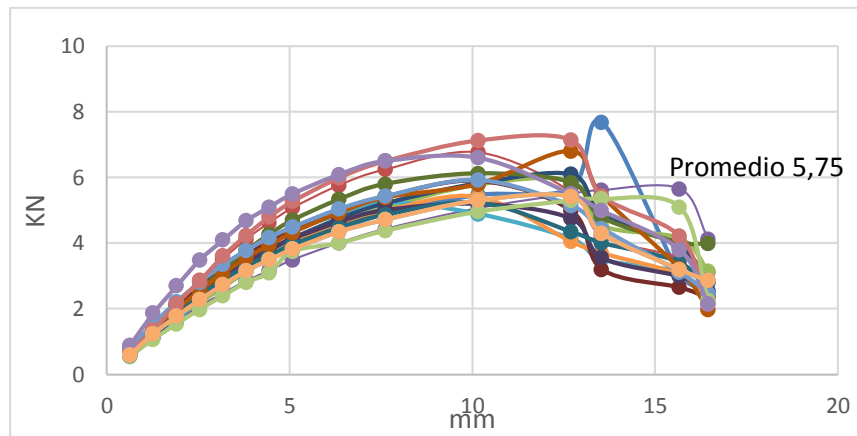


Figura 21 18 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 1

Fuente Autor

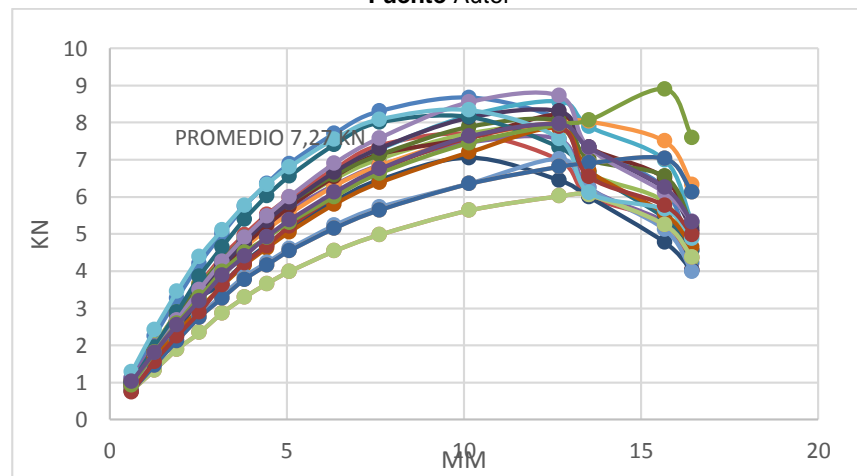


Figura 22 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 2

Fuente Autor

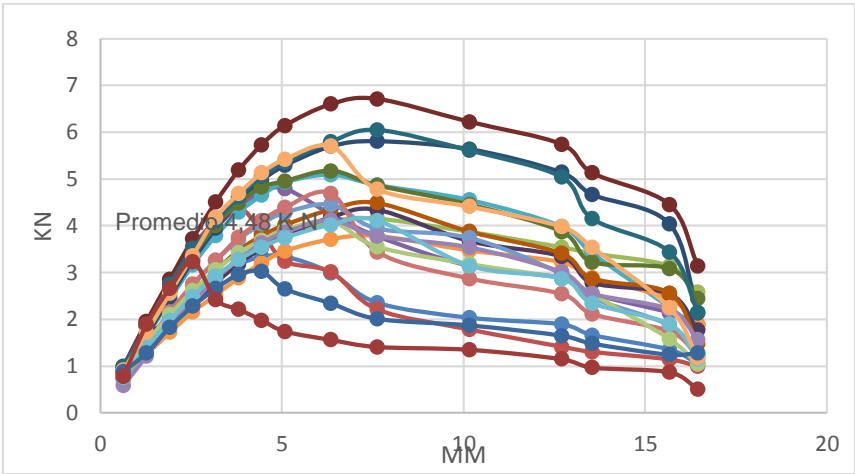


Figura 23 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 3

Fuente Autor

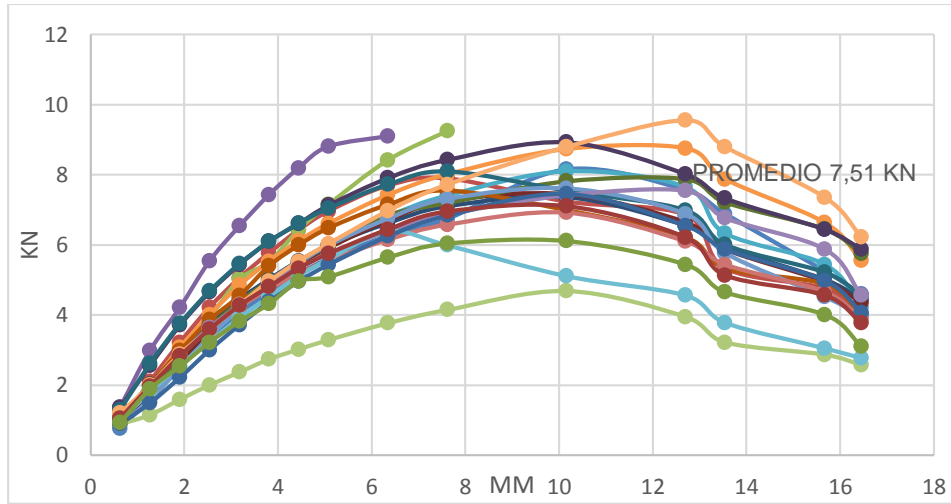


Figura 24 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 4

Fuente Autor

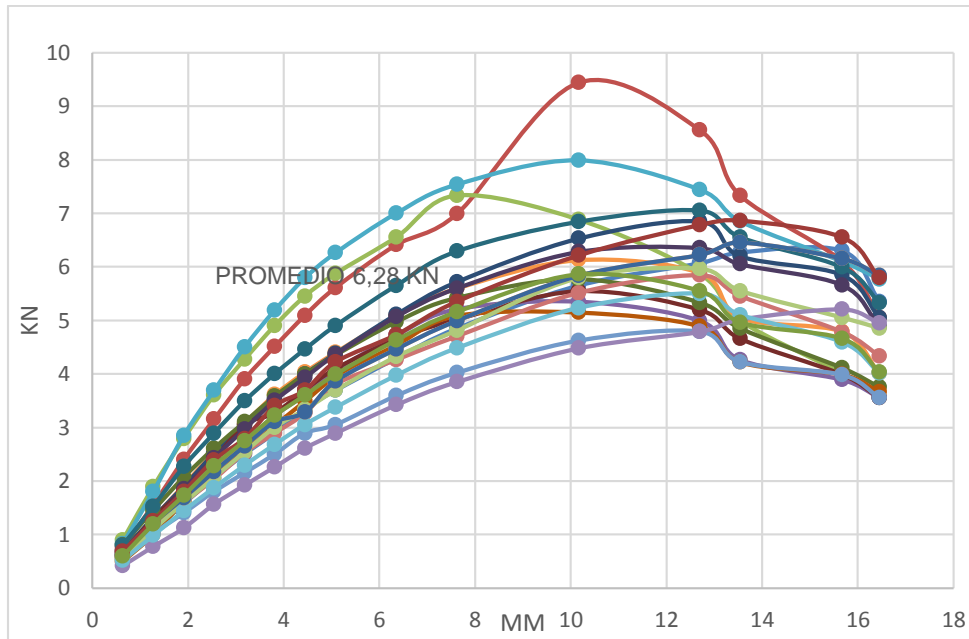


Figura 25 Esfuerzo vs. Deformación Mezcla 5

Fuente Autor

En la Figura 26 se comparan las cargas máximas por medio del diagrama de caja. Que por medio de una vista grafica se espera no haya diferencias en la resistencia de las mezclas 2 y 4.

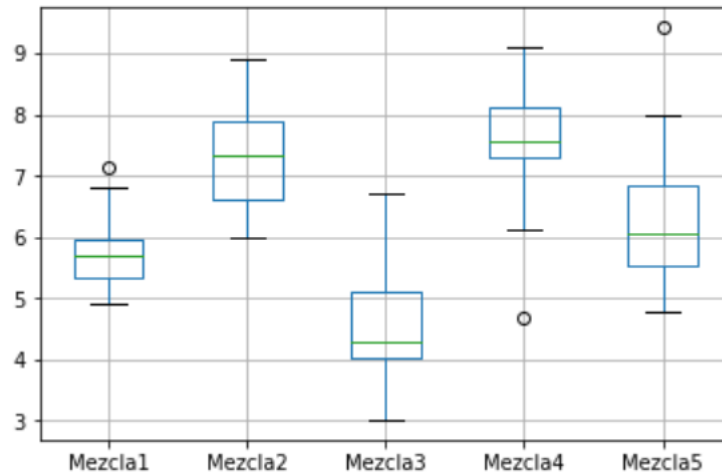


Figura 26 Diagrama de cajas, Comparación de las cargas máximas.

Se realiza el Anova y el test de Turkey, como se presentan en las Tablas 20 y 21 y se establece que las mezclas 1 y 5 y la 2 y 4 presentan una resistencia similar.

Tabla 14 Análisis de varianza para Flexo tracción, ANOVA

Fuente	GL	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Pr > F
Modelo	4	124.845	31.211	34.942	<0.0001
Error	95	84.858	0.893		
Total corregido	99	209.703			

```

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05
=====
group1 group2 meandiff p-adj lower upper reject
-----
Mezcla1 Mezcla2 1.526 0.001 0.6949 2.3571 True
Mezcla1 Mezcla3 -1.2715 0.001 -2.1026 -0.4404 True
Mezcla1 Mezcla4 1.843 0.001 1.0119 2.6741 True
Mezcla1 Mezcla5 0.5355 0.3856 -0.2956 1.3666 False
Mezcla2 Mezcla3 -2.7975 0.001 -3.6286 -1.9664 True
Mezcla2 Mezcla4 0.317 0.8032 -0.5141 1.1481 False
Mezcla2 Mezcla5 -0.9905 0.0111 -1.8216 -0.1594 True
Mezcla3 Mezcla4 3.1145 0.001 2.2834 3.9456 True
Mezcla3 Mezcla5 1.807 0.001 0.9759 2.6381 True
Mezcla4 Mezcla5 -1.3075 0.001 -2.1386 -0.4764 True
-----

```

Figura 27 Test de Turkey para la Flexo tracción.

