

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un compuesto con polietileno reciclado y desechos plásticos para
la elaboración de estacas

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Karla Salazar Sánchez

Wilmer López Salazar

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres, hermanos y a todos quienes me ayudaron de alguna forma a convertirme en profesional.

Esto se lo dedico también a mi yo de la infancia, como muestra de que todo esfuerzo con dedicación tiene su recompensa, y que no importa la adversidad o frustración, siempre hay una salida a cualquier problema.

Karla Salazar Sánchez

Dedicatoria

Con profundo orgullo, dedico este proyecto a mis padres, en honor al gran trabajo realizado durante tantos años por parte mía, como de ellos.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles un logro como este, el cual sé que los llena de orgullo y regocijo.

Wilmer López Salazar

Agradecimientos

Gracias a mi familia por apoyarme de principio a fin en cada una de mis metas. Y especialmente a Johanna por ser siempre un ejemplo de mujer luchadora.

Agradezco a Alex por su amistad incondicional y por ayudarme a sobrellevar el inicio de la vida universitaria de la manera más divertida.

Karla Salazar Sánchez

Agradecimientos

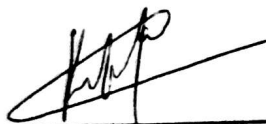
Mi más sincero agradecimiento a mis seres queridos, quienes han sido un pilar fundamental para seguir adelante, por haberme acompañado durante todo el proceso y haber depositado la confianza en mí para alcanzar mis objetivos.

Un agradecimiento especial también para los profesores y directivos que mostraron compromiso y dedicación durante mi proceso de formación, espero el proyecto realizado refleje la ardua labor por su parte durante tantos años.

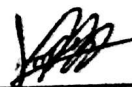
Wilmer López Salazar

Declaración Expresa

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Wilmer Oswaldo López Salazar y Karla Elizabeth Salazar Sánchez y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Karla Salazar Sánchez



Wilmer López Salazar

Evaluadores

David Reyes

Profesor de Materia

Andrés Rigail

Tutor de proyecto

Resumen

Actualmente, las recicladoras ecuatorianas se enfocan únicamente en aquellos termoplásticos considerados fáciles de reciclar y con alta rentabilidad económica, descartando así una gran cantidad de desechos plásticos. Por ende, se propone aprovechar dichos residuos plásticos para el diseño de un material compuesto que permite la elaboración de estacas plásticas, mediante la evaluación de sus propiedades mecánicas.

En la fase experimental de este proyecto, se preparó el material de relleno con el propósito de eliminar impurezas y humedad que dificulten su compatibilidad. En un reómetro de torque se mezcló el polietileno de alta densidad reciclado y los desechos plásticos en 7 formulaciones donde se variaba la presencia de aditivos.

Se concluyó que la formulación que presentaba mejores propiedades contenía un 15% de material de relleno, 1.5% DCP y 2.5 Vistamax a condiciones de procesamiento de 210 °C durante 10 minutos a 50 rpm. Se obtuvo un 15.08% de deformación en flexión junto a un esfuerzo máximo en flexión y tracción de 14.54 MPa y 7.08 MPa, respectivamente. Estos datos fueron usados para una simulación en ANSYS de las estacas plásticas en donde se determinó que el producto final tuvo un factor de seguridad de 15.

Palabras Clave: Desechos plásticos, Peróxido de Dicumilo, Vistamax, Dow Retain, reciclaje de plásticos

Abstract

Currently, Ecuadorian recyclers recycle only those thermoplastics considered easy to recycle and with high economic profitability, thus discarding a large amount of plastic waste. Therefore, it is proposed to take advantage of such plastic waste for the design of a composite material that allows the elaboration of plastic stakes, through the evaluation of its mechanical properties.

In the experimental phase of this project, the filler material was prepared with the purpose of eliminating impurities and moisture that hinder its compatibility. In a torque rheometer, recycled high-density polyethylene and waste plastics were mixed in 7 formulations where the presence of additives was varied.

It was concluded that the formulation with the best properties contained 15% filler material, 1.5% DCP and 2.5 Vistamax at processing conditions of 210 °C for 10 min at 50 rpm. A 15.08% flexural strain was obtained along with a maximum flexural and tensile stress of 14.54 MPa and 7.08 MPa, respectively. These data were used for an ANSYS simulation of the plastic stakes where it was determined that the final product had a safety factor of 15.

Keywords: *Plastic waste, Dicumyl Peroxide, Vistamax, Dow Retain, plastic recycling*

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas.....	IX
1. Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Justificación del problema	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos	5
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Reciclaje del polietileno de alta densidad (PEAD).....	6
1.5.2 Reciclaje de plástico en Ecuador	7
1.5.3 Origen y disposición de los productos plásticos reciclado en Ecuador	7
1.5.4 Uso de desechos como refuerzos en materiales compuestos	8
1.5.5 Uso de material reciclado en elementos estructurales	9

2.	Capítulo 2	11
2.1	Metodología.....	12
2.2	Diseño conceptual.....	12
2.2.1	Normativas.....	12
2.2.2	Criterios y requerimientos de diseño.	13
2.2.3	Alternativas de diseño.....	16
2.2.4	Selección alternativa de diseño.....	17
2.3	Materiales	18
2.3.1	rPEAD.....	18
2.3.2	“Otros desechos”.....	18
2.3.3	Aditivos.....	19
2.4	Diseño Experimental.	21
2.4.1	Preparación de material reciclado.....	21
2.4.2	Preparación de mezclas y probetas	22
2.5	Evaluación de propiedades	25
2.5.1	Reometría de torque.....	25
2.5.2	Ensayo de tracción	25
2.5.3	Ensayo de flexión.....	25
2.5.4	Simulación del producto en servicio.....	26
3.	Capítulo 3	27
3.1	Resultados y análisis.....	28
3.1.1	Reometría de torque.....	28

3.1.2	Ensayo de flexión.....	33
3.1.3	Ensayo de tensión	34
3.1.4	Diseño del producto	35
3.1.5	Simulación del producto en servicio.....	36
3.2	Análisis financiero	38
3.2.1	Análisis de costos.....	38
3.2.2	Viabilidad económica	40
4.	Capítulo 4	29
4.1	Conclusiones y recomendaciones	30
4.1.1	Conclusiones	30
4.1.2	Recomendaciones.....	45
5.	Referencias	
6.	Apéndices	

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
ONU	Organización de Naciones Unidas
LOPGIR	Ley Orgánica de Prevención, Control y Gestión Integral de Residuos
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
rPEAD	Polietileno de Alta Densidad Reciclado
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
rPEBD	Polietileno de Baja Densidad Reciclado
PP	Polipropileno
ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno
PVC	Policloruro de Vinilo
PC	Policarbonato
PET	Tereftalato de Polietileno
PS	Poliestireno
EPS	Poliestireno Expandido
DCP	Peróxido Dicumilo
DR	Down Retain
VM	Vistamax
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
PR	Período de Retorno

Simbología

mm	Milimetro
m	Metro
J	Julios
N	Newtons
°C	Grado Celsius
rpm	Revoluciones por Minuto
min	Minuto
h	Hora
%	Porcentaje
psi	Libras por Pulgada Cuadrada
Pa	Pascales
MPa	Mega Pascales

Índice de figuras

Figura 1.1 <i>Proceso de reciclaje de PEAD</i>	6
Figura 2.1 <i>Diagrama de metodología de diseño</i>	12
Figura 2.2 <i>Diagrama de flujo para diseño experimental</i>	21
Figura 2.3 <i>Preparación del material de relleno</i>	22
Figura 2.4 <i>Preparación de mezclas y probetas</i>	24
Figura 3.1 <i>Torque vs tiempo del rPEAD y rPEAD-30OTROS</i>	28
Figura 3.2 <i>Temperatura vs tiempo del rPEAD y rPEAD-30OTROS</i>	29
Figura 3.3 <i>Torque vs tiempo de formulaciones con aditivos</i>	30
Figura 3.4 <i>Temperatura vs tiempo de formulaciones con aditivos</i>	31
Figura 3.5 <i>Material compuesto (a) 30% y (b) 15% en peso del material de relleno</i>	32
Figura 3.6 <i>Torque vs tiempo de nueva formulación</i>	32
Figura 3.7 <i>Ensayos de flexión</i>	33
Figura 3.8 <i>Ensayos de tracción</i>	34
Figura 3.9 <i>Diseño del producto</i>	36
Figura 3.10 <i>Alargamiento total</i>	37
Figura 3.11 <i>Tensión equivalente</i>	37
Figura 3.12 <i>Factor de seguridad</i>	38

Índice de tablas

Tabla 2.1 <i>Criterios de diseño</i>	14
Tabla 2.2 <i>Ponderación de criterios de diseño para matriz del compuesto</i>	15
Tabla 2.3 <i>Matriz de decisión para seleccionar la matriz del compuesto</i>	18
Tabla 2.4 <i>Temperaturas de fusión y degradación para desechos plásticos</i>	19
Tabla 2.5 <i>Formulaciones para elaborar mezclas</i>	23
Tabla 3.1 <i>Dimensiones del producto</i>	35
Tabla 3.2 <i>Costos iniciales</i>	39
Tabla 3.3 <i>Gastos anuales</i>	39
Tabla 3.4 <i>Ingresos anuales</i>	40
Tabla 3.5 <i>Fujo de caja</i>	40
Tabla 3.6 <i>Viabilidad económica</i>	41

1. Capítulo 1

1.1 Introducción

En Ecuador, durante el año 2022, se generaron diariamente alrededor de 13.000 toneladas de residuos, de los cuales únicamente se recicló el 6% [1], siendo el polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (PEAD) y polietileno de baja densidad (PEBD) los plásticos más reciclados. En Ecuador, las recicladoras plásticas han implementado el pelletizado como un método de reciclaje óptimo; sin embargo, durante el proceso de reciclaje, se da prioridad a aquellos materiales que presentan mayor facilidad de reciclaje como el PEAD o PEBD, descartando y considerando como desechos los residuos elaborados a partir de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policloruro de vinilo (PVC), policarbonato (PC), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno rígido (PS), entre otros; mismos que son desechos derivados del consumo nacional, ocasionando que exista un plan de reciclaje ineficiente.

Es por esto que, se pretende aprovechar aquellos “residuos” plásticos que descartan las recicladoras para el diseño de nuevos materiales poliméricos ecoamigables, con el fin de reducir el impacto negativo que genera la acumulación de estos desechos fuera y dentro de las recicladoras.

1.2 Descripción del problema

En Ecuador, anualmente se generan cerca de 531.461 toneladas de desechos plásticos, donde más del 40% se basa en plásticos de un solo uso [2], mientras que en el 60% restante se encuentran plásticos de uso común, tales como el polietileno de alta densidad (PEAD), el cual se encuentra generalmente en envases cosméticos o detergentes, tapas o tapones de envases, tuberías, entre otros. Por esta razón, para el desarrollo de este proyecto, se trabajará con una recicladora plástica ecuatoriana debido a que la mayoría de las recicladoras aprovechan los residuos mencionados anteriormente en el reciclaje de materiales poliméricos para la elaboración de pellets 100% reciclados con el objetivo de reincorporarlos en la cadena de producción, promoviendo así una economía circular. Además, alrededor del 90% del material reciclado que

poseen las recicladoras nacionales corresponde al polietileno, por ello, se pretende aprovechar el PEAD reciclado como materia prima para la elaboración de alternativas ecoamigables.

