

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción

“Diseño de paneles y vigas estructurales elaborados a base de polietileno reciclado de fundas de banano”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Gabriel Antonio Marmolejo Minga

María José Godoy Vivar

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios, a mi familia y a las personas que me apoyaron durante todo el proceso. También va dedicado a la Institución y a sus docentes, que me impartieron todos los conocimientos y experiencias para lograr ser un buen profesional.

Gabriel Antonio Marmolejo Minga

El siguiente trabajo está dedicado a todas y cada una de las personas que fueron parte de este camino.

María José Godoy Vivar

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a toda mi familia y a mis amigos que me apoyaron durante todo este periodo de formación profesional, dándome ánimos en momentos difíciles y celebrando los logros alcanzados día a día.

Gabriel Antonio Marmolejo Minga

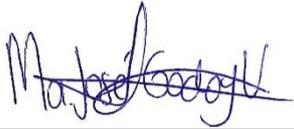
Gracias infinitas a todos. En especial a mi familia y amigos que motivaron cada uno de mis pasos.

Gracias a todos mis docentes que forjaron mi camino. En especial al doctor Andrés Rigail y su equipo por guiarme en mi etapa académica.

María José Godoy Vivar

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *María José Godoy Vivar, Gabriel Antonio Marmolejo Minga* 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”



María José Godoy Vivar



Gabriel Antonio Marmolejo Minga

EVALUADORES



Firmado electrónicamente por:
**ANDREA JUEL
BOERO VERA**



Firmado electrónicamente por:
**ANDRES FRANCISC
O RIGAIL CEDENO**

Msc. Andrea Boero Vera
PROFESOR DE LA MATERIA

Ph.D. Andrés Rigail Cedeño
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En los últimos años la producción de banano en el Ecuador ha aumentado en un 8.5% y por tanto, también se incrementa el consumo de plásticos para el cultivo, de los cuales en un 60% de los casos son desechados al medio ambiente siendo un riesgo para la fauna y recursos hídricos cercanos. Por tal motivo el presente proyecto integrador tiene por objetivo el diseño de estructuras, como vigas y paneles para viviendas, elaboradas a partir de fundas de banano recicladas, logrando así incorporar un modelo de economía circular en el ciclo de vida de este producto.

Para el efecto, se realizó la caracterización mecánica de tres muestras mediante ensayos mecánicos y reológicos: 100% rHDPE (muestra A), 95%rHDPE y 5% de afrecho de cebada (muestra B) y la última con un 5% de compatibilizante (muestra C). Dentro de los resultados se determinó que la muestra B es la más resistente a cargas de tensión y flexión, que lo hace factible para el diseño. Se realizaron los cálculos para determinar las dimensiones óptimas del producto, de modo que soporte las cargas máximas establecidas por las Normas Ecuatorianas de la Construcción.

Finalmente, se obtuvo una viga de 96x96mm, que para la estructura establecida para la vivienda cumple con la normativa, con un factor de seguridad de 1.3, y que es económicamente viable ya que el precio de venta es menor a una viga de similares características disponible en el mercado actual.

Palabras Clave: Fundas de banano, economía circular, afrecho de cebada, propiedades mecánicas, cargas estáticas.

ABSTRACT

In recent years, the production of bananas in Ecuador has increased by 8.5% and therefore, the consumption of plastics for cultivation has also increased, of which in 60% of cases they are discarded into the environment being a risk for nearby fauna and water resources. , for this reason the present integrating project aims to design of structures such as beams and panels for homes made from recycled banana covers, thus managing to incorporate a circular economy model in the life cycle of this product.

For this purpose, the mechanical characterization of three samples was carried out through mechanical and rheological tests: 100% rHDPE (sample A), 95% rHDPE and 5% barley bran (sample B) and the last one with a 5% compatibilizer (sample C). Among the results, it was determined that sample B is the most resistant to tension and bending loads, which makes it feasible for the design. Calculations were made to determine the optimal dimensions of the product, so that it supports the maximum loads established by the Ecuadorian Construction Standards.

Finally, a 96x96mm beam was obtained, which in the structure established for the house complies with the regulations with a safety factor of 1.3, and which is economically viable since the sale price is lower than the current market.

Keywords: *Banana cover, circular economy, barley bran, mechanical properties, static charges.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Ciclo de las fundas de banano.....	3
1.4.2 Proceso de extrusión	6
1.4.3 Ensayos.....	6
1.4.4 Normativa estructural para vigas y techos	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. Metodología.....	9
2.1 Diseño conceptual.....	10
2.1.1 Requerimientos y restricciones de diseño.....	10
2.1.2 Factores de influencia.....	11
2.1.3 Alternativas de diseño.....	12
2.1.4 Proceso experimental	15

2.1.5	Preparación de la materia	15
2.1.6	Proceso de extrusión	16
2.1.7	Proceso de obtención de las Probetas.....	16
2.1.8	Ensayos mecánicos	16
2.1.9	Ensayos reológicos.....	17
2.2	Diseño de forma	18
2.2.1	Diseño de la estructura	18
2.2.2	Diseño de forma de las vigas.....	19
2.2.3	Diseño de forma de los paneles.....	19
2.3	Análisis de esfuerzo de flexión en vigas	20
2.3.1	Cálculo de Inercia	20
2.3.2	Cargas en la estructura.....	21
2.3.3	Área tributaria	22
2.3.4	Esfuerzo de flexión en vigas	23
2.3.5	Criterio de falla.....	23
2.4	Simulación.....	24
CAPÍTULO 3		25
3.	Resultados Y Análisis.....	25
3.1	Ensayos mecánicos	25
3.1.1	Ensayo de tensión	25
3.1.2	Ensayo flexión	27
3.1.3	Ensayo Impacto	29
3.2	Calorimetría diferencia de barrido DSC	30
3.3	Ensayo de Reología	32
3.4	Ensayo termogravimétrico (TGA)	33
3.5	Diseño de la estructura de la vivienda.....	35
3.5.1	Cargas en la estructura.....	35

3.5.2	Dimensionamiento de la viga.....	38
3.5.3	Simulación.....	39
3.6	Análisis de costos.....	41
CAPÍTULO 4.....		44
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	44
4.1	Conclusiones.....	44
4.2	Recomendaciones.....	45

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
AC	Afrecho de cebada
TGA	Análisis termogravimétrico
rHDPE	Polietileno de alta densidad reciclado
NEC	Normas Ecuatorianas de la construcción
MFI	Índice de fluidez
DSC	Calorimetría Diferencial de Barrido
CA	Cascarilla de arroz
RB	Raquis de banano