7.4. Módulo de Rotura

Una vez obtenidos los resultados de la carga, y analizada la línea de falla de cada una de las plaquetas ensayadas se procede a realizar el cálculo siguiendo los parámetros respecto al montaje y elaboración del ensayo de acuerdo a la norma INV 414-07 la cual es empleada para vigas en concreto.

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes mezclas y los promedios de falla.

Tabla 15 resultado general Mr y porcentajes de ubicación de falla.

MEZCLA	MÓDULO DE ROTURA (Mpa)	PORCENTAJE MUESTRAS QUE FALLAN (%)	
		TERCIO EXTERIOR	TERCIO MEDIO
Mezcla 1	9.41	90	10
Mezcla 2	16.62	70	30
Mezcla 3	7.64	80	20
Mezcla 4	13.3	84	16
Mezcla 5	12.10	55	45

Fuente: Autor

Cuando la falla se presenta en el tercio exterior sin superar el 5 % de la luz libre, el módulo de rotura se calcula según la siguiente ecuación:

$$R=3Pa/bd^2$$

En donde:

R = módulo de rotura KPa (psi),

P = máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo N(lbf),

L = longitud libre entre apoyos mm,(pulg),

b = ancho promedio de la muestra mm,(pulg), y

d = altura promedio de la muestra mm,(pulg), incluyendo el espesor refrentado, si corresponde.

a = distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano, medida sobre la zona de tensión de la viga, mm

En ninguna plaqueta se presentó la falla en más del 5% de la luz libre, es decir en 9 cm.

Cuando la falla se presenta en el tercio medio , el módulo de rotura se calcula según la siguiente ecuación:

$$R=PL/bd^2$$

En donde:

R = módulo de rotura KPa (psi),

P = máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo N(lbf),

L = longitud libre entre apoyos mm,(pulg),

b = ancho promedio de la muestra mm,(pulg), y

d = altura promedio de la muestra mm,(pulg), incluyendo el espesor refrentado, si corresponde.

En la Tabla 12 se presentan los valores obtenidos para las diferentes mezclas estudiadas y se comparan con el valor promedio mínimo exigido por la normatividad para el concreto según su edad.