Por otra parte, se debe resaltar el manejo de desechos plásticos que realizan las empresas recicladoras, las cuales se centran puntualmente en el reciclaje de plásticos como PP, PEAD y PEBD, puesto que, estos son sus principales productos de venta. Sin embargo, polímeros como ABS, PVC, PC o PS rígido no solo tienen una baja demanda comercial, sino también presentan un proceso complejo de reciclaje debido a sus propiedades químicas, ocasionando que estos residuos sean descartados durante el proceso de reciclaje, lo cual representa una baja rentabilidad para la empresa.

Para llevar a cabo el proceso de reciclaje que realizan dichas empresas, en primer lugar, se obtienen residuos de hogares mediante la colaboración de recicladores informales ya que, el uso de desechos provenientes de hogares permite a las recicladoras tener acceso a residuos que presentan una alta factibilidad de reciclaje tales como PE o PP, sin embargo, en este proceso pueden verse involucradas ciertas cantidades de polímeros que no desean reciclarse debido a su complejidad de reciclaje. En segundo lugar, se realiza una segregación de desechos donde los productos elaborados a partir de PE son separados y destinados a un proceso de trituración. Posteriormente, estos residuos triturados son lavados; la densidad del agua y de los materiales a reciclar permite realizar una segunda segregación con el fin de separar el polietileno de aquellos “otros desechos” que presentan dificultad de reciclaje.

En la actualidad, la empresa recicladora con la que se está trabajando no posee un plan fijo para depositar aquellos desechos descartados durante el proceso de reciclaje, por lo que estos son almacenados dentro de las instalaciones de la empresa generando “montañas de basura” en donde se estima que existen residuos almacenados desde hace más de 8 años.

1.3 Justificación del problema

En respuesta a las problemáticas planteadas anteriormente, se pretende diseñar un material compuesto elaborado a partir de una matriz de polietileno de alta densidad reciclado (rPEAD) reforzado con desechos plásticos provenientes de recicladoras ecuatorianas, los mismos que son descartados por las empresas debido a su baja demanda comercial, dando como resultado una acumulación de desechos dentro de las instalaciones de la empresa que genera altos costos de almacenamiento a largo plazo.

Por ello, se pretende diseñar un material que pueda ser empleado para la fabricación de un producto que represente una nueva línea de producción para la empresa, promoviendo así la economía circular y un plan de reciclaje eficiente, reincorporando los desechos a la cadena de producción como materia prima. En este caso, se ha seleccionado la elaboración de estacas plásticas con el propósito de reemplazar el uso de las estacas de madera convencionales usadas en el sector ganadero y de jardinería.

En la actualidad, el uso de estacas de madera es muy común en el sector ganadero y de jardinería debido a su fácil obtención y bajo costo; sin embargo, el uso del producto implica altos costos de mantenimiento para conservar su durabilidad [3] puesto que, al estar elaborados a partir de un material orgánico, se ven expuestas a la degradación y descomposición tanto por factores ambientales como por la presencia de organismos externos que conllevan a la proliferación de la madera, reduciendo así su vida útil y por consiguiente las propiedades mecánicas del mismo, es por esto que, las estacas son sometidas a tratamientos de protección mediante el uso de productos químicos que a largo plazo resultan tóxicos para el cuidado del suelo y fuentes hídricas [4].

De igual manera, se debe resaltar que el uso de estacas de madera involucra una extensa cantidad de problemas ambientales ya que promueve la deforestación y tala de árboles dentro del país. Actualmente, la deforestación de bosques es una de las principales problemáticas

ambientales que atraviesa el Ecuador; según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Ecuador es uno de los países con mayor pérdida de hectáreas de bosques durante los últimos años debido al aumento de las actividades humanas, dando como resultado una pérdida anual de 94.353 hectáreas de bosque [5]. Además, la fabricación de estacas de madera implica un consumo significativo de agua para el procesamiento de madera, aumentando así la huella hídrica del país [4].

1.4 Objetivos

En esta sección se detalla el objetivo general y específico enfocados al desarrollo del trabajo.

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un material compuesto a base de polietileno y desechos plásticos mediante la evaluación y optimización de las propiedades del material y las condiciones de procesamiento de este para la elaboración de estacas recicladas.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Evaluar las propiedades mecánicas de los compuestos preparados a partir de polietileno y desechos plásticos mediante ensayos de tracción y flexión para determinar una mezcla óptima para la obtención del material.
2. Determinar y optimizar las condiciones de procesamiento mediante reometría de torque para la obtención de un material compuesto reforzado con desechos molidos plásticos en una matriz de polietileno
3. Analizar el comportamiento mecánico de las estacas plásticas recicladas con la ayuda de un software de simulación para determinar la eficiencia de las estacas en servicio.

1.5 Marco teórico

En esta sección se detallan investigaciones previas relacionadas al desarrollo del proyecto.

1.5.1 Reciclaje del polietileno de alta densidad (PEAD)

El reciclaje del polietileno de alta densidad es un proceso muy importante cuando se hace referencia a la gestión sostenible de los residuos plásticos. Debido a su versatilidad y durabilidad, tiene muchas aplicaciones, desde envases de alimentos hasta productos de hogar.

Dependiendo de las instalaciones que se tengan disponibles y del sistema de tratamiento de residuos que se aplique, el reciclaje de este material puede tener varias etapas (Figura 1.1); sin embargo, hay una serie de pasos generales que se involucran en este proceso [6].

Figura 1.1

Proceso de reciclaje de PEAD



1.5.2 Reciclaje de plástico en Ecuador

En Ecuador, el reciclaje es una práctica que ha cobrado fuerza a través del tiempo, con el fin de promover la sostenibilidad y reducir el impacto ambiental. Para esto se han considerado una serie de estrategias que tienen la finalidad de promover y fomentar la cultura de reciclaje en los usuarios, recicladores y fabricantes.

Entre estas estrategias figuran los programas de reciclaje: “Programa Socio Bosque”, “Recicla tu Ciudad”, “Ecoalianza” y “Recicla Ecuador”; los cuales buscan concientizar e incentivar a las comunidades a reciclar, con el fin de facilitar el proceso de clasificación y separación de los residuos posconsumo.

Haciendo referencia a los acuerdos y leyes, se encuentran las leyes y legislaciones que deben seguir los fabricantes para contribuir al reciclaje. La “Ley Orgánica de Prevención, Control y Gestión Integral de Residuos” (LOPGIR) establece y extiende la responsabilidad a los distribuidores, importadores y fabricantes de productos de origen plástico de implementar sistemas de recolección y gestión de los residuos que se generen por sus productos. Por otro lado, están los acuerdos y reglamentos disponibles: “Reglamento General de la Ley Orgánica de Prevención, Control y Gestión Integral de Residuos” (RLOPGIR) y “Acuerdo Ministerial No. 011-2016”; ambos establecen regulaciones para la gestión de los residuos sólidos considerados como no peligrosos, grupo de residuos en los que figura el plástico.

1.5.3 Origen y disposición de los productos plásticos reciclado en Ecuador

Entre los plásticos más comerciales y con mayores aplicaciones en Ecuador se encuentran: PEAD, PET, PP y PS. Estos plásticos, al ser los más cotizados, son también los que más se encuentran entre los residuos posconsumo:

1. **PEAD.** - Utilizado en botellas de detergentes, tuberías y envases de alimentos; se considera el plástico con mayor mercado de reciclaje. Tras el procesamiento de los residuos y su transformación en materia prima

secundaria, se dispone para fabricar productos como tuberías, envases y bolsas plásticas.

2. **PET.** - Se encuentra regularmente en envases de agua, refrescos y alimentos, existen muchas empresas en Ecuador que se dedican exclusivamente al reciclaje de PET. Su reciclaje tiene como producto gránulos de PET que se utilizan para fabricar nuevas botellas, envases o fibras textiles.
3. **PP.** - Uno de los plásticos más utilizados en la línea industrial “hogar”, ofreciendo productos como envases, botellas, tapas y utensilios. Los gránulos obtenidos posterior a su proceso de reciclaje se utilizan en la fabricación de envases, muebles y artículos de hogar.
4. **PS.** - Se encuentra en envases de alimentos, como bandejas de poliestireno expandido (EPS) para alimentos y en productos electrónicos. Este plástico, a pesar de tener gran aplicación, es de los plásticos que menos mercado de reciclaje presenta.

1.5.4 Uso de desechos como refuerzos en materiales compuestos

El uso de desechos plásticos como refuerzo en materiales compuestos se ha vuelto una práctica muy común en la actualidad, con el fin de aprovechar los residuos plásticos, reducir su impacto ambiental y en ciertos casos, reducir costos relacionados al procesamiento industrial.

Un ejemplo es una matriz de material reciclado de polietileno de alta densidad, reforzado con fibras de cáñamo y sisal; dicho material presentó una resistencia a la tracción de 45 MPa, un valor muy significativo en comparación con los 26 MPa de resistencia máxima del PEAD. Por otro lado, la rigidez del PEAD al incorporársele las fibras naturales también aumenta, rondando los valores de los 3.600 MPa, mientras que el PEAD por sí solo alcanza una rigidez de 1.300 MPa [7] [8].

Otro ejemplo de material compuesto es una matriz de plástico reciclado PET con refuerzos de fibra de vidrio y residuos de vidrio de ventanas. Este material compuesto presentó una resistencia máxima a la tracción de 81.625 MPa en composición de 85% de matriz, 10% en fibra de vidrio y 5% en vidrio de ventana; por otro lado, su resistencia a la compresión se mostró máxima (1876.14 MPa) a un 70% de peso de matriz, 10% fibra de vidrio y 20% vidrio de ventana; estos valores presentan un gran incremento al compararlo con el PET, el cual muestra una resistencia máxima a la compresión de 68.5 MPa y una resistencia máxima a la tracción de 72.4 MPa. Además, se pudo obtener un procesamiento que presentó una distribución cristalina uniforme [9] [10].

Otra aplicación muy considerada actualmente es el uso de fibras plásticas en matrices de hormigón reciclado, en el cual se evidencian aumentos en la resistencia a la flexión al agregar polvos de polietileno y polvos agregados finos de origen reciclado.

A pesar del gran campo que se ha generado en la industria de materiales compuestos utilizando reciclados como refuerzos, la mayoría de las investigaciones y desarrollo muestran inconvenientes relacionados al procesamiento de estos materiales a causa de la incompatibilidad de los refuerzos con las matrices, debido a la naturaleza, tamaño y composición de las fibras; dando como resultados materiales con buenas propiedades físicas y mecánicas, pero con problemas en su procesamiento [11].

Acorde a estas investigaciones, se busca la obtención de un nuevo material que tenga como base una matriz de polietileno de alta densidad 100% reciclado con refuerzos de materiales plásticos de distintos tipos que, al no tener un amplio mercado en la industria de reciclado, no suelen ser reprocesados.

1.5.5 Uso de material reciclado en elementos estructurales

Debido a la creciente industria del reciclaje y a la reutilización de los residuos, surge la necesidad de innovar en productos que cumplan las funciones de los ya existentes, mostrando

como alternativa el hecho de que sean de origen reciclado, mitigando así el uso de materia prima virgen.