SIMBOLOGÍA

kg	kilogramo
mm/min	milímetros por minutos
kgf	kilogramo fuerza
MPa	Mega Pascales
ksi	kilo libra por pulgadas cuadradas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ciclo lineal de las fundas de banano en la actualidad.	5
Figura 1.2 Nuevo ciclo de vida de las fundas de banano.....	6
Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño	10
Figura 2.2 Estructura con armadura modelo de pendolón para vivienda	18
Figura 2.3 Perfil cuadrado con canales para las vigas de polietileno	19
Figura 2.4 Modelos de los paneles para los techos	19
Figura 2.5 Perfil cuadrado con canales	20
Figura 2.6 Distribución de carga y dimensiones de la estructura	22
Figura 2.7 Área tributaria en cada elemento de toda la estructura	22
Figura 2.8 Fuerzas puntuales en la estructura.....	23
Figura 2.9 Modelo de la estructura en Autodesk Inventor.....	24
Figura 3.1 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de	26
Figura 3.2 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de	26
Figura 3.3 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de	27
Figura 3.4 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra A	28
Figura 3.5 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra B	29
Figura 3.6 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra C	29
Figura 3.7 Gráfica de la muestra A	30
Figura 3.8 Gráfica de la muestra B.....	31
Figura 3.9 Gráfica de la muestra C.....	31
Figura 3.10 Ensayo de reología de las 3 muestras.....	33
Figura 3.11 Gráfica de ensayo TGA para muestra 90% HDPE + 10% AC	34
Figura 3.12 Gráfica de ensayo TGA para muestra 90% HDPE + 5% AC	35
Figura 3.13 Cargas en la estructura del techo	36
Figura 3.14 Viga AH sometida a carga de flexión.....	37
Figura 3.15 Diagrama del Esfuerzo cortante en la viga	37
Figura 3.16 Diagrama de momento de la viga AH	38
Figura 3.17 Esfuerzo Von Misses para las vigas cuadradas de la estructura.	39
Figura 3.18 Zona de la estructura donde se produce el mayor esfuerzo Von-Mises.....	39
Figura 3.19 Análisis del coeficiente de seguridad en la estructura de la vivienda	40
Figura 3.20 Análisis de la deformación equivalente en la estructura de la vivienda.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ecuaciones de combinaciones de carga según norma	8
Tabla 2.1 Requerimientos de diseño	11
Tabla 2.2 Factores de influencia del proyecto	11
Tabla 2.3. Ponderación de criterios de selección	12
Tabla 2.4 Calificación para matriz de decisión.....	14
Tabla 2.5 Matriz de decisión para alternativas de diseño	14
Tabla 2.6 Pesos de composiciones	15
Tabla 3.1 Resultados del ensayo de tensión de los compuestos.....	25
Tabla 3.2 Resultados del ensayo de flexión de los compuestos.	27
Tabla 3.3 Resultados del ensayo de impacto IZOD.....	30
Tabla 3.4 Resultados del ensayo de calorimetría de barrido	32
Tabla 3.5 Resultados de rangos de temperaturas de degradación.....	34
Tabla 3.6 Fuerzas internas en la estructura del techo	36
Tabla 3.7 Tabla de resultado del dimensionamiento	38
Tabla 3.8 Resultados de la simulación de tensión.....	39
Tabla 3.9 Masa total de la viga.....	41
Tabla 3.10 Cantidad de materia prima y precio por unidad	42
Tabla 3.11 Costo total de producción por unidad y precio de venta.....	43

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país, la producción del banano es una de las principales fuentes de trabajo para muchas familias del sector rural y un pilar fundamental de nuestra economía, siendo así que, según el informe del Ministerio de Comercio Exterior, la exportación de banano representa el 35% del Producto interno bruto agrícola [1]. En el proceso de cultivo de banano existen subproductos del desperdicio del proceso como las fundas plásticas de polietileno de alta densidad que tienen la función de proteger de plagas al fruto asegurando una correcta maduración. Si no se realiza un tratamiento adecuado, estos desperdicios se pueden convertir en contaminantes con un alto riesgo hacia las personas y ambiente, debido a los químicos presente en la matriz del plástico [2].

La economía circular plantea reprocesar materiales que han salido de la línea de producción para reintegrarlos en el proceso con el fin de disminuir la contaminación ambiental generada por las industrias. De este modo, se planteó realizar un eco diseño de vigas y paneles estructurales con la matriz polimérica de las fundas de banano junto con el refuerzo orgánico del afrecho de cebada. Para su efecto, se realizó la caracterización del material mediante ensayos mecánicos, con el objetivo de obtener las propiedades del material y así realizar un diseño óptimo de los elementos.

1.1 Descripción del problema

Ecuador es uno de los países con mayor exportación de banano en el mundo. Parte de sus procesos de cultivo se basa en realizar la protección contra plagas del fruto a partir del embolse, el cual consiste en colocar una funda o bolsa plástica de polietileno perforada con un pesticida determinado [3]. Luego de cultivar el banano, la funda es desechada, causando un gran impacto ambiental en las zonas agrícolas. Generando un proceso de economía lineal, el cual define un sistema de elaboración de productos con una vida útil corta. Poco a poco se está incursionando en el sistema de economía circular, el cual

invita a los diseñadores y consumidores en contribuir con la disminución de desechos de productos, que actualmente son un problema global, esto se lleva a cabo impulsando el reciclaje y la innovación [4]. La propuesta de aportar con una economía circular se vuelve cada vez más llamativa para las empresas, debido a que la materia prima se reintegra en los procesos de manufactura disminuyendo costos de producción. Además, continuamente se están implementando normas ambientales que promueven la elaboración de piezas de eco diseño con el fin de disminuir la polución atmosférica.

El reciclaje de las fundas de banano es un campo en desarrollo que requiere de una investigación mucho más a fondo para la elaboración de productos transformadores que aporten con la reinsertión de los materiales que han sido desechados en la primera línea de proceso o su vida útil ha llegado a su fin. Con el objetivo de que se controle el sistema actual lineal que secunda las problemáticas ambientales y sociales y se imponga la economía circular en los procesos industriales.

1.2 Justificación del problema

El Ecuador en el año 2019 alcanzó una cantidad de exportación de 20.2 millones de toneladas de banano, lo cual implicó un aumento del 5% con respecto al año anterior, esto es un indicio de que el consumo y desecho de fundas plásticas en las industrias plásticas está en constante crecimiento [5]. Actualmente, el desecho de las fundas de banano no está completamente regulado, ciertas empresas o productores bananeros queman o entierran las fundas de banano generando un gran impacto ambiental [6]. Además, el numeral 5 del artículo 225 del Código Orgánico del Ambiente establece como obligación el fomento al desarrollo del aprovechamiento y valorización de los residuos y desechos, considerándolos un bien económico con finalidad social, mediante el establecimiento de herramientas y mecanismos de aplicación; de la misma manera, las bolsas plásticas pueden ser recicladas e incluidas dentro del proceso productivo de nuevas fundas o bolsas plásticas tipo camiseta para

el acarreo de productos [7]. Por lo cual se propone solucionar el desperdicio de las fundas de banano a partir del diseño de paneles y vigas estructurales para aplicaciones varias de construcción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un panel y viga estructural a base de polietileno reciclado de fundas de banano que soporten cargas estáticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Generar un diseño tridimensional del panel y viga estructural
- Caracterizar las propiedades mecánicas del polietileno reciclado con el fin de obtener un diseño óptimo.
- Realizar una simulación del panel y viga estructural sometido a carga estática para determinar el comportamiento mecánico.
- Evaluar la viabilidad del proyecto con base a un análisis económico y ambiental.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Ciclo de las fundas de banano

Dentro de la economía del país, el sector bananero forma parte de los principales mercados de exportación en la actualidad, aportando en el 2016 una contribución del más del 21.2% del total de producto ecuatoriano comercializado en el extranjero. Según un informe realizado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, en el país existen cerca de 162.236 hectáreas de cultivos de banano donde un 78% son pequeños productores [1]. En un cultivo tradicional de siembra hexagonal la densidad de plantación por hectáreas es de 1270 matas, donde cada racimo debe ser

cubierto por una funda de polietileno para una óptima maduración [9]. El peso nominal de una funda es de 38 g, con lo que se puede estimar que en el Ecuador se producen anualmente unas 7.83 toneladas de este desecho.

Las fundas de polietileno se encuentran impregnadas con pesticidas como bifentrina o clorpirifos, que son los encargados de controlar las plagas en el producto, como el trip que producen manchas amarillentas o cobrizas en el banano y detienen su desarrollo [10]. Estos químicos poco a poco son más regulados por el Ministerio de Agricultura con el fin de incentivar a utilizar pesticidas orgánicos. Actualmente las fichas técnicas de las fundas mantienen el 2% o menos del pesticida. De manera que, para las fundas post consumo el porcentaje del químico disminuye. Se ha realizado análisis de cromatografía de gases con detector de ionización de llama para la trazabilidad del químico en la funda post consumo donde se determina que después de cumplir el ciclo de vida de la funda aún existe 490 mg/kg lo que representa 0.049%. [11] Para concentraciones mayores de 2000 a 5000 mg/kg se considera de toxicidad baja. No obstante, para humanos la intoxicación por inhalación es de toxicidad leve.