Tabla 16 Valores de módulo de rotura en adoquines

MATERIAL	Módulo de Rotura (MPa)
Concreto (7-14-28 días)	4.68
Mezcla 1	9.41
Mezcla 2	16.62
Mezcla 3	7.64
Mezcla 4	13.3
Mezcla 5	12.10

Fuente: Autor

7.5. Otros Ensayos

7.5.1. Envejecimiento

Este ensayo corresponde a un criterio netamente visual y de cambio de aspecto de cada una de las plaquetas estudiadas. De cada mezcla se dejaron 3 tabletas a la intemperie y 2 en interior y, para evaluar cualitativamente el envejecimiento del material y el efecto del ambiente sobre el mismo, se llevó un registro visual y fotográfico diario durante aproximadamente 130 días (Ver anexo K).

Para algunas plaquetas se realizó además un registro con microscopio digital para ver si en su interior había algún cambio representativo

Los cambios presentados correspondieron a color mas no textura, pasando de un gris oscuro a uno más claro. Los registros con microscopio no mostraron cambios representativos en fibras internas.

Capítulo 5 – Análisis de Resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, y se verifican algunos aspectos de normatividad de materiales convencionales, donde la madera plástica podría sustituirlos y con esto contribuir a la mejora continua en los procesos de sostenibilidad.

-Densidad: Como era de esperarse, los resultados obtenidos para las diferentes mezclas corresponden a los de un polímero, con valores promedio entre 0.89 y 1.05 g/cm³. Estas densidades resultan un poco inferiores a las de los adoquines de concreto y de arcilla cuyos valores oscilan de 1.9 a 2.2 y 2.10 a 2.2 g/cm³ respectivamente⁷.

Respecto a la densidad del material este obtuvo un valor promedio de 0.95 g/cm³ con una desviación estándar muy baja lo que hace concluir que los valores no fueron dispersos entre las mezclas, sin embargo con el test post hoc de Turkey, se determina que la mezcla 1 y 3 son de más baja densidad y la mezcla 4 la que evidencia la mayor densidad ya que estaba compuesta por reuso de la mezcla 3 en proporción del 20 % y 50% de LDPE y 30% de PP, lo cual hace pensar que su fabricación el PP que es el material común desde la mezcla 2, 3 y 4 el aporta de manera especial esa densificación de la misma.

El análisis de densidad corrobora que las cinco mezclas estudiadas se encuentran por debajo de los valores de materiales convencionales, lo cual es beneficioso en términos de masa y peso.

-Absorción: Los valores obtenidos corresponden a un material de alta impermeabilidad, lo cual es propio de los plásticos.

⁷ Según fichas técnicas de diferentes fabricantes

Dado que este estudio puede ser la base para establecer si los adoquines en madera plástica pueden reemplazar a los de arcilla y de concreto, los valores obtenidos se comparan con los parámetros mínimos exigidos para pavimentos, en este caso norma Incontec 3829, la cual establece los criterios de recibo de adoquines en arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano.

La norma clasifica en tres tipos los adoquines de arcilla de acuerdo a las condiciones de exposición al medio ambiente, como T1, T2, T3, en donde:

Tipo I= Adoquines expuestos a alta abrasión.

Tipo II= Adoquines expuestos a una abrasión intermedia.

Tipo III= Adoquines expuestos a baja abrasión.

Los resultados obtenidos para las diferentes mezclas de madera plástica, muestran valores de absorción muy inferiores a los presentados en la norma (Tabla13), indicando que este material podría ser usado en cualquier tipo condiciones ambientales.

Tabla 17 comparación resultados con NTC 3829

Designación	Absorción de agua fría máx %	Absorción de agua fría Madera plástica %
Tipo I	11	1.5-4.5
Tipo II	17	
Tipo III	No hay límite	

Fuente: Autor

Por otra parte, con temperatura controlada el promedio general de las cinco mezclas estuvo en 3.03% lo que indica un material que brinda propiedades importantes de rechazo ante altos coeficientes de succión, en el caso de la mezcla No 1, compuesta por 50 % HPDE Y 50% LDPE, presentó el valor más bajo de porcentaje de absorción con un 1.547% muy similar a la mezcla No 2, dejando claro que son materiales más liviano frente a las otras mezclas, pues estas mezclas no tiene presencia de Reuso, haciendo que también sea más compacto en su proceso de fabricación.

La mezcla con más porcentaje de absorción fue la No 3 con un valor de 4.475% compuesta de 20% Reúso de la No 2, 50 LDPE y 30% PP, dejando claro que las uniones de partículas de estos tipos de plástico en presencia de Polipropileno hacen que su adherencia u homogeneidad no sean tan constante dejando vacíos en su interior permitiendo más porcentaje de absorción, además se puede también evidenciar claramente que es esta mezcla la más baja en densidad.

Flexo tracción y módulo de rotura.

En el anexo G. se presentan los resultados obtenidos durante el ensayo de flexo tracción, observando que El promedio de descarga controlada para obtener los parámetros de resistencia a la flexión del material estuvo para las cinco mezclas en un valor promedio de 6.262 KN, en relación a la geometría del elemento y comparándolo con materiales convencionales y en particular con su material homogéneo “madera convencional” la resistencia promedio oscila entre 8. KN, llevando esto a la madera plástica a ser un material de buena respuesta ante carga.

Las gráficas promedio de las mezclas 1 y 2 muestran un comportamiento comparable al de materiales convencionales, pudiéndose identificar los diferentes ambientes: rango elástico, rango inelástico, rango plástico

Las gráficas de las mezclas 3,4 y 5 muestran un comportamiento no similar, dado posiblemente al empleo del reuso en las mismas, situación que hace pensar que el recalentar una y hasta tres veces el material, pierda propiedades y su comportamiento no sea el esperado.