Entre los usos más comunes que suelen tener las materias primas recicladas se encuentran aplicaciones industriales y estructurales, siendo las últimas las más comunes y usadas en tablones de madera plástica para la fabricación de muebles y diseños de interiores, vigas de decoración para estructuras exteriores o interiores y estacas plásticas para usos de jardinería, construcción y agricultura [12].

De manera general, los productos hechos a partir de materia prima reciclada han ganado un amplio mercado debido a las propiedades obtenidas en comparación con elementos originales, además de las mejoras que se pueden mostrar como es el fácil manejo de estos elementos, la ergonomía que presentan, la estética que puede generarse con costos de producción muy bajos y la contribución con el medio ambiente reduciendo factores perjudiciales como la deforestación [13] [14].

2. Capítulo 2

2.1 Metodología.

En esta sección se detallan los diseños conceptuales y experimentales realizados para llevar a cabo la metodología de diseño de un material compuesto elaborado a partir de polímeros reciclados para la elaboración de estacas plásticas (ver Figura 2.1).

Figura 2.1

Diagrama de metodología de diseño.



2.2 Diseño conceptual

El objetivo de esta sección es definir criterios de diseño en base a normativas, requerimientos, principios de diseño que influyan en la elaboración del material, con el propósito de establecer alternativas de diseño que permitan optimizar la obtención del compuesto.

2.2.1 Normativas

En este apartado se detallan normativas que permiten determinar criterios de diseño, para la obtención de un compuesto reciclado destinado al soporte de cargas:

- I. Norma ASTM D6109 “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber and Related Products”. - Norma

- II. para evaluar propiedades de flexión de la madera plástica aplicable a productos elaborados a base de materiales compuestos [15].
- III. Norma ASTM 2990 – 01 “Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics”. – Describe procedimientos para determinar el comportamiento de fluencia de los plásticos bajo cargas de tensión y flexión [16].
- IV. Norma ISO 1133 “Plastics - Determination of the Melt Mass-Flow Rate (MFR) and Melt Volume-Flow Rate (MVR) of Thermoplastics”. – Procedimiento para medir la capacidad de flujo del material en función de su masa y volumen [17].
- V. ASTM D25 “Standard Specification for Round Timber Piles”. – Establece especificaciones estándar para la elaboración de pilotes o estacas de madera utilizados en el sector de la construcción en función de sus propiedades mecánicas y pruebas de calidad [18].

2.2.2 Criterios y requerimientos de diseño.

Los criterios de diseño permiten determinar los factores que presentan mayor influencia en el diseño del material compuesto elaborado a partir de polietileno y desechos plásticos, con el objetivo de determinar parámetros óptimos que permitan la elaboración de estacas plásticas.

Se debe tomar en cuenta que el material de relleno es recuperado de procesos de reciclaje en los cuales se presentan diferentes tipos de polímeros con diversas propiedades, por lo que son expuestos a pretratamientos que faciliten su compatibilidad y con la matriz. En este caso, el material de relleno es la única composición fija en el compuesto, por lo que, los criterios de diseño establecidos permiten seleccionar la matriz adecuada del nuevo material. En la Tabla 2.1 se pueden observar los criterios de diseño establecidos en base a las normas ASTM D6109, ASTM D25, ASTM 2990 – 01 y ISO 1133, las cuales destacan los requerimientos necesarios para el diseño del nuevo material.

Tabla 2.1*Criterios de diseño*

Criterio	Justificación
Procesabilidad	Facilidad de procesar el material considerando temperatura de procesamiento, degradación, compatibilidad y homogeneización.
Reciclabilidad	Comprende su alto consumo, facilidad y rentabilidad de reciclaje en Ecuador.
Rigidez/flexión	Garantizar una excelente resistencia frente a las cargas aplicadas, considerando la flexibilidad y rigidez del material frente a deformaciones.
Resistencia a la abrasión	El material, al estar expuesto a condiciones abrasivas, como el contacto con el suelo, deberá poseer una alta resistencia al desgaste, impidiendo el debilitamiento estructural del producto.

Tomando en cuenta dichos criterios de diseños, se determinó el siguiente orden de importancia:

Rigidez/Flexibilidad > Reciclabilidad > Procesabilidad = Resistencia a la abrasión

Por lo que se calculó la ponderación de los criterios de diseños (Tabla 2.2) para una selección óptima para la matriz del compuesto (Apéndice A).

Tabla 2.2

Ponderación de criterios de diseño para matriz del compuesto.

Criterio	Procesabilidad	Rigidez-Flexibilidad	Reciclabilidad	Resistencia a la abrasión	$\Sigma+1$	ponderación
Procesabilidad		0	0	0.5	1.5	0.15
Rigidez-Flexibilidad	1		1	1	4	0.4
Reciclabilidad	1	0		1	3	0.3
Res. Abrasión	0.5	0	0		1.5	0.15
				Suma	10	1

El orden de los criterios de diseños se determinó según las necesidades del producto final, la disposición de materia prima y la economía circular:

- I. **Rigidez-Flexibilidad.** - Debido a que las estacas están destinada a soportar cargas, se priorizan dichas propiedades mecánicas. A pesar de que la rigidez y flexibilidad son dos propiedades que mantienen una relación inversa, la relación rigidez-flexibilidad hace referencia al punto de equilibrio adecuado que maximice estas propiedades, obteniendo así un material rígido que sea resistente a la tracción y flexión, brindando estabilidad frente a cargas transversales.
- II. **Reciclabilidad.** – Este criterio se considera relevante, con base en la necesidad de fomentar y aplicar proyectos de economía circular que tengan, como beneficio adicional, disminuir la huella de carbono causada por el consumo de productos plásticos, asegurando la rentabilidad económica de la empresa.

- III. **Procesabilidad.** – Es considerado una de las características más importantes en la selección de materiales, sin embargo, en este proyecto presenta una relevancia moderada, debido a que la presencia de aditivos durante la manufactura tendrá como fin mejorar la procesabilidad del material.
- IV. **Resistencia a la abrasión.** – Criterio considerado con una relevancia moderada-baja; debido a que las estacas están en contacto con la superficie terrestre, se requiere de resistencia a la abrasión para mantener su forma geométrica durante su uso, sin embargo, no se considera relevante debido a que esto puede diferir en función del método de instalación que aplique el usuario.

2.2.3 Alternativas de diseño

A continuación, se presentan las alternativas de diseño destinadas a la matriz del material compuesto.

Alternativa 1: PEAD reciclado (rPEAD). El rPEAD ha sido estudiado por algunos autores [19, 20, 21, 22] y es considerado uno de los termoplásticos con mejores propiedades térmicas que permiten una excelente **procesabilidad**. El PEAD virgen presenta una temperatura de fusión (T_m) de 135°C con una temperatura de degradación aproximada a los 300°C [23], mientras que el rPEAD posee un T_m cerca de 131°C [19] con una temperatura de degradación superior a los 250°C [21], lo que permitirá una buena homogeneización con el material de relleno. Propiedades mecánicas del rPEAD como la **rigidez**, resistencia al impacto y **abrasión** son únicamente un 10% más bajas en comparación al material virgen [23], sin embargo; el PEAD presenta una baja resistencia a la **flexión** debido a que sus cadenas poliméricas laterales presentan un mayor empaquetamiento, convirtiéndolo en un material **rígido**. En Ecuador, el PEAD es uno de los plásticos más económicos ($\$0.17$ centavos/kg) [24] y más fáciles de reciclar, por lo que constituye un 90% de la materia prima de las recicladoras ecuatorianas, teniendo así, un alto potencial de **reciclabilidad**.

Alternativa 2: PEBD reciclado (rPEBD). El PEBD virgen presenta un T_m de 115°C y una temperatura de degradación cercana a los 260°C , mientras que el rPEBD experimentalmente presenta un T_m de 108°C [19] [21] y una temperatura de degradación alrededor de los 210°C , lo cual representa una **procesabilidad** baja moderada para la elaboración del compuesto, puesto que no todo el material de relleno logrará fundirse. Por otra parte, el PEBD destaca por tener una excelente resistencia a la **flexión** debido a sus numerosas ramificaciones con dos o cuatro átomos de carbono en sus cadenas poliméricas y al igual que el PEAD, sus propiedades mecánicas son únicamente un 10% más bajas que el material virgen [23] [22], sin embargo, el PEBD presenta una menor **rigidez** y **resistencia a la abrasión** en comparación al PEAD. En cuanto a su **reciclabilidad**, se debe destacar que el PEBD posee un bajo costo de compra ($\$0.17$ centavos/kg) [24], pero posee un segmento de mercado reducido, por lo que no es considerado un material prioritario para las recicladoras.

Alternativa 3: 50%rPEAD -50%rPEBD. Considerando los parámetros experimentales mencionados anteriormente, una matriz 50-50 (%) representaría una **procesabilidad** moderada con una temperatura de fusión cercana a los 119°C y una degradación a los 230°C [23] obteniendo así una temperatura adecuada para la adhesión del material de relleno y la matriz del compuesto. En cuanto a la **rigidez-flexibilidad**, se obtendría una relación óptima entre la rigidez del PEAD y la flexibilidad del PEBD, lo cual es primordial para la elaboración de estacas plásticas. No obstante, la **resistencia a la abrasión** del material se verá disminuida debido a que el PEBD reducirá dicha propiedad mecánica del PEAD [19]. En cuanto a la **reciclabilidad**, se debe resaltar que esta alternativa permite impulsar el reciclaje de dos plásticos de alto consumo a nivel nacional, promoviendo así la economía circular.

2.2.4 Selección alternativa de diseño

En base a la matriz de decisión y las ponderaciones definidas, se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3

Matriz de decisión para seleccionar la matriz del compuesto.

Alternativa	Rigidez- flexibilidad	Reciclabilidad	Procesabilidad	Res. Abrasión	Total
Alternativa 1	0,1	0,15	0,075	0,075	0,4
Alternativa 2	0,1	0,1	0,025	0,025	0,25
Alternativa 3	0,2	0,05	0,05	0,05	0,35

La mejor alternativa para la matriz del compuesto es el rPEAD, puesto que posee características de procesabilidad superiores debido a su alta temperatura de fusión y degradación. Además, presenta propiedades mecánicas óptimas junto a un bajo costo de compra.

2.3 Materiales

Considerando el material seleccionado como matriz del compuesto, en esta sección se detallan los materiales necesarios para llevar a cabo la obtención del material compuesto.

2.3.1 rPEAD

El material destinado para la matriz es el rPEAD, el cual es el producto estrella de la recicladora ecuatoriana que forma parte de este proyecto. El rPEAD se caracteriza por tener buena estabilidad térmica (punto de fusión 120-130°C y temperatura de degradación térmica 250-300°C) y resistencia química, siendo muy similar a la del PEAD virgen, por otro lado, sus propiedades mecánicas suelen verse ligeramente afectadas ante reprocesamientos, sin embargo, estas propiedades pueden mejorarse con ciertos aditivos.

2.3.2 “Otros desechos”

El grupo de “otros desechos” está compuesto por materiales con baja rentabilidad para la recicladora, estos residuos plásticos no tienen un amplio mercado en Ecuador, por lo que su disposición final son montañas de basura en las instalaciones de la empresa. Estos materiales no

presentan una composición exacta, debido a la extensa variedad de residuos que llegan a las recicladoras, sin embargo, se puede identificar los materiales que se han encontrado en mayor cantidad, los cuales se muestran con su temperatura de fusión y degradación [20, 22] en la Tabla 2.4. Estas temperaturas permiten determinar la temperatura de procesamiento del compuesto sin llegar a la degradación del material.