En República Dominicana, en un informe de Junta Agroempresarial Dominicana se encontró que el sector bananero generaba cerca de 400 toneladas de fundas, las cuales eran incineradas a la intemperie, causando contaminación de los alimentos, emisión de gases de efecto invernadero, y gases tóxicos para las personas que pueden ocasionar daños a la salud humana. Por esta razón, se elaboró un proyecto para regular el manejo de estos residuos plásticos y reciclarlos con el fin de reducir la contaminación [12]. Este ejemplo describe claramente un cambio de economía lineal a una economía circular.

Del mismo modo, en este proyecto se pretende cambiar el modelo actual de economía lineal que existe en el mercado del embolsado de banano, el cual consiste en tomar, usar y tirar productos con un gran material una vez cumplan su función. [13] Este modelo no sostenible ha provocado el aumento de contaminación y uso desmedido de los recursos.

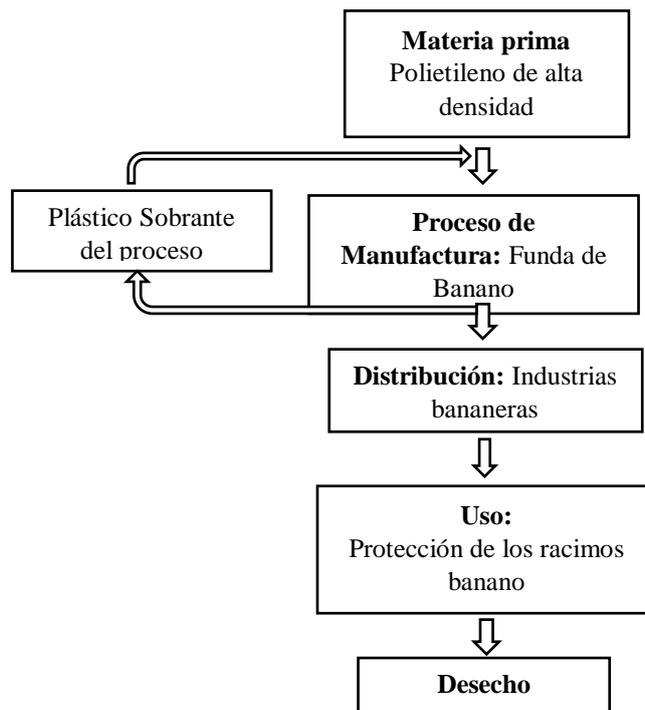


Figura 1.1 Ciclo lineal de las fundas de banano en la actualidad.

Un ciclo positivo es el modelo de economía circular, que consiste en optimizar el rendimiento de los recursos, gestionando un stock finito y equilibrar el flujo de recursos, una de las características claves es el mantener el valor del producto extendiendo su vida útil. [13] El reciclaje de estos productos poliméricos hace que su ciclo de vida sea mayor, preservando el valor de este material en la economía en forma de otro servicio o artículo. En la Figura 1.2, se observa la propuesta que se pretende en el proyecto, reutilizando las fundas post consumo de banano en vigas y paneles para techos de viviendas.

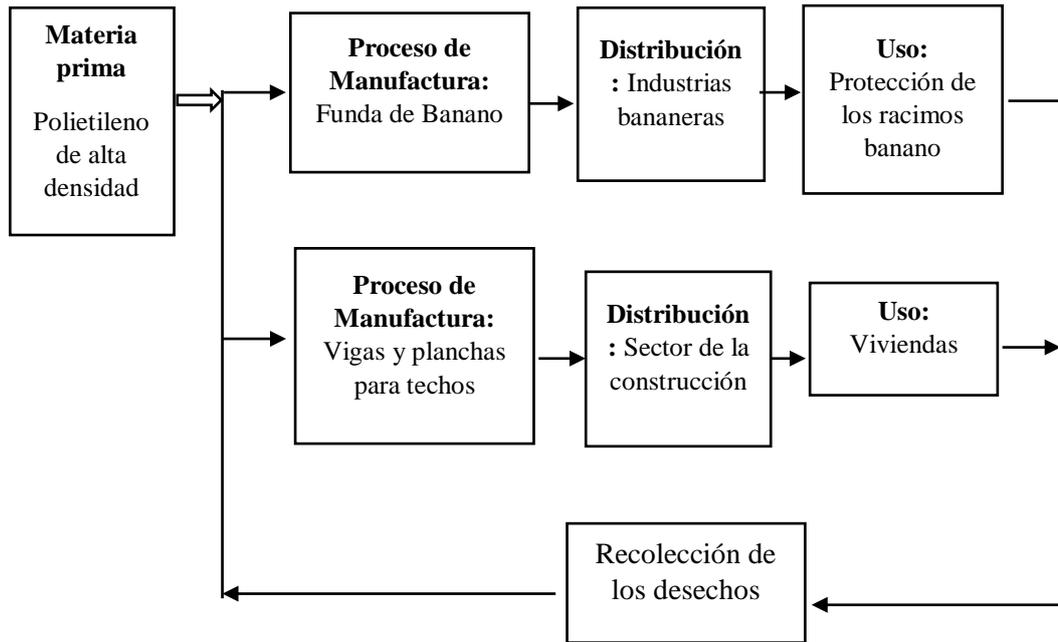


Figura 1.2 Nuevo ciclo de vida de las fundas de banano

1.4.2 Proceso de extrusión

Para la elaboración de estos perfiles y techos el material reciclado debe pasar por un proceso de extrusión. El proceso comienza con la alimentación del material en la tolva, generalmente en gránulos, luego dentro del equipo el material se funde debido al aumento de temperatura. En la zona de compresión, los gránulos del polímero se comprimen, logrando una compactación homogénea debido a los esfuerzos de fricción y cortantes a los cuales está sometido el material. Finalmente, el material es extruido a través del dado, formando perfiles o planchas dependiendo de la aplicación. [14]

1.4.3 Ensayos

1.4.3.1 Prueba de tracción en plásticos

La prueba de tracción se determina a partir del equipo de prueba universal, dependiendo el polímero a analizar se sigue la norma para Propiedades de Tensión de Materiales plásticos ASTM D638. El procedimiento involucra elaborar una probeta que será introducida en la máquina con el fin de determinar propiedades mecánicas, tales como:

resistencia a la tracción, resistencia última, esfuerzo de fluencia, módulo de Young, relación de Poisson, tenacidad a la tensión, entre otros. [15]

1.4.3.2 Prueba de flexión en plásticos

La prueba de flexión se determina a partir del equipo de prueba universal, dependiendo el polímero a analizar se sigue la norma para las Propiedades de flexión de plásticos reforzados ASTM D790. El procedimiento involucra elaborar una probeta que será introducida en la máquina con el fin de determinar las propiedades mecánicas como: modulo secante, módulo de cuerda, resistencia a la flexión, y estrés de flexión en la rotura.

1.4.3.3 Prueba de Impacto Izod

Con el ensayo de impacto Izod se determina la energía absorbida a partir del impacto del golpe de un martillo hacia la probeta de muestra con el fin de obtener la resistencia máxima de rotura. El ensayo se realiza a partir de la norma ASTM D256 para determinar la Resistencia de Plásticos al Impacto del péndulo de Izod en donde se deja caer de reposo un péndulo que golpea la probeta, se repite el ensayo con mayor energía hasta que se rompa. [16]

1.4.3.4 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico es un ensayo de caracterización de material en el cual se mide la masa de una muestra sometida a condiciones de atmósfera y temperatura definida en un tiempo establecido, donde se observa la pérdida de masa por componentes volátiles determinando la degradación de la muestra. Esta prueba sigue la norma ASTM D3850 para Degradación térmica rápida de materiales aislantes térmicos eléctricos solidos por método termogravimétrico [17].