En el caso de la mezcla No 3, muestra un comportamiento más bajo en resistencia, sin ser tan drástico su valor, donde se aprecia que es también la que más porcentaje de absorción tiene, lo que lleva a concluir que esa relación de vacíos hace más débil el elemento plaqueta. Absorción inversamente proporcional a la resistencia

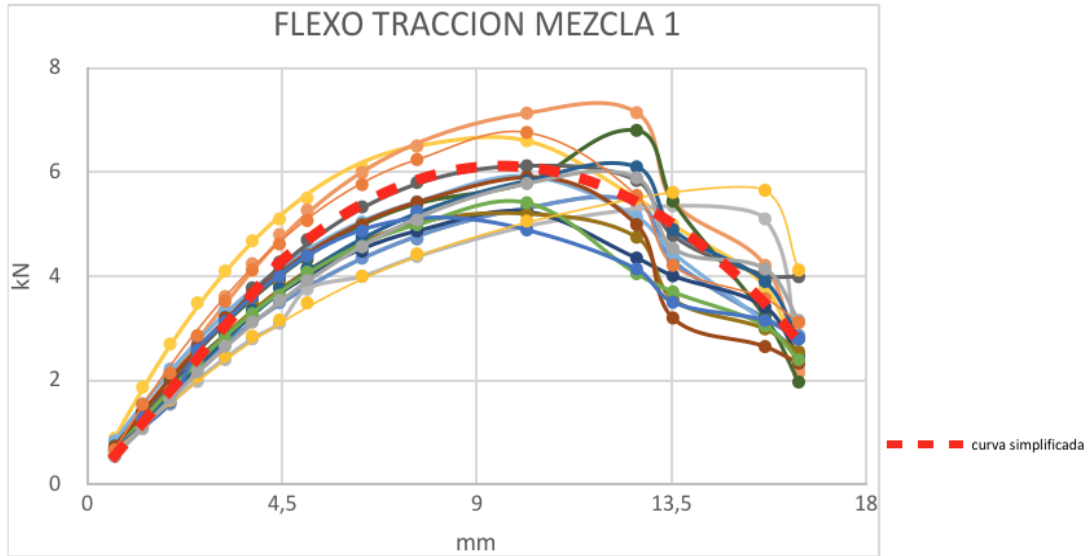


Figura 28 Esfuerzo vs deformación mezcla 1

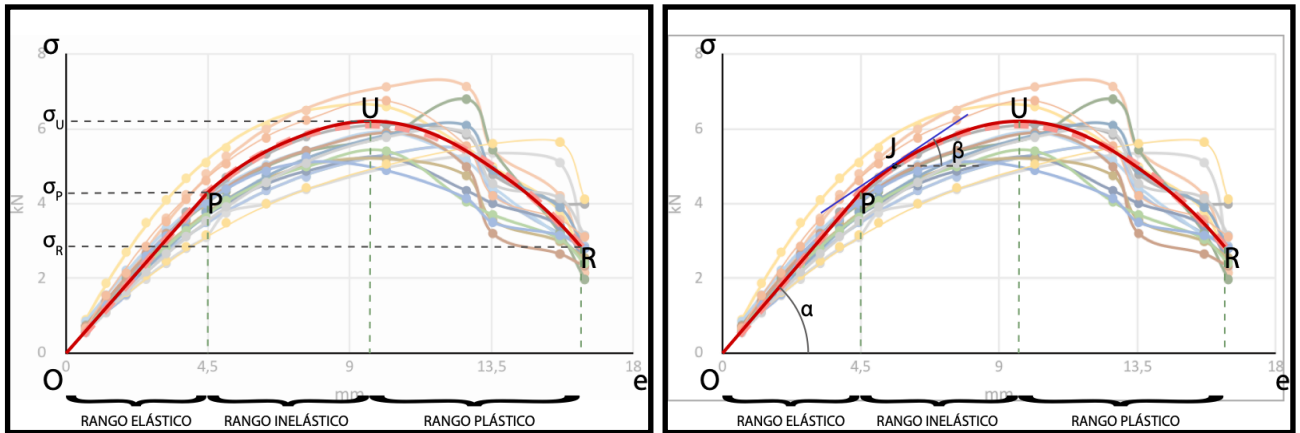


Figura 29 Curva simplificada mezcla 1, análisis de rangos

Plaquetas ensayadas: 17

Promedio resistencia flexión-rotura: 5,751 KN

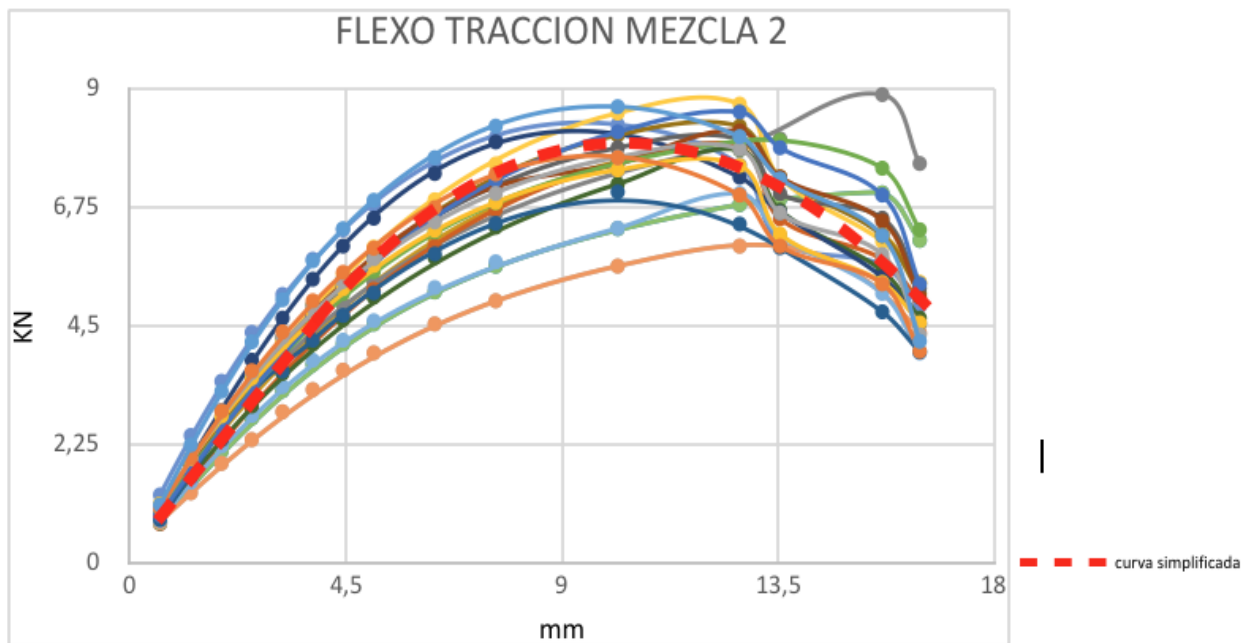


Figura 30 Esfuerzo vs deformación mezcla 2

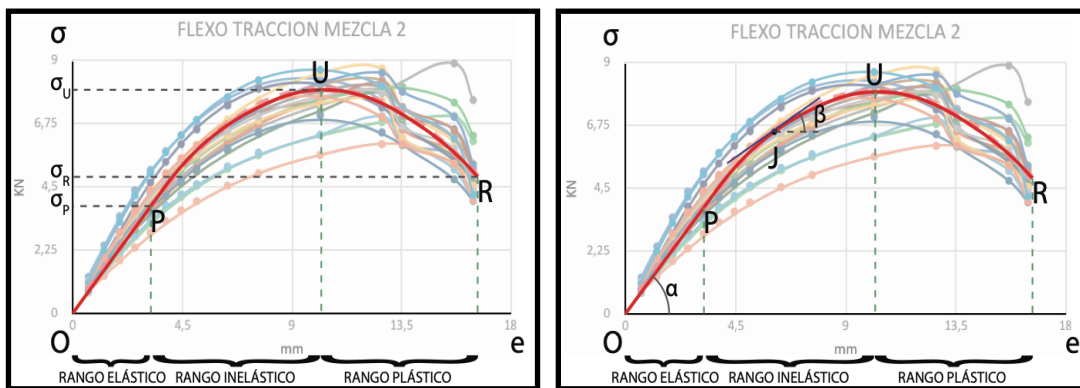


Figura 31 Curva simplificada mezcla 2 , análisis de rangos

Plaquetas ensayadas: 20
 Promedio resistencia flexión-rotura: 7,277KN

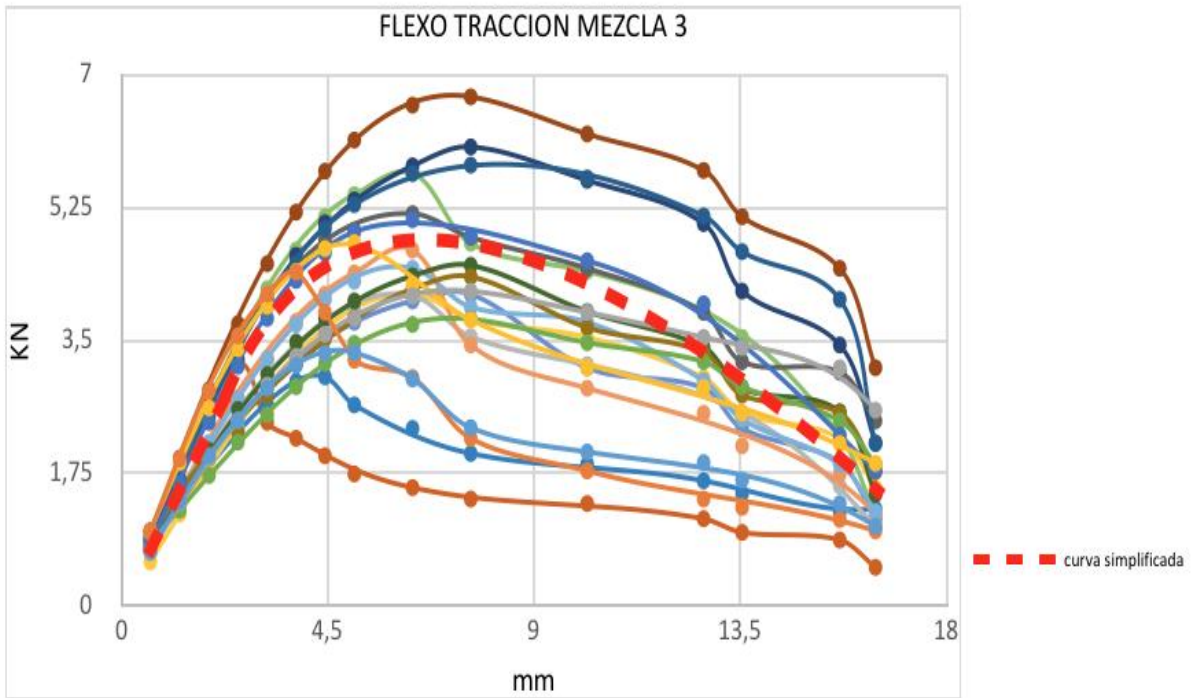


Figura 32 Curva simplificada mezcra 3, análisis de rangos

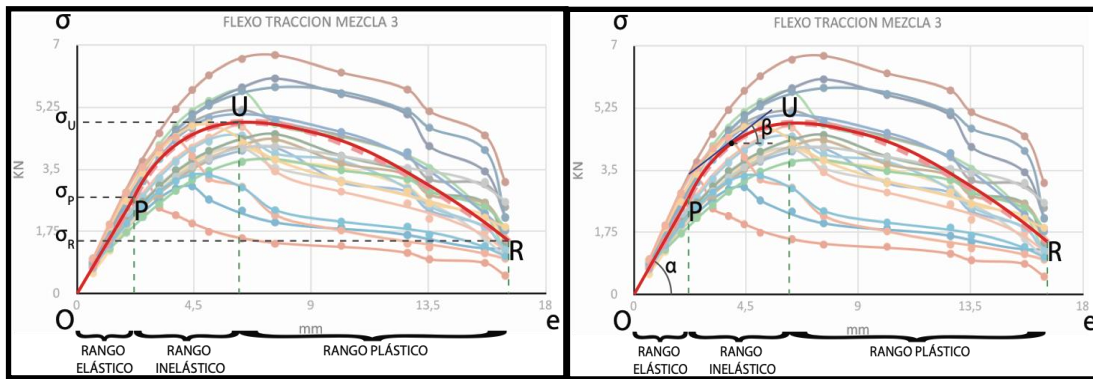


Figura 33 Esfuerzo vs deformación mezcra 3

Plaquetas ensayadas: 20
 Promedio resistencia flexión-rotura: 4,479 KN

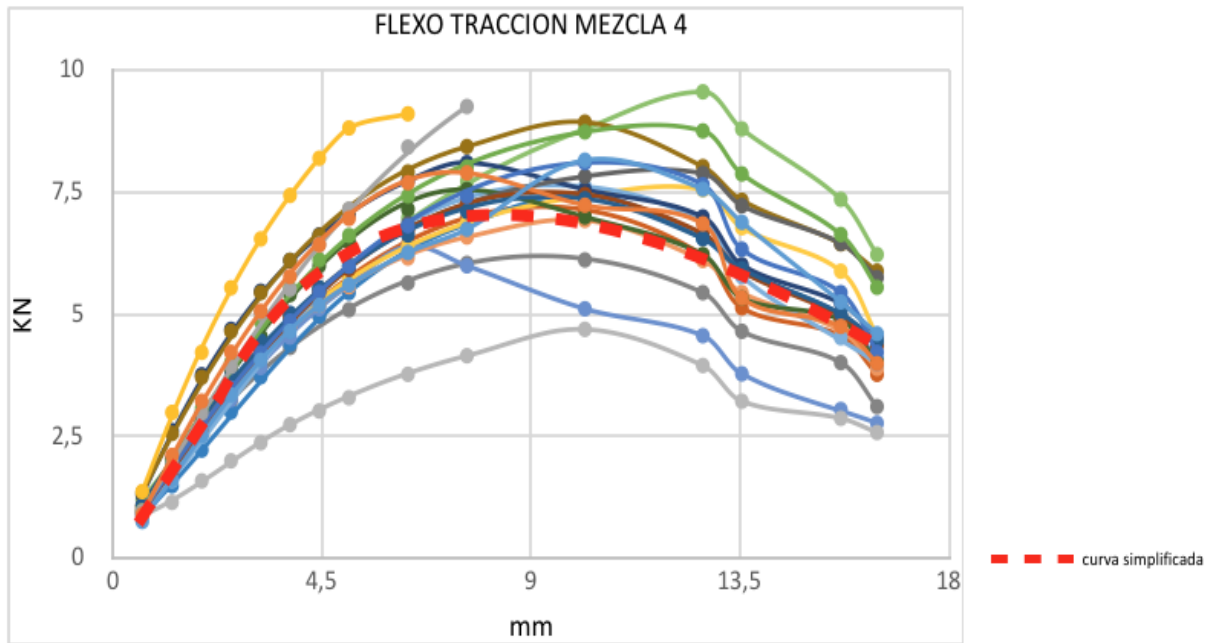


Figura 35 Esfuerzo vs deformación mezcla 4

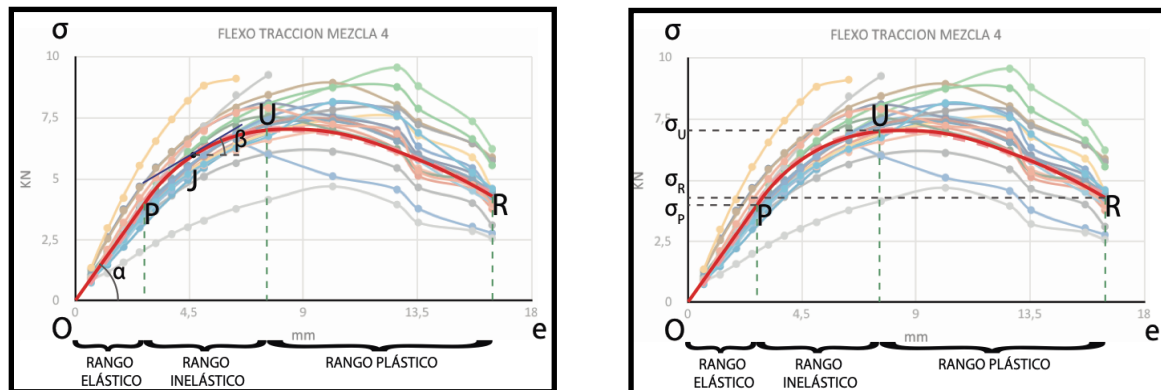


Figura 34 Curva simplificada mezcal 4 análisis de rangos

Plaquetas ensayadas: 19
 Promedio resistencia flexión-rotura: 7,594 KN

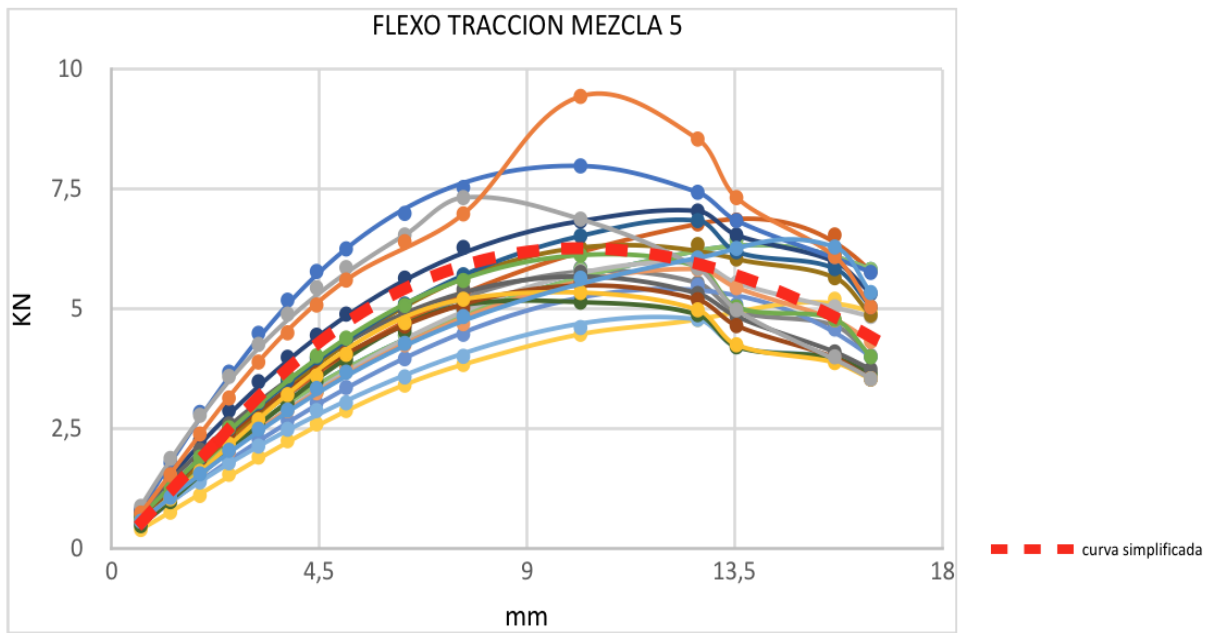


Figura 37 Curva simplificada mezcal 5 análisis de rangos

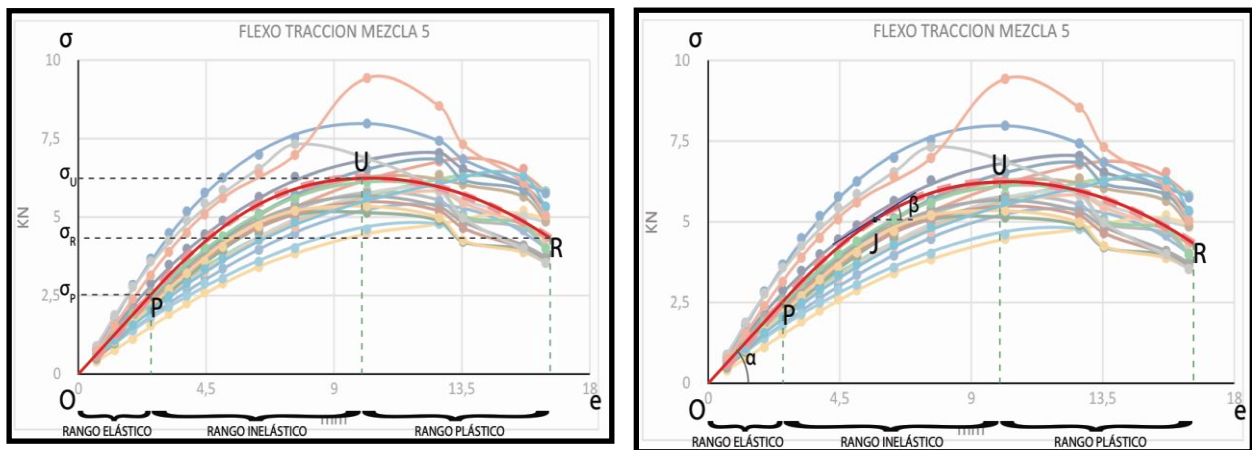


Figura 36 Curva simplificada mezcal 5 análisis de rangos

Plaquetas ensayadas: 20
 Promedio resistencia flexión-rotura: 6,286 KN