Tabla 2.4

Temperaturas de fusión y degradación para desechos plásticos

Plástico	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de degradación (°C)
ABS	190	220
PC	220	300
PET	230	250
PE (aditivado)	105 – 130	220
PMMA	160	220
PS	100	210

Es importante destacar que las temperaturas proporcionadas son teóricas, estas pueden variar dependiendo de la presencia de aditivos en su proceso de fabricación, o si el producto ha tenido un proceso de reciclaje previo.

2.3.3 Aditivos

El uso de aditivos en los procesos de formulación tiene como finalidad mejorar y modificar la procesabilidad del material, aumentar la estabilidad y durabilidad, reducir costos de producción y mejorar a las propiedades mecánicas. Por esto se busca trabajar con diferentes aditivos para determinar una mezcla que maximice y/o permita mantener un equilibrio entre las propiedades del material, considerando además que se trabaja con un material reciclado, el cual ha sufrido disminución en sus propiedades debido a la degradación de sus cadenas poliméricas en el proceso de reciclaje.

Peróxido Dicumilo (DCP). El peróxido de dicumilo es un peróxido orgánico usado como iniciador de polimerización en la fabricación de polímeros termoestables, su mecanismo de acción se basa en la descomposición térmica, con el fin de generar radicales libres que inicien la polimerización [21].

El DCP se utiliza como agente de reticulación en la producción de elastómeros y cauchos. La reticulación estabiliza y fortalece las cadenas de monómeros, mejorando así propiedades térmicas y mecánicas.

Down Retain. Aditivo hecho a base de ácido maleico utilizado ampliamente en la industria plástica por sus propiedades reactivas y modificantes. Es un ácido dicarboxílico cuya funcionalidad se basa en la introducción de grupos funcionales en las cadenas poliméricas.

Entre los beneficios que aporta el ácido maleico y sus derivados como aditivos están la promoción de adhesión y dispersión (beneficioso para la compatibilidad de la matriz y el agregado en los materiales compuestos) y la mejora en las propiedades mecánicas.

Vistamax 6502. Es un copolímero de propileno. Regularmente el uso de los copolímeros en el proceso de fabricación de plásticos tiene como objetivo mejorar propiedades mecánicas como la flexibilidad y resistencia al impacto, aunque también mejoran la adherencia y cohesión entre los distintos materiales en un compuesto. Los copolímeros de etileno-propileno mejoran la resistencia térmica y resistencia al envejecimiento.

Antioxidante 815LL. Tiene como función evitar la degradación plástica a causa de la oxidación. Es una mezcla fenol/fosfito. El fenol reacciona con los radicales libres generados durante el proceso de oxidación y el fosfito actúa como captador de estos radicales, inhibiendo así la degradación de las cadenas poliméricas.

2.4 Diseño Experimental.

En esta sección se detalla el procedimiento experimental realizado para la preparación de la materia prima, material compuesto, y probetas destinadas a ensayos mecánicos (ver Figura 2.2).

Figura 2.2

Diagrama de flujo para diseño experimental.



2.4.1 Preparación de material reciclado

El material reciclado, denominado como “otros desechos”, actúa como material de refuerzo, por lo que debe ser expuesto a diversos procedimientos previo a su uso (Figura 2.3). Primero, este fue lavado y secado con el objetivo de eliminar impurezas y minimizar la presencia de humedad, lo que permitió optimizar la compatibilidad del material de relleno con la matriz del compuesto.

Posteriormente, se llevaron a cabo segregaciones en el material reciclado con el fin de descartar la presencia de contaminantes metálicos provenientes de procesos de reciclaje. Mediante el uso de imanes, se extrajeron impurezas compuestas por metales ferrosos, mientras que, con inspección visual, se descartó la presencia de metales no ferrosos.

Finalmente, estos fueron tamizados a un tamaño de partícula de 850 micras y secados en una estufa a 60°C durante 24 horas tras ser sometidos a procesos de trituración con el objetivo de reducir el área superficial del material relleno, ya que estos pueden actuar como concentradores de esfuerzos en el compuesto y perjudicar su compatibilidad con la matriz.

Figura 2.3

Preparación del material de relleno



2.4.2 Preparación de mezclas y probetas

Para el diseño de las mezclas usadas en el material compuesto, se consideró mantener una relación de 30% en peso de los “otros desechos” como refuerzo y una composición inferior a 6% de aditivos, por lo que únicamente se varió la composición de aditivos por motivos de rentabilidad económica y disponibilidad de materia prima. Se evaluaron 7 formulaciones distintas (Tabla 2.5), las cuáles fueron preparadas, procesadas y presentadas en formas de probetas para la caracterización de sus propiedades en función a los criterios considerados en la matriz de decisión.

Tabla 2.5

Formulaciones para elaborar mezclas

Mezcla	PEAD [%]	Otros [%]	DCP [%]	Aditivos		
				Down Retain [%]	Vistamax 5602 [%]	Antioxidante 815LL [%]
rPEAD	100	-	-	-	-	-
rPEAD- 30OTROS	68	30	-	-	-	2
30OTROS- 1.5DCP	66,5	30	1,5	-	-	2
30OTROS- 2.5DR	65,5	30	-	2,5	-	2
30OTROS- 1.5DCP- 2.5DR	64	30	1,5	2,5	-	2
30OTROS- 2.5VM	65,5	30	-	-	2,5	2
30OTROS- 1.5DCP- 2.5VM	64	30	1,5	-	2,5	2

Para la preparación de mezclas del compuesto, se pesó las proporciones de matriz y material de refuerzo previamente establecidos (véase Tabla 2.5), luego se añadieron los aditivos respectivos y se mezcló el material en un reómetro de torque a 90 rpm durante 10 minutos a una temperatura de 210 °C, con el objetivo de evitar la degradación térmica del PEAD como matriz y

a su vez lograr fundir los “otros desechos” del material de relleno a pesar de su variable composición polimérica. Posterior a la obtención de las mezclas respectivas de los compuestos realizados, se procedió a triturar y reducir el tamaño del material obtenido para llevar a cabo la preparación de probetas de tracción y flexión (ver Figura 2.4).

Figura 2.4

Preparación de mezclas y probetas.



Para la elaboración de probetas se utilizó una prensa hidráulica de molde cuadrangular con calentamiento por resistencia eléctrica a una temperatura de prensado de 210 °C, con el propósito de evitar la degradación térmica del material compuesto, ya que la matriz, al estar elaborada de PEAD reciclado, puede verse afectada debido a que se encuentra expuesto a diversos reprocesos que debilitan sus cadenas poliméricas. Además, la presión establecida durante el prensado fue 1500 psi durante 5 minutos. Por último, se sumergió el molde en agua a temperatura ambiente durante 3 minutos para el enfriamiento de las probetas.

2.5 Evaluación de propiedades

A continuación, se detallan los ensayos mecánicos y caracterizaciones realizados a las probetas mencionadas anteriormente.

2.5.1 Reometría de torque

Este ensayo permite determinar la formulación óptima del material compuesto con el propósito de determinar la procesabilidad adecuada del mismo. Para esto se usó un reómetro para el mezclado donde se determinó una temperatura óptima de procesamiento de 210°C durante 10 minutos a una velocidad de 50 rpm.

2.5.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción se realiza en base a la norma ASTM 2990-01, con el fin de cuantificar el valor máximo de tensión soportado por el material. De este ensayo se espera obtener la mezcla que presente el máximo valor de tracción para la selección de la formulación adecuada. Se utilizan 5 probetas para el ensayo según lo establecido en la norma que se toma como referencia.

2.5.3 Ensayo de flexión

Para el ensayo de flexión se utiliza como referencia la norma ASTM D6109, esta busca cuantificar los valores máximos de flexión soportados por el material. Al igual que en el ensayo de tracción, se busca la mezcla que muestre mayor resistencia a la flexión. En caso de que los valores más altos obtenidos para ambos ensayos no pertenezcan a la misma formulación, la que presente mayor resistencia a la flexión (o mejor relación flexión/tracción) será escogida como adecuada, ya que, en servicio, las estacas están expuestas en mayor medida a esfuerzos de flexión. Se utilizan 5 probetas para este ensayo según lo establecido en la norma base, la cual menciona que se requieren mínimo 3.

2.5.4 Simulación del producto en servicio

Tras haber realizado los ensayos necesarios, y habiendo obtenido los datos requeridos, se toman estos datos como base para una simulación del producto final en servicio, para lo cual se utiliza el software de simulación Ansys mediante el uso de parámetros basados en la norma ASTM D25.

3. Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

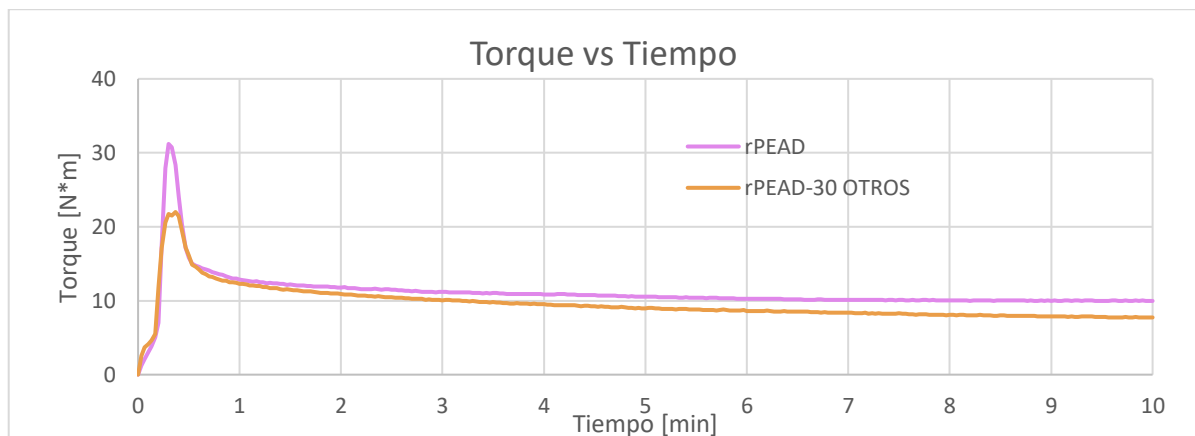
En esta sección, se pretende analizar el comportamiento del compuesto mediante reometría de torque, con el propósito de determinar su procesabilidad adecuada. Además, se pretende determinar las propiedades mecánicas a través de ensayos de tensión y flexión. También se determinó la viabilidad económica de la obtención del compuesto junto a la producción de estacas plásticas.

3.1.1 Reometría de torque

Se evaluó la procesabilidad de las formulaciones en desarrollo mediante mediciones de torque. La Figura 3.1 presenta el comportamiento del torque con respecto al tiempo del procesamiento de las mezclas rPEAD y rPEAD-30Otros, considerados como materiales de referencia, mientras que la Figura 3.2 muestra el comportamiento de la temperatura de procesamiento vs el tiempo.