1.4.4 Normativa estructural para vigas y techos

En el marco de normativas ecuatorianas para la construcción la NEC se encarga de establecer los parámetros que se deben considerar dentro de

una estructura para un correcto diseño y dimensionamiento. En el código NEC-SG-CE aborda las cargas que debe soportar una vivienda:

- **Carga muertas o permanentes:** Son las cargas generadas por el mismo peso de los elementos de las estructuras como pisos, paredes, cubiertas, etc.
- **Cargas vivas:** También se las conoce como sobrecarga de uso, ya que estas dependen de la aplicación a la cual está destinada la construcción. La sobrecarga mínima de cubierta de $0.7 \frac{kN}{m^2}$ de carga uniforme (L_r).

Las cargas debido a factores naturales como viento y granizo se encuentran en el grupo de cargas variables, estas no serán consideradas para el proyecto ya que la estructura que se va a diseñar es menor a 10 metros y a una altura sobre el nivel del mar.

- **Cargas combinadas:** Cualquier estructura deberá ser diseñada de tal forma que su resistencia sea mayor o igual a todas las combinaciones expuestas en la norma, donde se consideran los efectos más desfavorables como vientos o sismos. [18]

Para el proyecto solo se considerarán las combinaciones expuestas en la Tabla 1:

Tabla 1.1 Ecuaciones de combinaciones de carga según norma NEC-CG-SE

Combinación 1	$U = 1.4 D$
Combinación 2	$U = 1.2D + 1.6 Lr$
Símbolos	
D: Carga Permanente	
Lr: Sobrecarga de cubierta	

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para el diseño de las vigas y paneles se siguió la metodología de pensamiento de diseño, de este modo se encontraron los requerimientos de diseño y los factores de influencia, realizando la comparación de cada uno para determinar la importancia. Posteriormente, se seleccionó la mejor alternativa de diseño con base a los atributos.

Para el análisis experimental, en la primera parte se elaboraron las probetas del material reciclado en el Laboratorio de Procesamiento de Plástico en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de ESPOL. Se definieron 3 categorías importantes a analizar: muestras de polietileno de alta densidad reciclado rHDPE, muestras de rHDPE + fibra orgánica y muestras de rHDPE + fibra orgánica + compatibilizante. A continuación, se realizó la caracterización mecánica del material mediante ensayos mecánicos y reológicos.

Una vez obtenidos los resultados de las propiedades del material, se realizó el análisis de carga de la estructura con la finalidad de dimensionar las vigas, las uniones empernadas y los paneles del techo. Finalmente se realizó la simulación de la estructura.

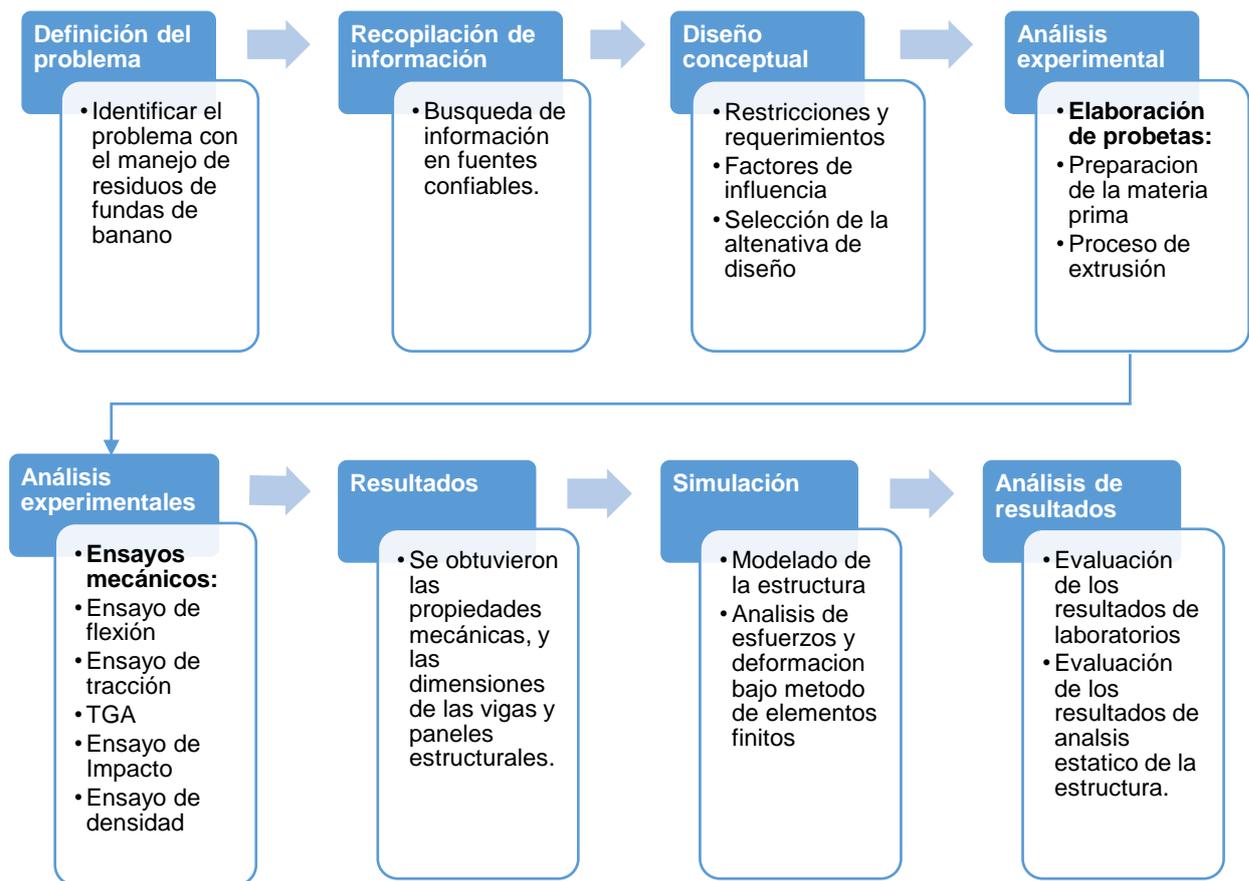


Figura 2.1 Diagrama de metodología de diseño

2.1 Diseño conceptual

2.1.1 Requerimientos y restricciones de diseño

Con base a los objetivos previamente establecidos del proyecto se requiere que el material de diseño sea de polietileno reciclado de las fundas de banano, con tratamiento adecuado para que estos perfiles sean elaborados por medio del proceso de extrusión.

Para asegurar la seguridad de la estructura, se deben cumplir con los valores de cargas establecidas por el código NEC-SE-CG, en el cual se tratan las cargas debido al propio peso, las cargas variables y sus combinaciones.

Tabla 2.1 Requerimientos de diseño

Requerimiento	Objetivos de diseño
Materia prima	Producto elaborado a base de polietileno de alta densidad reciclado de fundas de banano
Proceso de manufactura	Elaboración de vigas y paneles estructurales mediante un proceso de extrusión.
Carga	Estructura que soporte al menos una carga viva de 71 kg/m ² para viviendas residenciales.
Normativa	Cumplir con las NEC-SE-CG para cargas no sísmicas

2.1.2 Factores de influencia

Los factores de diseño más importantes que influyen en la elaboración del modelo de la estructura para el proyecto son:

Tabla 2.2 Factores de influencia del proyecto

Factores	Explicación
Procesabilidad	La facilidad de procesar el material dependerá de los parámetros de extrusión y el consumo energético que se necesite para extruir.
Peso	Se requiere optimizar la cantidad de material con el fin de disminuir costos de producción
Costo de producción	Para el costo de producción se analizará el costo de la materia prima a utilizar dependiendo del refuerzo a utilizar
Resistencia	Se requiere que el material reforzado soporte las cargas vivas y muertas de una residencia urbana.
Humedad	La cantidad de humedad en la materia orgánica de refuerzo se verá reflejada en la calidad del producto final y la alteración de sus propiedades

Se analizó la ponderación de los factores de influencia más importantes para el criterio de selección.