En la prueba de flexión tracción que se realizaron a las plaquetas de maderas plásticas se puede ver que los especímenes que fallaron en el tercio medio tienen una menor resistencia a la tracción que los especímenes fallados en los tercios exteriores

En el cuadro resumen de módulos de rotura de distintos materiales podemos ver el excelente comportamiento de la madera plástica en términos generales (5 mezclas), aún sabiendo que es una plaqueta que tiene un espesor bajo (2.5 cm), supera en este valor a vigas en concretos establecidos en norma. Comparar resultados de adoquines de arcilla respecto a los de madera plástica los resultados son contundentes, tal así que se puede despreciar el valor de los de arcilla pues su promedio está en 1.3×10^{-6} MPa, mientras que los del trabajo presentados están en 11.21 MPa

La mayor falla en vigas de concreto se presenta en los tercios medios, lo que no ocurrió con las plaquetas de madera plástica, las cuales fallaron en su gran mayoría en el tercio exterior, lo que concluye que por la propiedad exclusiva y acomodación de fibras longitudinales el plástico lo hacen más competente ante cargas de flexión vs concreto.

Como se observa en la tabla 14 los resultados obtenidos y comparados con materiales convencionales como el concreto muestran un panorama muy importante si se quiere emplear la madera plástica en la ingeniería de pavimentos.

A continuación un resumen de los resultados de materiales convencionales (concreto- madera), frente a la madera plástica objeto del presente estudio.

Tabla 18 comparación general madera plástica con materiales convencionales

MATERIAL	MODULO DE ROTURA MPa
Madera plástica	7,64-16,62

Concreto resistencia promedio 300 psi	4,68