Figura 3.1

Torque vs tiempo del rPEAD y rPEAD-30OTROS

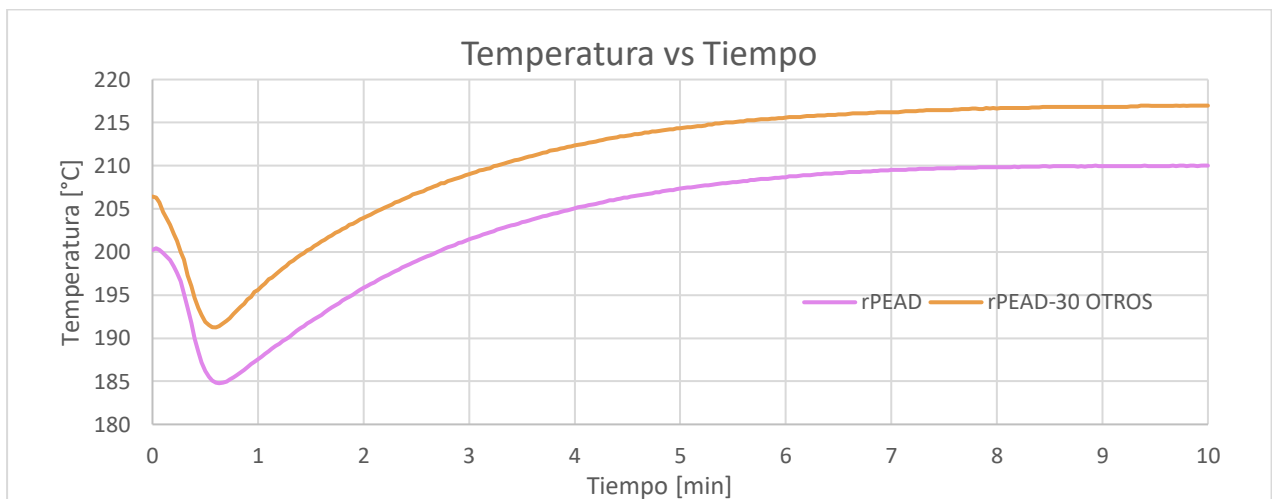


Se observa un incremento del torque en la Figura 3.1 para ambas mezclas alrededor del primer minuto, esto indica que el material se está fundiendo, lo que sugiere un aumento en la resistencia al mezclado. Posteriormente, en ambos casos, se produce una reducción del torque, en donde existe únicamente una etapa de fundición más no de plastificación, lo que conduce a una

etapa de degradación del material [25]. Esto se debe a que, a partir de los 4 minutos de procesamiento (Figura 3.2), se supera la temperatura de degradación estimada para el rPEAD, reduciendo así sus propiedades mecánicas. La degradación pudo ser observada en la mezcla obtenida, ya que el material presentaba fragilidad y una apariencia opaca.

Figura 3.2

Temperatura vs tiempo del rPEAD y rPEAD-30OTROS

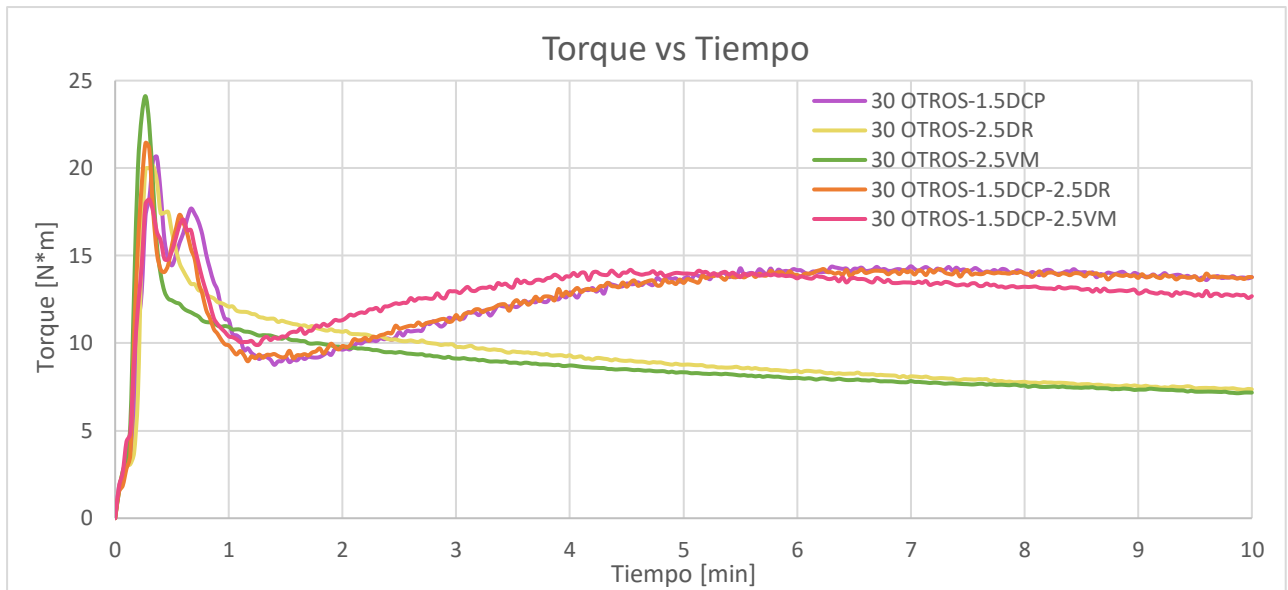


La Figura 3.3 y Figura 3.4 presentan el comportamiento reométrico de las formulaciones que contienen aditivos. En la Figura 3.3, se observa que antes del primer minuto todas las muestras presentan un incremento en el torque ya que, el rPEAD no se ha fundido completamente. Por lo tanto, en la Figura 3.4 se evidencia una disminución en la temperatura de procesamiento, dando paso a un proceso endotérmico en el que se funden los materiales que conforman el compuesto [26].

Posteriormente, existe una reducción y estabilización del torque después de 4 minutos de procesamiento para las mezclas 30Otros-2.5DR y 30Otros-2.5VM, lo cual se debe a la fundición completa de la matriz de PEAD, ejerciendo así una menor resistencia de mezclado. En este punto, la temperatura de procesamiento es superior a la temperatura de fusión establecida para el material compuesto (210°C). Sin embargo, el comportamiento del torque para ambos casos tiende a la degradación del material.

Figura 3.3

Torque vs tiempo de formulaciones con aditivos

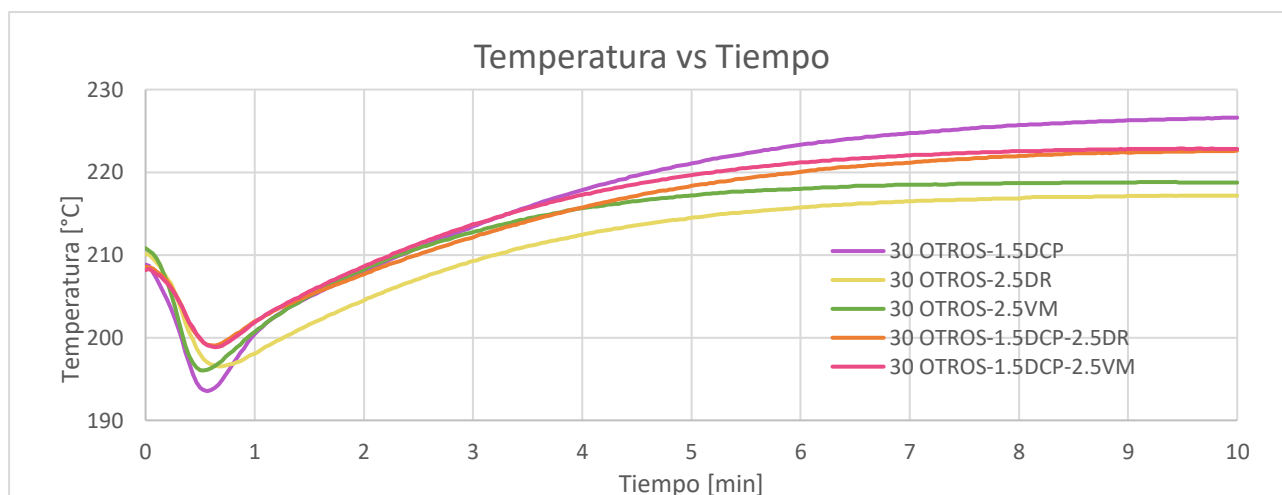


Además, para las mezclas 30Otros-1.5DCP, 30Otros-1.5DCP-2.5DR y 30Otros-1.5DCP-2.5VM, se requiere un menor torque y tiempo para iniciar el mezclado del compuesto, siendo esta última la que requiere un menor torque, es decir, menor resistencia al mezclado, lo cual es una característica importante a considerar para la procesabilidad del material final.

Asimismo, se puede observar que, tras la fundición inicial del material, existió una reducción y estabilización gradual del torque durante el primer y segundo minuto de procesamiento, dando como resultado un aumento en la temperatura establecida. La disminución del torque en los tres casos se debe principalmente a la fundición del DCP, el cual se caracteriza por permitir un aumento en la fluidez del sistema, reduciendo la viscosidad del material [27]. Es importante destacar que el uso de Vistamax fomenta la plastificación e incremento de las propiedades mecánicas del material, mientras que el Down Retain se distingue por mejorar las propiedades térmicas y mecánicas del material. Por ende, la mezcla 30Otros-1.5DCP-2.5VM presenta una mejor plastificación en comparación con las demás.

Figura 3.4

Temperatura vs tiempo de formulaciones con aditivos



En todos los casos, la plastificación que se produce a partir del minuto 3 ocurre debido a una reacción de funcionalización entre el DCP y la matriz, dando paso al entrecruzamiento de las cadenas poliméricas del PEAD y el material de relleno; este proceso es de carácter exotérmico debido a que existe una formación de radicales que conducen al proceso de polimerización.

Como resultado, la mezcla 30Otros-1.5DCP-2.5VM presenta mejores características reométricas durante su procesamiento, ya que dichos aditivos evitan la degradación del material, propiciando la polimerización y entrecruzamiento de cadenas poliméricas entre la matriz y el material de relleno, mejorando así sus propiedades mecánicas.

Reformulación. Una vez obtenidas las mezclas, se verificó mediante inspección visual que el compuesto contenía una considerable cantidad de material de relleno que no fue fundido durante su procesamiento, lo cual representa concentradores de esfuerzos que afectan las propiedades mecánicas del material (Figura 3.5). Por consiguiente, se optó por reducir la cantidad de desechos del 30% al 15% en peso, manteniendo las cantidades antes mencionadas de aditivo.