Tabla 2.3. Ponderación de criterios de selección

	Procesabilidad	Costo de producción	Humedad	Resistencia	Total (fila)	Ponderación
Procesabilidad	1	0	0	0	1	0.10
Costo de producción	1	1	0	0	2	0.20
Humedad	1	1	1	0	3	0.30
Resistencia	1	1	1	1	4	0.40

2.1.3 Alternativas de diseño

Para las alternativas de diseño se analizó el material orgánico que se usaría para el refuerzo del polietileno de alta densidad, tomando en cuenta que el refuerzo de fibra afecta la dificultad de procesar la mezcla.

a) Alternativa 1: Cascarilla de arroz

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), al menos el 20% de la producción total de arroz se refiere al desperdicio de cascarilla de arroz, aproximadamente 103,2 millones de toneladas de cascarilla de arroz al año se utilizan actualmente en productos agrícolas, comida para granjas de animales y, en determinadas partes, se queman como fuente de combustible. [19]

La cascarilla de arroz mantiene una temperatura de combustión por encima de 800°C, lo que facilita el **proceso** de extrusión del material en relación con la temperatura controlada. La mayor parte de la composición de la cascarilla se identifica como material volátil, además contiene al menos el 15% de **humedad** dentro del material [20]. El **precio** del producto es variable y económico, oscila entre \$0.33 el kilogramo. En cuanto a la **resistencia** que aporta el componente orgánico se relaciona con el porcentaje de celulosa y lignina que hay en

el elemento, debido a que mientras un material es más lignocelulósico sus propiedades físicas como la dureza aumentan. La cascarilla de arroz posee entre 9-20% de lignina y 28-36 % de celulosa. [21]

b) Alternativa 2: Raquis de banano

El raquis de banano se deriva del desperdicio agrícola del cultivo de las bananeras. Mantiene alto contenido principalmente de sodio, fósforo y magnesio. Posee mucha **humedad** aproximadamente el 93% del contenido es agua por lo que actualmente se lo usa para producir lixiviados orgánicos que componen parte del proceso de fertilización del cultivo, además gran contenido de humedad afecta directamente a la **procesabilidad** del material polimérico reforzado. El contenido de lignina y celulosa representa el 3.71% y 0.82% respectivamente, lo que corresponde a la **resistencia**. Este producto se puede obtener de forma gratuita como desecho de la cosecha, sin embargo, para poder utilizar el raquis de banano como refuerzo es necesario reducir el tamaño de grano significativamente y secar el material lo que representa adicionar procesos de operación en la elaboración del material compuesto lo que genera alto **costo** del producto final. [22]

c) Alternativa 3: Afrecho de cebada

El afrecho de cebada (AC) o bagazo de cebada es un subproducto del proceso de fabricación de cerveza, considerado como un residuo agrícola. La mayor producción de cebada se proviene de Europa con al menos 90 millones de toneladas al año [23]. En Ecuador se producen solo 24000 toneladas anuales y el aproximadamente el 20% de la producción corresponde al residuo agrícola lignocelulósico. Está compuesto por Fósforo, Calcio, Magnesio y Potasio, se lo considera un material altamente **húmedo** con 78% de humedad dentro de su composición. En la actualidad es comercializado para el alimento del ganado con un **costo** de \$ 0.41 el kilogramo. Su temperatura de combustión es de 200°C por lo que la **procesabilidad** del proceso teniendo que controlar que este no se quemé. El porcentaje de lignina y

celulosa encontrado es de 22% y 39% respectivamente lo que representa alta **resistencia**. [24]

Una vez establecidas las alternativas de diseño con base al material de refuerzo, se realizó la comparación de cada una con los factores de influencia, para seleccionar la mejor alternativa determinando la calificación de la siguiente manera:

Tabla 2.4 Calificación para matriz de decisión

Calificación	Descripción
1	Malo
2	Regular
3	Bueno
4	Muy bueno
5	Malo

Tabla 2.5 Matriz de decisión para alternativas de diseño

Atributos	Ponderación	Alternativas de solución					
		Alternativa 1 (CA)		Alternativa 2 (RB)		Alternativa 3 (AC)	
Procesabilidad	0.10	5	0.5	4	0.4	3	0.3
Costo de producción	0.20	3	0.6	2	0.4	5	1.0
Humedad	0.30	5	1.5	3	0.9	4	1.2
Resistencia	0.40	4	1.6	2	1.2	5	2.0
Total		4.2		2.9		4.5	

Dado a que se busca determinar un material orgánico con mayor compatibilidad que ofrezca gran resistencia al material y que sea de fácil procesabilidad con el fin de disminuir los costos de producción, se definió

como la mejor alternativa de diseño para el refuerzo al afrecho de cebada.

2.1.4 Proceso experimental

La materia prima que se utilizó fueron 75 kg de pelletizado de 100% polietileno de alta densidad reciclado de fundas de banano. Una vez seleccionada la mejor alternativa para el refuerzo orgánico se determinaron las concentraciones ideales, para la composición 2 se experimentó con concentraciones de 10% y 5% de afrecho de cebada, siendo la última la de mejor resultado de homogeneidad con la matriz polimérica, como resultado se obtuvo la composición de 95% rHDPE + 5% AC. Para la composición 3 se agregó el 5% del aditivo, ya que a esta composición se puede lograr un mejor enlace entre los componentes, disminuyendo la matriz polimérica a 90%.

2.1.5 Preparación de la materia

Antes de realizar la mezcla, se procedió a llevar el polietileno reciclado y el afrecho de cebada a la mufla a una temperatura de 41°C durante 24 horas para retirar toda la humedad del material y poder obtener un mejor producto del proceso de extrusión. Se prepararon dos mezclas para la composición 1 y la composición 2. Con un total de 10 kilogramos por composición, donde se determinaron las siguientes muestras que posteriormente se llevaron a la extrusora:

Tabla 2.6 Pesos de composiciones

Composición	Masa de rHDPE [g]	Masa Afrecho de cebada [g]	Masa Aditivo compatibilizante "Lotader" [g]
1	9.5	0.5	-----
2	9	0.5	0.5

2.1.6 Proceso de extrusión

El perfil de temperatura se estableció con base al punto de degradación de afrecho correspondiente a 200°C y el punto de fusión del polietileno reciclado de aproximadamente 130°C. A partir de los hilos conseguidos de la extrusora se trituraron las 2 composiciones en el molino para la obtención de reducción de área tamaño pellet. Finalmente, las muestras se dejaron en la estufa a 40°C durante 24h para disminuir la humedad obtenida en los procesos anteriores.

2.1.7 Proceso de obtención de las Probetas

Para la realización de probetas se definieron 10 muestras por ensayo (flexión, tracción e impacto) para cada grupo. Para realizar las probetas se hizo uso de la prensa hidráulica y los moldes designados a los ensayos requeridos siguiendo la norma ASTM D4703 para moldear por Compresión Materiales termoplásticos en probetas, la cual describe llevar la prensa a una temperatura de 180°C con una presión de 1200 PSI durante 10 min. Posteriormente se lleva la probeta a un enfriamiento en agua por 3 min.