Madera laminada tipo Pino	29,17

Fuente: Autor

En las pruebas de flexión tracción que se realizaron a las maderas plásticas se puede ver que los especímenes que fallaron en el tercio medio tienen una menor resistencia a la tracción que los especímenes fallados en los tercios exteriores. Comparados con el comportamiento del concreto para pavimentos en el mismo ensayo, este se comporta al revés, los que fallan en el tercio medio tienen más resistencia a la tracción que los que fallan en el tercio exterior.

No obstante, en particular la mezcla No 3 compuesta de 20% Reúso de la No 2, 50 LDPE y 30% PP, muestra un valor promedio de 7.63 MPa y es la las baja de todas llevando a concluir a lo largo de todos los ensayos que es esta mezcla la que presenta más fragilidad respecto a las demás (1-2-4-5).

Sin embargo, al comparar la madera plástica con la madera convencional, respecto al módulo de rotura, arroja un valor promedio de 29.17 MPa, y la madera plástica producto de este trabajo en las mezclas 2 y 4 tienen valores cercanos a 21.5 MPa, lo que concluye que es un material muy competente ante posibles cargas de servicio a las cuales este sometido.

De acuerdo a la NTC 2017 se presentan a continuación los valores de aceptación para los adoquines en concreto, en lo referente a los módulos de rotura en grupo o individual.

Tabla 19 valores de aceptación para los adoquines en concreto

Módulo de rotura (Mr) a los 28 días, Mínimo MPa	Individual rango	Madera plástica
	3.8	11.8

Fuente: Autor

A continuación, se presente un resumen general de los resultados de los ensayos realizados

Tabla 20 Resultados globales ensayos

MEZCLA	ENSAYO VALORES		
	DENSIDAD g/cm ³	% ABSORCION	MODULO DE ROTURA MPa