Figura 3.5

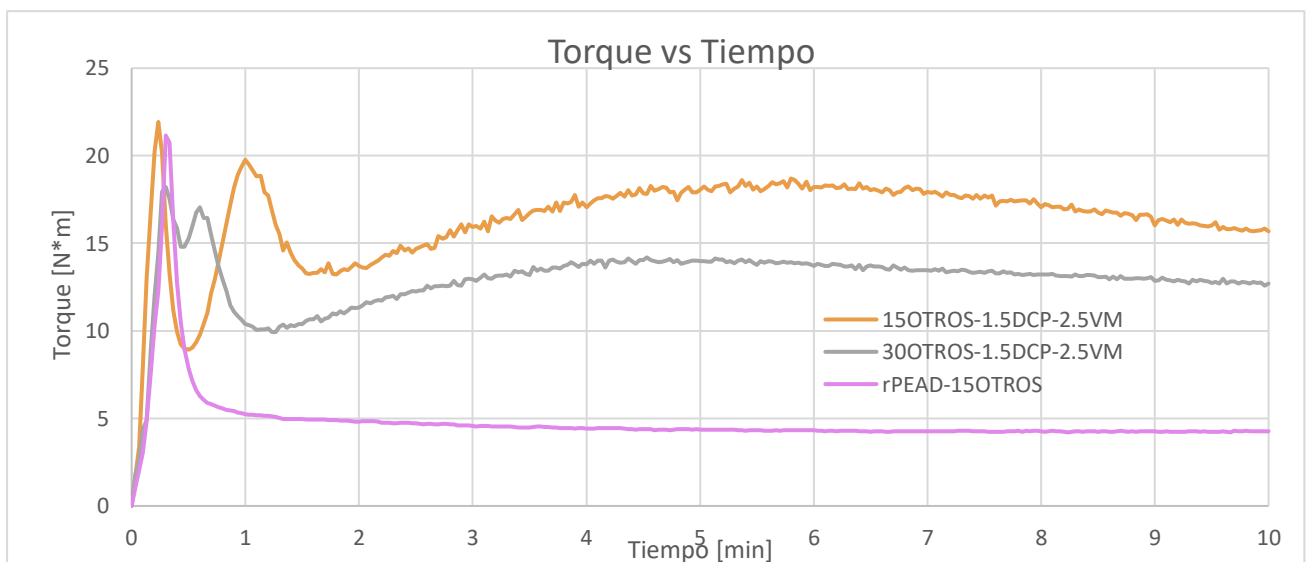
Material compuesto (a) 30% y (b) 15% en peso del material de relleno.



Se optó también por mantener la temperatura y tiempo de procesamiento con el propósito de fundir la mayor cantidad de material de relleno posible, sin embargo, se redujo la velocidad de procesamiento de 90 a 50rpm para evitar la degradación de la matriz. En la Figura 3.6 se puede observar que la muestra sin aditivos experimenta una tendencia a la degradación a partir del tercer minuto de procesamiento, mientras que la mezcla con 15% de material de relleno presenta una mayor plastificación que la muestra 30Otros-1.5DCP-2.5VM.

Figura 3.6

Torque vs tiempo de nueva formulación

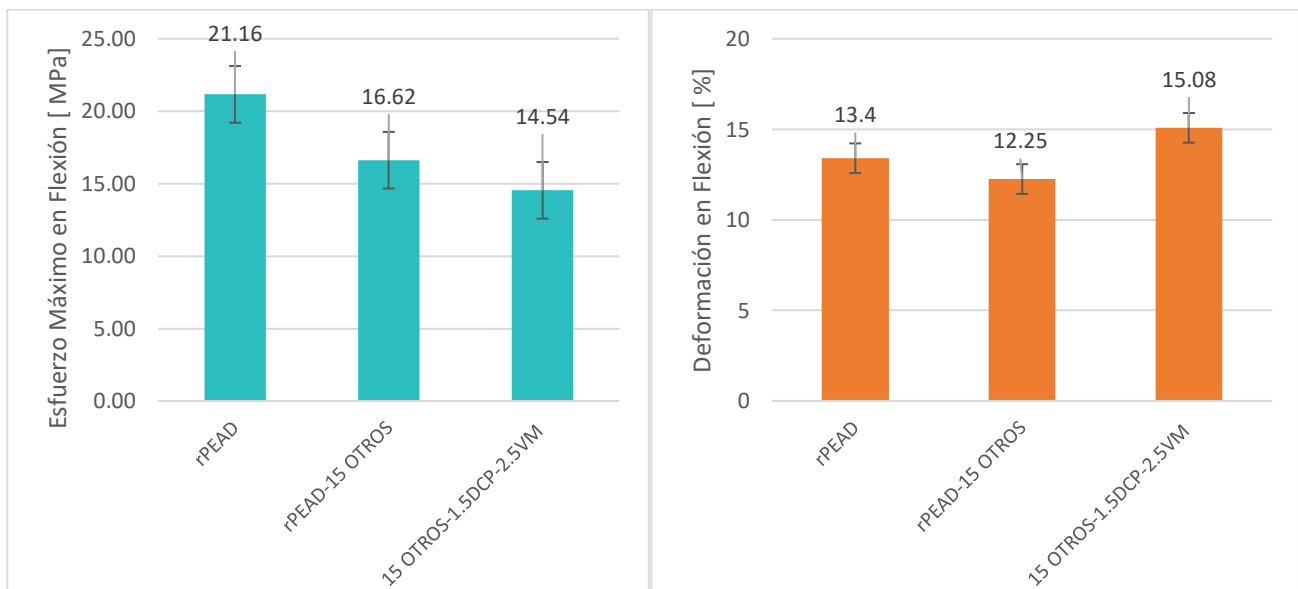


3.1.2 Ensayo de flexión

La Figura 3.7 muestra el esfuerzo máximo y la deformación en flexión de las muestras de referencia junto al material compuesto seleccionado con mejor procesabilidad. La formulación que presentó mayor capacidad de deformación fue 15Otros-1.5DCP-2.5VM con un 15.08%, mientras que la muestra con menor flexibilidad fue rPEAD-15Otros con 12.25%. Sin embargo, la formulación 15Otros-1.5DCP-2.5VM presentó un menor esfuerzo máximo en comparación a las muestras de referencia, lo cual se puede atribuir principalmente al material de relleno que no se logró fundir durante el procesamiento del compuesto ya que actúa como concentrador de esfuerzos, reduciendo la resistencia mecánica del material.

Figura 3.7

Ensayos de flexión



La presencia de aditivos como DCP y Vistamax mejoran la flexibilidad del compuesto ya que estos actúan como agentes de reticulación y fortalecen las cadenas de monómeros, mejorando las propiedades mecánicas y químicas del material. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la matriz del compuesto presenta un bajo punto de fusión, por lo que la temperatura de procesabilidad afecta ligeramente las propiedades térmicas del mismo [28] [29].

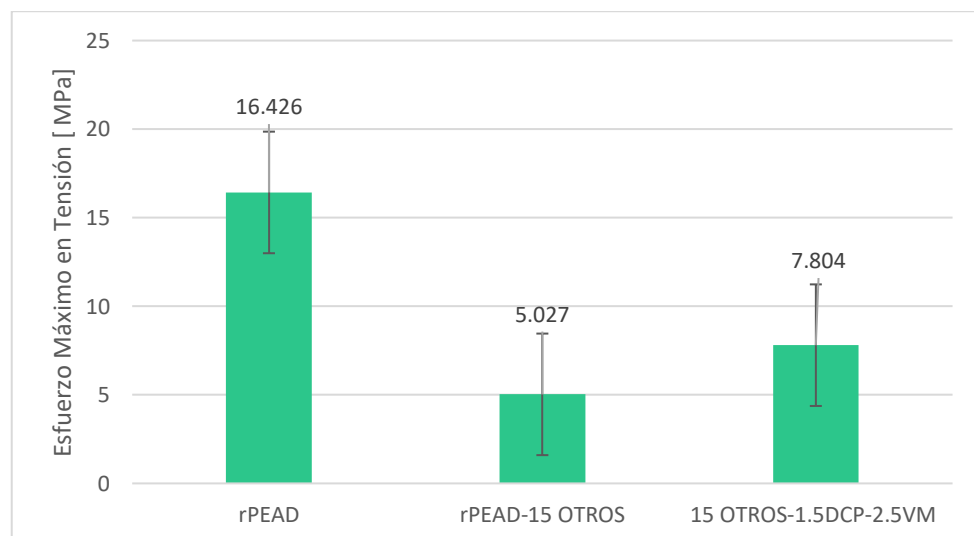
Por otra parte, se debe resaltar que la presencia del material de refuerzo restringe la movilidad de las cadenas moleculares del rPEAD, ocasionando un incremento en la rigidez del material y a su vez una reducción significativa de la flexibilidad del mismo [30].

3.1.3 Ensayo de tensión

La Figura 3.8 muestra el esfuerzo máximo en tensión de las muestras de referencia de rPEAD, rPEAD-15Otros y 15Otros-1.5DCP-2.5VM. Se puede observar que existe una tendencia decreciente de la resistencia a la tensión cuando se agrega el material de relleno a la matriz polimérica; sin embargo, la formulación que contiene aditivos presentó una mayor resistencia a la tracción con un esfuerzo máximo de 7.084 MPa, mientras que la formulación sin aditivos presentó un esfuerzo máximo de 5.027 MPa, por lo que la cantidad de material particulado usado como refuerzo en el compuesto resultó en una resistencia a la tracción deficiente sin el uso de aditivos.

Figura 3.8

Ensayos de tracción



La incorporación de DCP y Vistamax mejoró la compatibilidad de los polímeros, dado que estos se encuentran en la interfase y aumentan la adhesión interfacial del compuesto. Sin embargo, la presencia de poli componentes en el material de relleno aumenta la incompatibilidad

con la matriz, ocasionando un bajo efecto de compatibilización en la mezcla final, y a su vez un comportamiento mecánico deficiente [8].

Los bajos esfuerzos obtenidos para los compuestos en los ensayos de tensión se deben principalmente a la limitada actividad de las cadenas poliméricas durante el proceso de mezcla, lo que obstaculiza la adhesión de fases del compuesto, por tanto, los efectos sobre la modificación de las propiedades mecánicas del material con aditivo son inferiores en comparación con la mezcla rPEAD. Los ensayos mecánicos revelan que la adherencia interfacial no mejora cuando los poli componentes se agregan sin la presencia de aditivos o agentes de reticulación [8] [31].

Otro factor para considerar es la presencia de poros presentes en las probetas de tracción (Apéndice B), los cuales actuaron como concentradores de esfuerzos que limitaron la plasticidad del material, ocasionando una reducción en su resistencia a la tracción.

3.1.4 *Diseño del producto*

Las estacas plásticas tendrán una parte superior cuadrangular con una longitud constante por lo que, se usará el proceso de extrusión para su manufactura. El dimensionamiento del producto se basó en las necesidades del sector agrícola, según la norma ASTM D25 (ver Tabla 3.1).