2.1.8 Ensayos mecánicos

2.1.8.1 Prueba de tracción

Para esta prueba se usaron 6 probetas de 3.5 mm espesor, 6 mm de ancho y 63 mm de longitud calibrada. Se realizó una revisión de las probetas de modo que cumplan con las dimensiones estandarizadas. Luego se realizaron las pruebas, según la norma ASTM D638 14, en la máquina de ensayos universal a una velocidad de 50 mm/min obteniendo la curva de esfuerzo deformación para cada probeta.

2.1.8.2 Prueba de flexión

En el mismo equipo de ensayos universales se realizó la prueba de flexión según la norma ASTM D790 17 a una velocidad de 1mm/min, de 6 probetas. El principal interés de esta prueba es encontrar el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo y la deformación máximos.

2.1.8.3 Prueba de impacto Izod

En este ensayo, la máquina de impacto Izod a una velocidad de 3.5 m/s se ensayó 6 probetas para cada tipo de combinación. Se revisó las probetas para verificar que cumplan con las dimensiones establecidas según la norma ISO 180/U para Determinación de la resistencia al impacto Izod, con una energía del péndulo de 11 Joule y una energía de fricción de 0.049 Joule.

2.1.9 Ensayos reológicos

2.1.9.1 Prueba de reología

Se realizaron probetas en forma de disco de 20 mm de diámetro a la temperatura de moldeo de las placas antes realizadas en la prensa hidráulica igual a 180°C. Se hizo uso del reómetro Kinexus Pro donde se reguló una presión de ensayo de 3 y 5 bar. Se realizó un barrido en cero y se ajustó un rango de operación de velocidad de corte de 0.1 a 100 s⁻¹ para polímeros.

2.1.9.2 Prueba de calorimetría diferencia de barrido (DSC)

Para el ensayo DSC se abrió la válvula de nitrógeno regulando la presión entre 20 – 25 psi y la temperatura de trabajo en -85°C. Se agregó la muestra con un peso de 8mg. Se colocó el material a analizar en el portamuestra sellado herméticamente con una prensa. Finalmente se situó la muestra en el equipo y se describió la metodología del ensayo con una rampa de 10 °C/min.

2.1.9.3 Prueba de TGA

Se realizó el ensayo para una muestra de 90% rHDPE +10% AC (muestra D) donde se usaron 10.9 mg, y una muestra de 95% rHDPE +5% AC (muestra B) con un peso de 12.6 mg. Se usó el método isotérmico con la atmósfera controlada con gas nitrógeno y una velocidad de calentamiento de 100°C/min.

2.1.9.4 Prueba de índice de fluidez (MFI)

Para el ensayo de índice de fluidez se usó el equipo Dynisco LMFI serie 5000 con los parámetros de análisis de polietileno de alta densidad flexible que corresponden a un peso de carga de pistón de 2.16 kg y parámetros de temperatura de trabajo de 190°C, tiempo de fusión de 200s con 3 cortes de duración de 70s.

2.2 Diseño de forma

2.2.1 Diseño de la estructura

El diseño final que se propuso para el proyecto fue el modelado de vigas y paneles para una vivienda de bajo costo. Para el área superficial de la casa, se tomó como referencia a la dimensión mínima establecida en el Programa “Casa para todos”, donde se detalla que el área mínima debe ser de 49 m² (7m x7 m). La armadura para el techo tiene el modelo de Pendolón, y se caracteriza por una estructura triangular de dos pares y una viga central llamada pendolón para sostener de los pares, además para evitar la deflexión se coloca jabalcones de descarga en el medio que sirven de apoyo para las pendientes. En la Figura 2.2 se observa el diseño de forma de la estructura del proyecto.



Figura 2.2 Estructura con armadura modelo de pendolón para vivienda

2.2.2 Diseño de forma de las vigas

El perfil de viga para la estructura es de forma cuadrada con canales simétricos en cada lado con la finalidad de brindar mayor resistencia, y poder colocar los paneles de los techos a través de los rieles. Las dimensiones de la viga dependerán de la carga combinada a la cual estará sometida la vivienda.

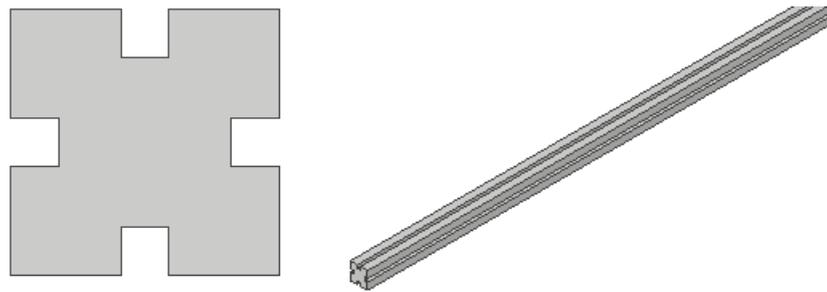


Figura 2.3 Perfil cuadrado con canales para las vigas de polietileno

2.2.3 Diseño de forma de los paneles

Para los paneles del techo se tiene un modelo de planchas de 3.7 m de largo por 50 mm de ancho, con tres salientes para poder encajar en las vigas y deslizarse a través de hechas durante la instalación.

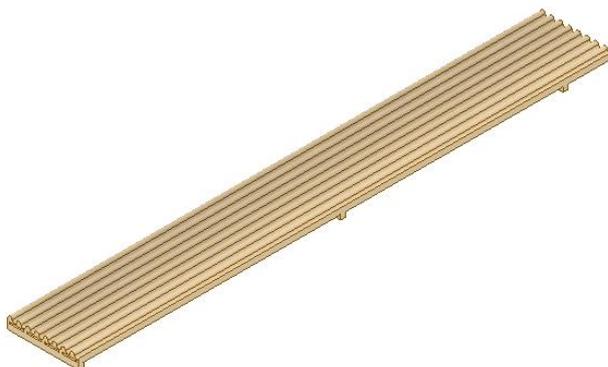


Figura 2.4 Modelos de los paneles para los techos

2.3 Análisis de esfuerzo de flexión en vigas

2.3.1 Cálculo de Inercia

Para determinar la inercia del perfil cuadrado con canales se calcula la inercia de un cuadrado y se le resta la inercia de los canales. Para esto utilizo el teorema de Steiner o de ejes paralelos la cual establece que:

$$I_x = I_{x'} + Ad^2 \quad (2.1)$$

Siendo

I_x : Inercia del cuerpo alrededor del eje x

$I_{x'}$: Inercia del cuerpo alrededor de su propio eje

A : Área del cuerpo

d : Distancia del cuerpo al centroide.

La inercia del cuadrado es:

$$I = \frac{a^4}{12} \quad (2.2)$$

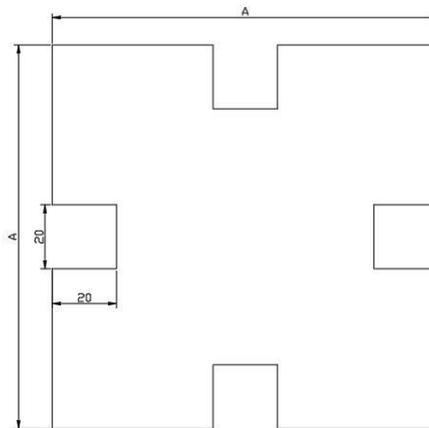


Figura 2.5 Perfil cuadrado con canales

A esta se le resta las inercias de los canales obteniendo la Inercia total del perfil de la viga:

$$I_{total} = I_{cuadrado} - I_{canales} \quad (2.3)$$

$$I_{canales} = 4 * \frac{0.02^4}{12} + 2 * 0.02^2 * \left(\frac{a}{2} - 0.01\right)^2$$

$$I_{total} = \frac{a^4}{12} - \left[8 * 10^{-4} \left(\frac{a}{2} - 0.01\right)^2 + 5.33 * 10^{-8} \right] \quad (2.4)$$