1	0,850- 0,963	0,62 - 2,54	9.41
2	0,943- 1,057	0,99 - 2,36	16.62
3	0,805 - 0,957	1,36 - 6,55	7.64
4	0,919 -1,192	1,4 - 5,12	13.3
5	0,915 -1,087	1,91 - 5,96	12.10

Fuente: Autor

Conclusiones

El empleo de plásticos hoy en día contribuye de manera significativa a los impactos ambientales, dado el reúso del material el cual tardará más tiempo en degradarse y si verlos empleados como iniciativa del presente trabajo en pavimentos articulados.

La densidad como propiedad del material está asociada para la madera plástica al proceso de extrusión de la misma, su control y seguimiento en fabrica debe ser muy riguroso para obtener mejores compactaciones del material, tal como se evidencio en los análisis estadísticos las cinco mezclas presentan densidades acordes a los materiales empleados, dado confiabilidad a elaboración de las plaquetas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en términos de absorción se concluye que el material en general las cinco mezclas estudiadas posiblemente es apto para emplearlo en condiciones ambientales de alta abrasión, pues su condición de impermeabilidad así lo demuestra, sin embargo, las tres mezclas con reuso evidencian un leve incremento en la absorción respecto a las otras dos, no obstante, siguen presentando altos grados de impermeabilidad.

El reuso como material adicionado en las mezclas posiblemente está contribuyendo a los bajos valores de resistencia, lo cual obedece a que las propiedades del plástico por entrar en una o hasta tres etapas de calentamiento, y aunque hay una reducción significativa estadísticamente, su resistencia sigue siendo aceptable como elemento en obras de pavimentación con adoquines.