Tabla 3.1

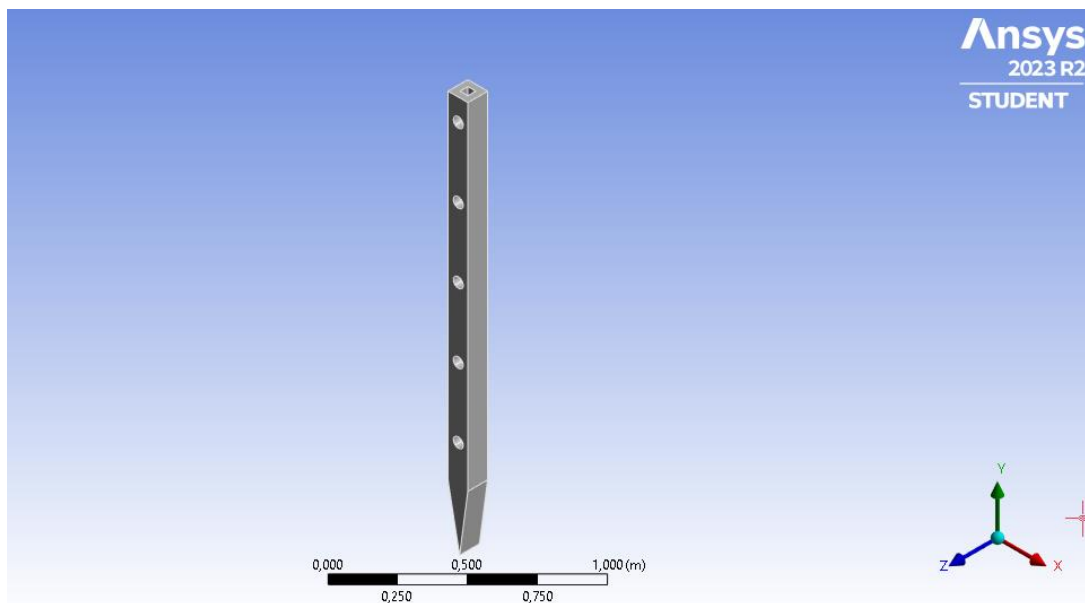
Dimensiones del producto

Dimensión	Medida
Ancho (cm)	10
Largo (cm)	10
Alto (cm)	180

El diseño de la estaca se muestra en la Figura 3.9, se consideró una forma en “V” en la parte inferior de la estaca, la cual facilite su instalación, la longitud de esta parte es de 30 cm, el cual se espera conseguir mediante troquelado, además se definió de un espacio interno hueco, obteniendo finalmente un espesor de 3 cm por cada lado de la estaca y de agujeros cada 30 cm por los cuales pasarían los alambres al momento de instalarse.

Figura 3.9

Diseño del producto



3.1.5 Simulación del producto en servicio

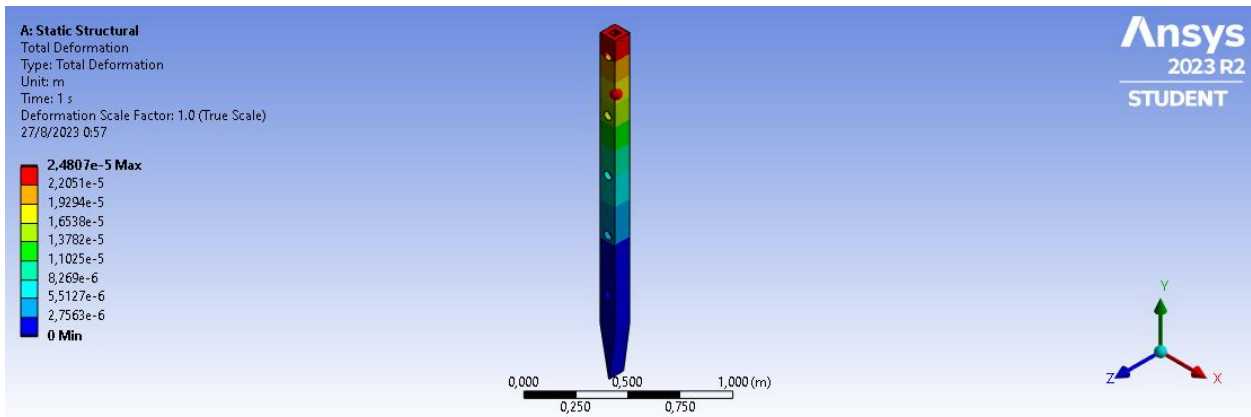
Para la simulación del producto se consideró un modelo estructural estático, en el cual se aplicaron cargas a ambos lados de la estaca, equivalentes al peso de una estaca en cada lado de esta (considerando la instalación en paralelo unidireccionalmente) y viento en la escala 6 de Beaufort (velocidades entre 39-49 km/h) [32]. Adicionalmente, se consideraron los 30 cm inferiores como parte de la instalación, por lo que las cargas estuvieron aplicadas únicamente a los 150 cm superiores.

El análisis se realizó en “ANSYS 2023 R2”, el cuál analizó el alargamiento total (Figura 3.10) y tensión equivalente (Figura 3.11) que sufre la estaca en servicio, además del factor de

seguridad (Figura 3.12). Esto se realizó mediante la creación de un nuevo material con las propiedades mecánicas antes detalladas.

Figura 3.10

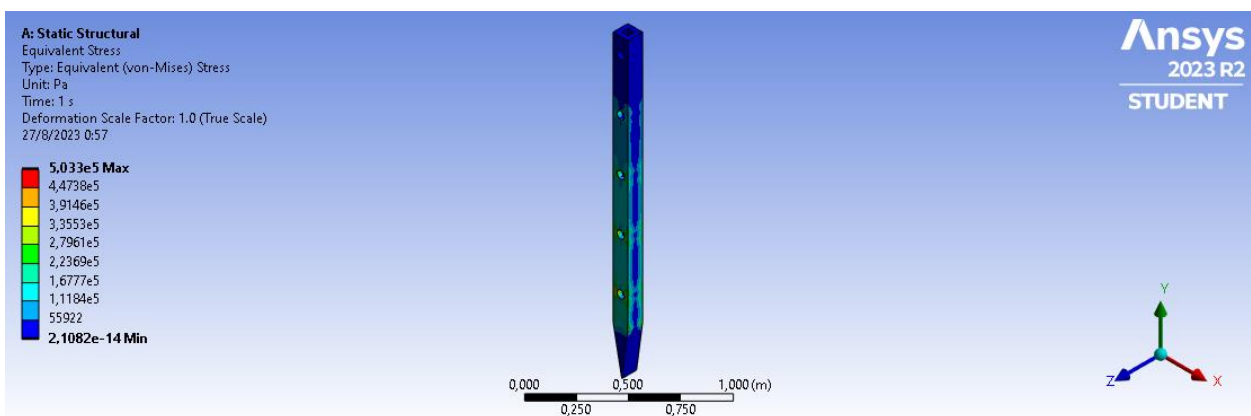
Alargamiento total



El alargamiento total que sufre la estaca (escala real) denota un valor máximo de 0.0248 milímetros ubicado en la parte superior del elemento, valor que no afecta el funcionamiento de la estaca.

Figura 3.11

Tensión equivalente

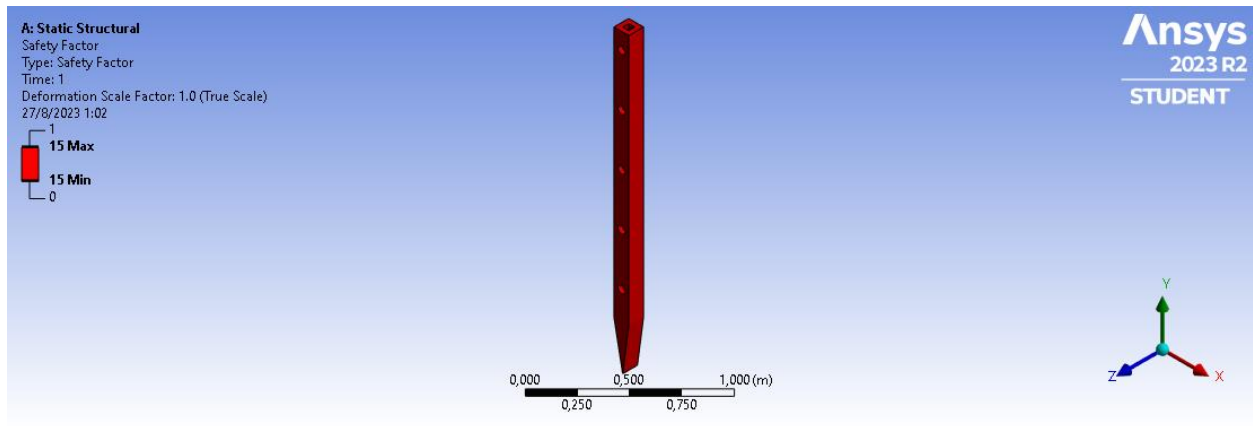


La tensión equivalente muestra un valor máximo 0.05 MPa, el cual se evidencia en los bordes de los agujeros por los cuáles pasaría el alambrado (puntos en donde se ubicaron las

tensiones para la simulación). Por estos agujeros se fijarían y pasarían alambres que conectarán las estacas.

Figura 3.12

Factor de seguridad



Finalmente, el factor de seguridad fue de 15 para todas las partes de la estaca, por lo que se asume que el material obtenido es completamente óptimo para ser procesado y utilizado como estacas para cercar.

3.2 Análisis financiero

Para el análisis financiero se consideró la institución de una línea de producción en una empresa ya existente, por lo que el espacio físico no genera costos. Se requiere de un dado especial para la producción de la estaca, adicionalmente de una troqueladora para darle la forma en “V”.

3.2.1 Análisis de costos

Para el análisis de costos y posterior análisis de rentabilidad se consideran los costos iniciales presentados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2*Costos iniciales*

Insumos y equipos iniciales necesario	Costo (USD)
Troqueladora	7000
Dados de extrusora y gastos logísticos iniciales	5000

Posteriormente, se consideran los gastos anuales que involucra la producción de estacas. Para esto se espera una producción anual de 10.000 unidades de estaca, por otro lado, debido a una producción de 200 kg/h se requieren de 755 horas para cumplir con la producción, y un pago de 5 USD/h por operador. El consumo energético de la extrusora es de 0.55 KWh/kg. Los egresos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3*Gastos anuales*

Insumo, equipo y personal	Costo (USD)
Insumos consumidos y mantenimiento de extrusora	3.000
Pago a operador	3.775
Operación de la extrusora (consumo energético)	6.752,03
Materia prima	56.308,5
Egresos totales	69.835,53

En la Tabla 3.4 se presenta el análisis de ingresos anuales por la venta de estacas, para esto se considera que se vende el 98% de las estacas producidas.

Tabla 3.4*Ingresos anuales*

Producción anual	10.000
Precio de venta de estaca (USD)	7.85
Ingreso total por venta de estaca (USD)	7.094,48
Utilidad (ingreso – egreso) (USD)	25.509.19

Finalmente, en la Tabla 3.5 se presenta el flujo de caja con el que se determinará la viabilidad económica del proyecto. Aquí se considera un valor de inflación de 2.4% (último valor registrado en el país), porcentaje que afecta a egresos e ingresos y se realiza la proyección a 3 años.

Tabla 3.5*Fujo de caja*

Año	Flujo beneficio	Flujo costo	Flujo neto	Flujo acumulado
	(USD)	(USD)	(USD)	(USD)
0	0	12.000	-12.000	-12.000
1	76.930	69.835,53	7.094,48	-4.905,53
2	78.776,32	71.511,58	7.264,74	2.359,22
3	80.666,95	73.277,86	7.439,10	9.798,32

3.2.2 Viabilidad económica

La viabilidad económica del proyecto se analizó mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Retorno (PR), se consideró un 8% como tasa de descuento (porcentaje más alto actualmente) y una inversión inicial de 12.000USD. En la Tabla 3.6 se muestran los valores del VAN, TIR y el PR.

Tabla 3.6*Viabilidad económica*

Factor	Valor
VAN	9.882,34 USD
TIR	36.63%
PR	1 año y 8 meses

Debido a que el VAN dio positivo, el TIR es una tasa de retorno bastante elevada en comparación a la tasa de interés y el tiempo de retorno de la inversión es de aproximadamente 1 año y 8 meses, se tiene un proyecto rentable.

4. Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

En esta sección se detallan las conclusiones obtenidas y enlazadas con los objetivos previamente planteados, a partir de los resultados de condiciones de procesamiento obtenidos mediante reometría de torque, el análisis de las propiedades mecánicas de tracción y flexión del compuesto final, y el análisis del comportamiento mecánico de las estacas en servicio mediante el software ANSYS.

4.1.1 Conclusiones

- Se diseñó un compuesto polimérico a partir de polietileno reciclado y desechos plásticos mediante la variación de aditivos, en donde se logró definir a la mezcla 15Otros-1.5DCP-2.5VM como la composición ideal para la elaboración de estacas plásticas, considerando las condiciones de servicio de los pilotes de madera en referencia a la normativa ASTM D25. Las condiciones óptimas de procesamiento de este material fueron 210 °C y 50 rpm durante 10 minutos.
- Para determinar la mezcla óptima del compuesto mediante reometría de torque, se trabajó inicialmente con un 30% en peso del material de relleno en el compuesto a condiciones de procesamiento de 210 °C y 90 rpm durante 10 minutos, sin embargo, el material presentó una gran cantidad de material de refuerzo que no logró fundirse durante el mezclado, por lo que se modificó la temperatura y velocidad de procesamiento hasta 270 °C y 70 rpm, en donde se observó que la mayor cantidad de material de relleno fue fundido; no obstante, se obtuvo como resultado un material con una matriz degradada con color opaco y alta fragilidad. Por esta razón, se optó por reducir la cantidad de material de relleno al 15% en peso y disminuir la velocidad de procesamiento a 50 rpm para evitar la degradación de la matriz de rPEAD.

- La presencia de aditivos, DCP y Vistamaxx 6502 en este caso dieron paso a la polimerización y mejoraron las propiedades mecánicas en comparación con el material de referencia (85% rPead y 15% Otros), ya que estos aditivos permitieron que se regeneren los enlaces poliméricos que fueron perdidos durante los procesos de reciclado; esto a su vez se determina como un paso importante en el proceso de mezclado y síntesis del nuevo material.
- Se obtuvo un material que presenta 14.54 MPa de esfuerzo máximo en flexión y 15.08 % de deformación ante este mismo comportamiento. A pesar de no ser el material que mostró mayor esfuerzo máximo, sí es el que presentó más deformación; ante la ausencia de un diagrama esfuerzo - deformación, dichos valores dan una idea de que (según el criterio de área bajo la curva) este material es el que más energía absorbe durante la deformación.
- El material presentó un esfuerzo máximo en tensión de 7.804 MPa, un valor superior al material compuesto de referencia, pero menor al del rPEAD. Esto se debe a la presencia de poros en las probetas realizadas, los cuales funcionaban como concentradores de esfuerzos, promoviendo así el fallo del material.
- Mediante el uso del software ANSYS, se pudo determinar que el material obtenido cumple con las exigencias estructurales que debe tener una estaca, presentando un alargamiento total de 0.0248 milímetros y una tensión equivalente máxima de 0.05 MPa; con un factor de seguridad de 15 a lo largo de todo el cuerpo de la estaca. Por ello, se concluye que el material es totalmente apto para ser utilizado como un elemento estructural, con la capacidad de soportar cargas en dirección perpendicular a su geometría.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda trabajar el material de refuerzo con tamaños de partículas inferiores a 850 micras, ya que de esta manera el material de relleno que no logre fundirse durante el mezclado no actuará como concentradores de esfuerzos que reduzcan las propiedades mecánicas del compuesto final.
- Analizar el comportamiento del compuesto con matrices poliméricas termoplásticas que presenten temperaturas de fusión y degradación mayores que el PEAD, con el propósito de fundir la mayor cantidad de material de relleno mediante el aumento de la temperatura de mezclado del compuesto. El polipropileno (PP) y el tereftalato de polietileno (PET) son ejemplos de termoplásticos fáciles de reciclar que podrían ser empleados como alternativas de mejora para la matriz del compuesto.
- Entre los problemas identificados está la síntesis del material, pues la presencia de poros no permitía evaluar con precisión la resistencia del material ante flexión y tensión, por lo que es recomendable hacer estudios que permitan encontrar el proceso adecuado que elimine la presencia de poros en el producto terminado.
- Someter el material a ensayos adicionales que aporten a su uso en servicio como resistencia a la abrasión, corrosión, estabilidad dimensional, pruebas de punto de inflamación y envejecimiento acelerado, con el objetivo de asegurar la calidad del material obtenido.

5. Referencias

- [1] EL UNIVERSO, «Ecuador y reciclaje,» *Una planta de reciclaje da 'segunda vida' a plásticos y cartones; se usan para fabricar nuevos productos*, 8 Mayo 2022.
- [2] F. Terranova, *En Ecuador se arroja más de medio millón de toneladas de plástico cada año*, Guayaquil: ECUAVISA, 2022.
- [3] I. Momohara, H. Sakai, H. Kurisaki y W. Ohmura, «Comparison of natural durability of wood by stake tests followed by survival analysis,» *Journal of Wood Science*, Diciembre 2021.
- [4] L. Almeida y K. B. R. Razavi, «A Comparative Case Study of Certified and Non-Certified Green Buildings and Their Response to Climate Change,» *Buildings*, 2023.
- [5] D. Montaña, «Mongabay: Periodismo ambiental independiente en latinoamerica,» *Nuevo estudio: en los últimos 26 años Ecuador ha perdido más de 2 millones de hectáreas de bosque*, 18 marzo 2021.
- [6] J. L. Sinchi, «Experimentación de los plásticos HDPE y PP reciclados como materia prima para la generación de mobiliario,» 2018.
- [7] ASTM, «Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber and Related Products,» *ASTM*, 2019.
- [8] F. ZHENGPING, Z. MINFENG, C. GUOPING y X. CHENGWEI, «Application of Phase Dispersion–Crosslinking Synergism on Recycling Commingled Plastic Wastes,» *Institute of Polymer Composites*, 2001.
- [9] W. A. Sadik, A.-G. M. El-Demerdash, A. E. Abokhateeb y N. A. Elessawy, «Innovative high-density polyethylene/waste glass powder composite with remarkable mechanical, thermal and recyclable properties for technical applications,» *PMC*, 2021.
- [10] Y. & A. M. Kanda, «Effective utilization of recycled fine aggregate powder as reinforcement particles in polyethylene composite,» *Polymers and polymers composites*, 2020.

- [11] F. Perugini y M. L. & A. U. Mastellone, «A Life Cycle Assessment of Mechanical and Feedstock Recycling Options for Management of Plastic Packaging Wastes,» *Enviromental Progress*, 2005.
- [12] J. Vicente, «Reciclaje del polietileno de alta densidad HDPE para la fabricación de laminas,» *Escuela Superior Politecnica del Litoral*, 1992.
- [13] J. Cordoba, A. Gaona y S. Lozano, «Uniones estructurales en madera plástica para edificaciones,» *JOSAGA S.A.*, 2020.
- [14] J. Sierra, «Usos y aplicaciones del plástico PEAD reciclado en la fabricación de elementos estructurales para onstrucción de vivienda en Colombia,» 2016.
- [15] ASTM, *ASTM D6109-19: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastic Lumber and Related Products*, 2019.
- [16] ASTM, *D2990 - 01 :Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics*, 2010.
- [17] ISO, *ISO 1133-1:2022 Plastics — Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics — Part 1: Standard method*, 2022.
- [18] ASTM, *ASTM D25-12: Standard Specification for Round Timber Piles*, 2017.
- [19] C. Aumnate, N. Rudolph y M. Sarmadi, «Recycling of Polypropylene/Polyethylene Blends: Effect of Chain Structure on the Crystallization Behaviors,» *Polymers*, vol. 9, p. 11, 6 Septiembre 2019.
- [20] S. Saikrishnan, D. Jubinville, C. Tzoganakis y T. H. Mekonnen, «Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling,» *Polymer Degradation and Stability*, vol. 182, Diciembre 2020.
- [21] J. Zhang, V. Hirschberg y D. Rodriguez, «Blending Recycled High-Density Polyethylene HDPE (rHDPE) with Virgin (vHDPE) as an Effective Approach to Improve the Mechanical Properties,» *Recycling*, 26 Diciembre 2022.
- [22] B. I. S. Murat, M. S. Kamalruzaman, M. H. N. Azman y M. F. Misroh, «Assessment of Mechanical Properties of Recycled HDPE and LDPE Plastic Wastes,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.

- [23] A. I. REZAKALLA y S. T. PETROVNA, «Study of Mechanical Properties of Recycled Polyethylene of High and Low Density,» *Materiale Plastice*, 2021.
- [24] Gobierno del Ecuador, «Precios de Mercado Referenciales para Materiales Reciclables,» Quito, 2014.
- [25] Y. Lei, Q. Wu, F. Yao y Y. Xu, «Preparation and properties of recycled HDPE/natural fiber composites,» *Composites: Part A applied science and manufacturing*, vol. 38, 2007.
- [26] Y. Li, H. Xu y C. Wu, «The effect of using the two-step extrusion method on the oxidation induction time value of recycled high density polyethylene,» *Polymer Journal*, vol. 44, n° 5, 2012.
- [27] C. A. Ararat y E. A. Murillo, «Polietileno de baja densidad funcionalizado con un poliéster poliol altamente ramificado maleinizado,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 12, n° 23, 2015.
- [28] A. Patti, D. Acierno, A. Laterri, C. Tosto, E. Pergolizzi y G. Cicala, «Influence of the Processing Conditions on the Mechanical Performance of Sustainable Bio-Based PLA Compounds,» *Polymers*, vol. 12, n° 10, 23 Agosto 2020.
- [29] A. NURLIY y A. JOHAR, «STUDY ON TENSILE AND FLEXURAL PROPERTIES OF RECYCLED HIGH DENSITY POL YETHELENE/SA WDUST COMPOSITES,» *Bachelor of Engineering*, 2011.
- [30] K. M. Hyie, B. Salina, M. Nathan y R. Nik, «Tensile and flexural investigation on polypropylene recycling,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 180, 2017.
- [31] M. M. P. LEE, C. H. HSIEH, K. M. Y. C. I. CHANG y P. L. C. HA, «Blends of PVC, PE, and PS Modified by Chlorinated Polyethylene (WE) and Dicumyl Peroxide (DCP),» *Union Industrial Research Laboratories*, vol. 2, n° 2, 1980.
- [32] C. Herrero Novoa, «Estudio de la velocidad del viento: análisis espacial y ajuste a una función de distribución,» *Universidad de Valladolid*, 2016.

6. Apéndices

Apéndice A.

Matrices de decisión para seleccionar la matriz del material compuesto

Rigidez	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0.5	0	1.5	0.25
Alternativa 2	0.5		0	1.5	0.25
Alternativa 3	1	1		3	0.5

Procesabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.17
Alternativa 3	0	1		2	0.33

Reciclabilidad	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		1	2	0.33
Alternativa 3	0	0		1	0.17

Res. Abrasion	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0.5
Alternativa 2	0		0	1	0.17
Alternativa 3	0	1		2	0.33

Apéndice B.

Probetas de tensión de las muestras realizadas que presentan poros en la sección de encuellamiento.