2.3.2 Cargas en la estructura

Las cargas superficiales a la que se someten la estructura según la norma NEC son:

- Carga viva de cubierta de $L_r = 0.7 \frac{kN}{m^2} = 71.39 \frac{kgf}{m^2}$
- Cargas debido al peso de la estructura de $P = 7.5 \frac{kgf}{m^2}$ y cargas por cableado eléctrico $el = 5 \frac{kgf}{m^2}$, por lo que se tiene un total de carga muerta de:

$$D = P + el = 13 \frac{kgf}{m^2} = 0.127 \frac{kN}{m^2}$$

Para determinar la carga distribuida total que se produce en la estructura como se observa en la figura 2.6, se selecciona la mayor combinación de carga de la Tabla 1.1:

$$U = 1.2D + 1.6Lr \quad (2.5)$$

$$U = 1.27 \frac{kN}{m^2}$$

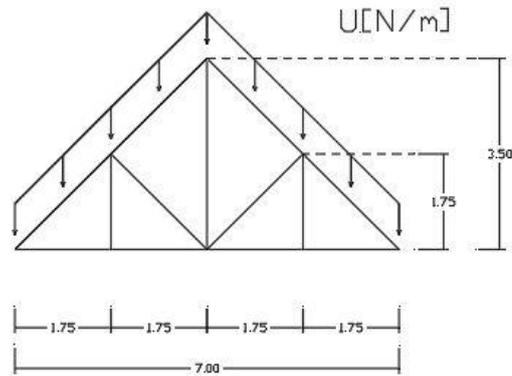


Figura 2.6 Distribución de carga y dimensiones de la estructura

2.3.3 Área tributaria

En la Figura 2.7 se observa la distribución de área de la estructura propuesta, la cual posee tres armaduras en pendolón formando tres secciones de forma horizontal y cada viga forma secciones verticales, dando lugar al área tributaria. Para convertir esta carga distribuida en cargas puntuales se multiplica por el área, de este modo el área mayor es donde se producen los mayores esfuerzos de flexión en la viga.

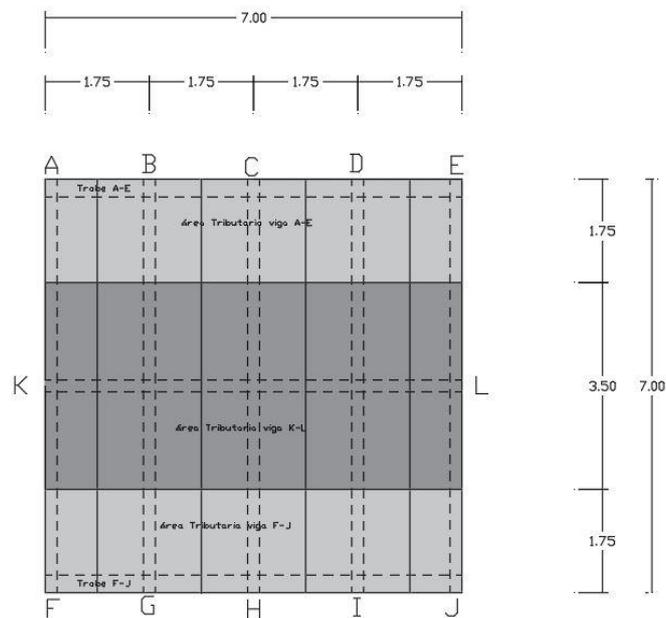


Figura 2.7 Área tributaria en cada elemento de toda la estructura

Como la mayor carga se produce en el centro de la estructura, se analizará la sección KL, y se encuentran las cargas puntuales sobre cada uno de los apoyos de las vigas como se observa en la Figura 2.8 para determinar las fuerzas internas en cada uno de los elementos.

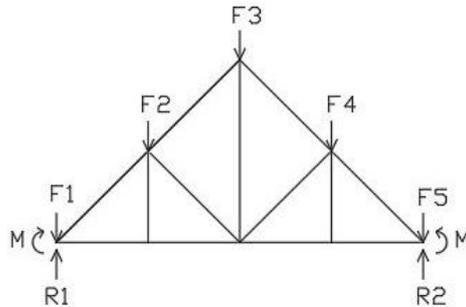


Figura 2.8 Fuerzas puntuales en la estructura.

2.3.4 Esfuerzo de flexión en vigas

La viga de apoyo de la estructura que se encuentra en la parte inferior es la que soporta mayores cargas, las cuales producen deformaciones debido a los esfuerzos de flexión. Se pueden determinar mediante la ecuación 2.5 donde c es la distancia de la fibra hasta el eje neutro, a lo largo del elemento la fuerza cortante y momento flector varía, por lo que solo se analizó el punto crítico donde se producen el momento máximo M .

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.5)$$

2.3.5 Criterio de falla

La estructura al estar sometida a cargas estáticas, el criterio de falla que se considera es el esfuerzo de fluencia o límite de tensión del material. Para dimensionar la viga se considera σ_w el esfuerzo de trabajo como el esfuerzo

de fluencia S_y sobre el factor de seguridad, el cual se va a considerar un valor de 2, como se observa en la siguiente expresión:

$$\sigma_w = \frac{S_y}{n} = \frac{S_y}{2} \quad (2.6)$$

2.4 Simulación

Para la simulación se utilizó el software Autodesk Inventor Professional 2020 con el objetivo de determinar los esfuerzos y deformaciones de la estructura mediante el método de elementos finitos. El primer paso fue establecer las propiedades del material en el programa, como densidad, resistencia a la tracción, relación de Poisson, etc. Luego, se realizó la geometría de la estructura considerando el perfil de viga ya diseñado como se observa en la Figura 2.9, y aplicar las cargas puntuales en los puntos de uniones de la viga, así como las restricciones en los apoyos. Finalmente se realiza el mallado, e iniciar la simulación.

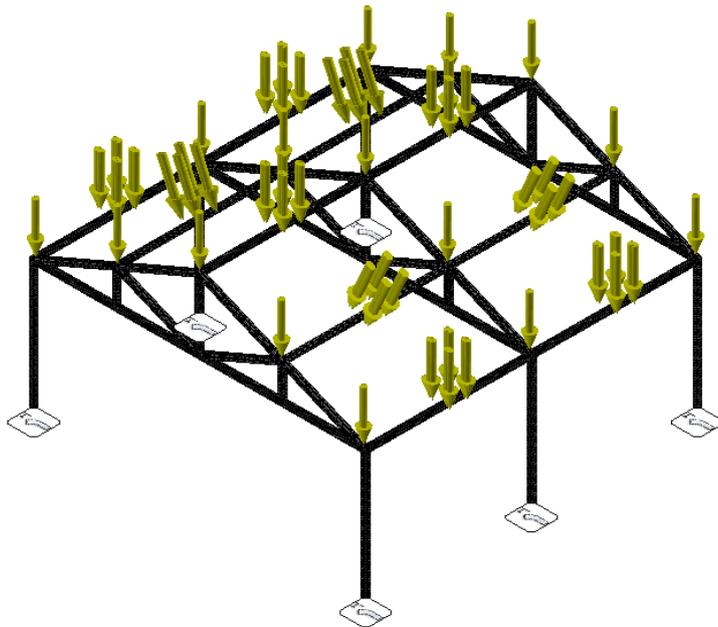


Figura 2.9 Modelo de la estructura en Autodesk Inventor

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Ensayos mecánicos

3.1.1 Ensayo de tensión

La tabla 3.1 muestra los valores promedios de las propiedades obtenidas durante el ensayo tensión para composición con la finalidad de análisis las diferencias entre cada uno. Para la primera composición que es de 100% rHDPE, una de las principales características que se puede observar en la curva Esfuerzo vs Deformación es la capacidad de poder deformarse plásticamente sin romperse en un promedio de 211.6%, es decir que es un material con una alta ductilidad.