La madera plástica comparada con el concreto en términos de Módulo de rotura muestra unos resultados más relevantes, pero no comparada con la madera tradicional, aunque el valor o diferencia es mínima.

Respecto al montaje realizado de envejecimiento de las piezas los evidentes cambios de color mas no de textura se dieron en las mezclas No 1 Y No 2, dándole

la responsabilidad al color del plástico, dado que el plástico empleado era de color natural.

Con este trabajo se hizo un aporte valioso a la empresa Mapleco, dando unas recomendaciones importantes en términos de fabricación, para optimizar el proceso, y que la producción de estas plaquetas y demás materiales que se produzcan, se lleven a buenos términos con respaldo técnico y así de esta manera la empresa se fortalezca día a día.

Este trabajo servirá de soporte valioso para la creación de más documentos técnicos y por qué no, normatividad al respecto de la madera plástica la cual no se ha fundamentado en el país.

A lo largo del desarrollo del trabajo se pudo evidenciar que se pueden realizar distintos trabajos de investigación en esta línea, por tal motivo se invita a seguir trabajando en lo referente a la madera plástica y en especial a los pavimentos articulados.

Bibliografía

ANTALA. (s.f.). Especialistas en tecnologías químicas. Recuperado de: <https://www.antala.es/tecnologias/composites/>.

Centro de Información Técnica – CIT. (2009). Plásticos Biodegradables, ¿qué son? y su relación con los RSU. Boletín Técnico Informativo N° 25. Recuperado de: <http://ecoplas.org.ar/pdf/25.pdf>.

Cruz García, Luis Enrique. Metodología de Investigación. [en línea]. 2012. Colima: Universidad Multitécnica Profesional. [Fecha de consulta 27 de septiembre de 2017]. Recuperado de: http://www.institutomultitecnico.edu.mx/MET_INVESTIGACION.pdf.

Ecoticas.com. (2010). Cómo se deben reciclar los plásticos. Recuperado de: <https://www.ecoticas.com/medio-ambiente/187177/Medio-Ambiente-retira-media-docena-fondeos-irregulares>.

FICIDET. (2017). El plástico considerado un problema ambiental. Recuperado de: <http://ficidet.org/el-plastico-un-problema-ambiental/>.

Florez Bayer, L. F., Jimenez Ospina, A. (2017). Estudio de viabilidad para la creación de una empresa de tablonés de madera plástica en la ciudad de Pereira PLASTIMADER. Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Bogotá: Colombia. Recuperado de: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/8468/65811F634e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Francisco M., Pereira Martínez, J. Basura urbana: recogida, eliminación y reciclaje. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1975. 294 p.(628.442 L864b).

Gaggino, R. (2006). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción. Revista INVI, agosto. Vol 23, número 063, Universidad de Chile, Santiago, Chile, pp 137 – 163.

Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. 3 ed. México: McGraw-Hill Interamericana.

Lund, H. F. Manual McGraw-Hill de reciclaje. México: McGraw-Hill, 1996. v. 1-2. (628.4458 L962).

Novacicla.com. (s.f). Madera plástica. Placas de plástico. Tepotzotlán: México. Recuperado de: <http://novacicla.com/productos-de-plastico/placa/>.

Oliveros Viviescas, A. L., Fontecha Rodríguez, E. F. (2014). Plan de negocios para la puesta en marcha de una empresa productora de maderas plásticas en el área metropolitana de Bucaramanga. Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Especialista en Evaluación y Gerencia de Proyectos. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Bucaramanga: Colombia. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2014/152083.pdf>.

Ospina Restrepo, C. A. (2014). Evaluación de las propiedades mecánicas de los perfiles extruidos a partir de mezclas de polímeros reciclados para la fabricación de estibas de maderas plásticas en MADERPOL S.A.S. Universidad EAFIT. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Producción. Medellín: Colombia. Recuperado de: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8299/CarlosArturo_OspinaRestrepo_2015.pdf?sequence=2.

Pereira Martínez, J. Francisco M., López Garrido, J. Basura urbana recogida, eliminación y reciclaje. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1975. 294 p. (628.442 L864B).

Pérez Méndez, E. V. M. (2010). Análisis de las propiedades físico-mecánicas para un sustituto de madera natural elaborado a base de plásticos reciclados. Trabajo de graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil. Guatemala. Recuperado de: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3198_C.pdf.

Revista Ambientum. (2003). Madera plástica a través de residuos de envases. Las Rosas Madrid, España: Redacción Ambientum. Recuperado de http://www.ambientum.com/revista/2003_12/MADERA.htm.

Rubiano Fernández, J. L., Pérez Silva, M. A., Barrera Valero, O. A. Orozco, W. Quesada, F., Díaz, M. A. y Gaviria, L. A. (2011). Manejo de los materiales plásticos reciclados y mejoramiento de sus propiedades. Universidad Antonio Nariño. Docentes Facultad de Ingeniería Mecánica. Recuperado de: revistas.uan.edu.co/index.php/ingean/article/download/201/172.

Ruiz Avilés, G. (2006). Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. Revista Ingeniería y Ciencia, Septiembre, Vol 2, número 4, Universidad EAFIT, Medellín, pp 5 – 28. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/pdf/835/83520401.pdf>.

Universidad de Alicante. (s.f). Técnicas dialécticas: IAP y Técnicas de Creatividad Social. ¿Cómo se hace un árbol de problemas y soluciones? Recuperado de: https://personal.ua.es/es/francisco-frances/materiales/tema5/cmo_se_hace_un_rbol_de_problemas_y_soluciones.html

Universidad de Santander. (2015). Gerencia de proyectos de tecnología educativa. Capítulo 2. Fases iniciales de un proyecto. Recuperado de: <http://aulavirtual.eaie.cvudes.edu.co/default.aspx?ReturnUrl=%2f>.

Winandy, J.E., Stark, N.M. & Clemons, C.M. 2004. Considerations in recycling of wood-plastic composites. 5th Global Wood and Natural Fibre Composites Symposium, April 27-28, 2004, in Kassel, Germany. Recuperado de: <https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/7118>.

T Ratanawilai*, C Homkhiew & W Thongruang, OPTIMISING FORMULATION ON WEATHERING RESISTANCE OF RECYCLED POLYPROPYLENE AND RUBBERWOOD FLOUR COMPOSITES. Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, 90110 Thailand.

Anexos