Tabla 3.1 Resultados del ensayo de tensión de los compuestos.

Muestra	Esfuerzo Máximo σ_{max} [Mpa]	Deformación Máxima δ_{max} [%]	Módulo de Young E [Mpa]	Esfuerzo de Fluencia S_y [MPa]
A	17.86±1.05	6.81±0.69	822.87±26.09	8.92±0.52
B	18.36±0.68	6.77±0.10	860.30±39.6	9.18±0.34
C	16.84±0.85	7.09±0.79	758.20±22.3	8.41±0.42

Para la primera composición que es de 100% rHDPE, una de las principales características que se puede observar en la curva Esfuerzo vs Deformación es la capacidad de poder deformarse plásticamente sin romperse en un promedio de 211.6%, es decir que es un material con una alta ductilidad como se observa en el Figura 3.1.

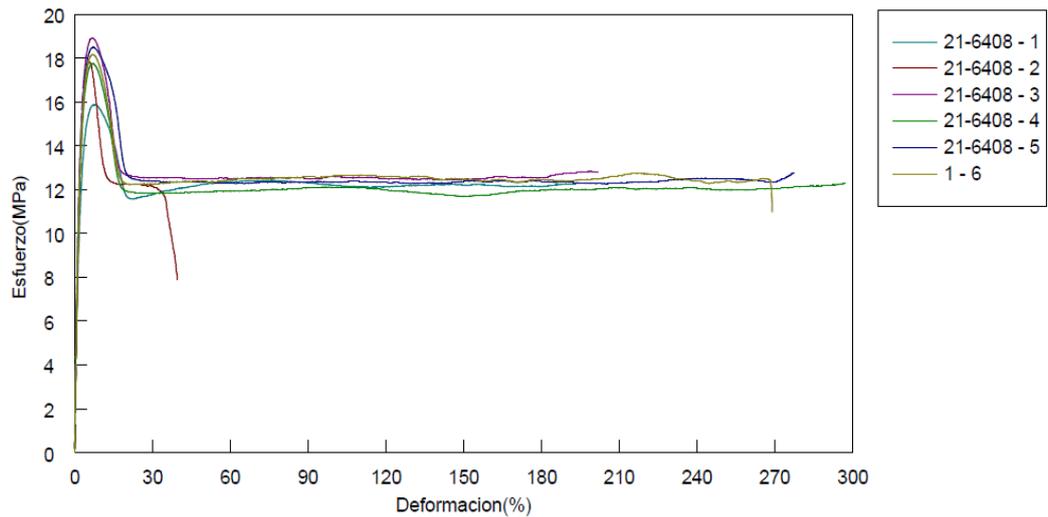


Figura 3.1 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de tensión de la muestra A

En segunda instancia, se tiene el Figura 3.2 de la gráfica Esfuerzo-deformación para las probetas de 95% rHDPE + 5% AC las cuales poseen el mayor módulo de Young entre las muestras con un valor de 860 MPa, aunque disminuye su ductilidad y tenacidad, esto deja en evidencia que el afrecho de cebada aporta a la resistencia a la tensión durante la zona elástica del material.

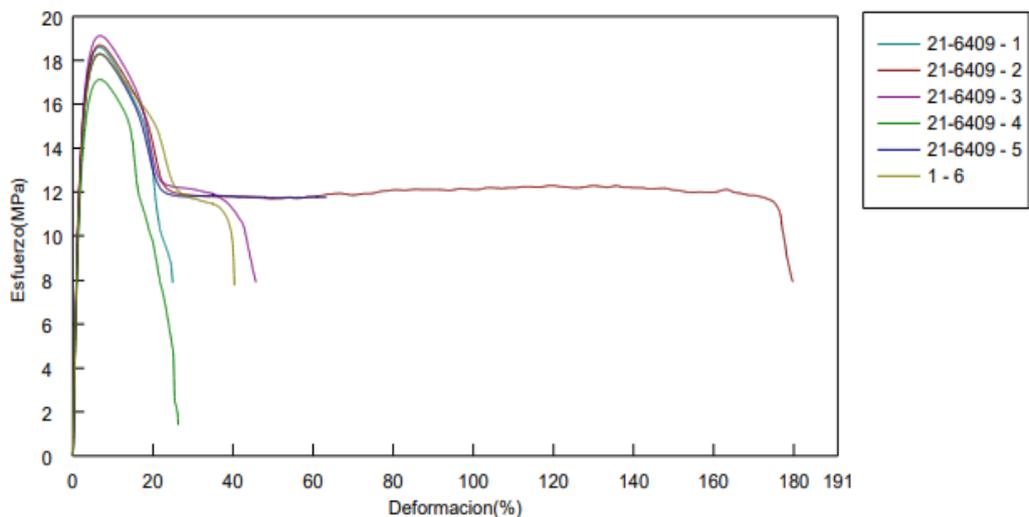


Figura 3.2 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de tensión de la muestra B.

En las curvas esfuerzo-deformación que se obtuvieron de la composición 90% rHDPE+ 5% AC+ 5% Lotader, se determinó una resistencia a la tensión de 16.84 MPa, menor que los otros compuestos. Esto se debe a que, a pesar de obtener una mezcla más homogénea durante el proceso de extrusión con el aditivo, no generó cambios significativos en las propiedades mecánicas.

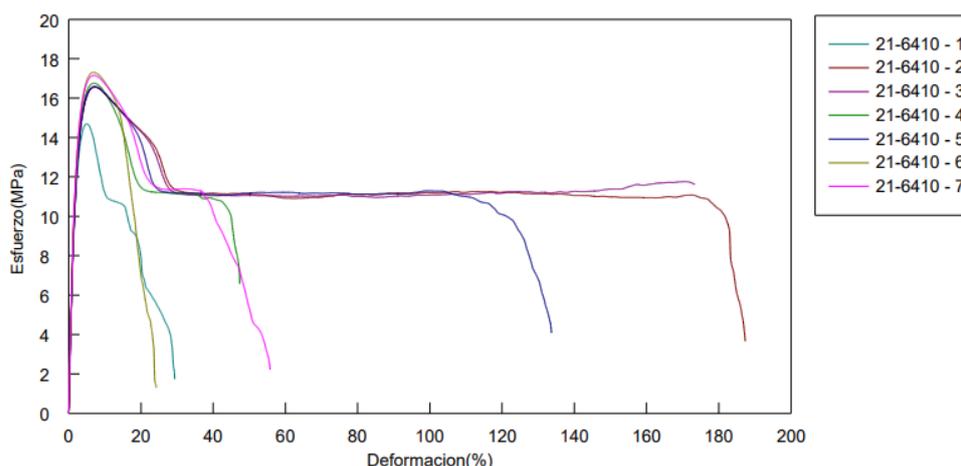


Figura 3.3 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de tensión de la muestra C

3.1.2 Ensayo flexión

La tabla 3.2 muestra el promedio de los resultados de las principales propiedades obtenidas para cada muestra, para realizar el análisis comparativo entre ellas.

Tabla 3.2 Resultados del ensayo de flexión de los compuestos.

Muestra	Esfuerzo Máximo σ_{max} [Mpa]	Deformación Máxima δ_{max} [%]	Módulo de Young E [Mpa]	Esfuerzo de Fluencia S_y [MPa]
A	24.45 ± 3.95	10.08 ± 0.13	341.28±66.51	11.09±1.69
B	20.79 ± 2.90	10.36 ± 0.53	279.96±54.11	9.7±1.62
C	20.04±0.48	9.82±0.06	276.85±5.23	9.25±0.23

En el Figura 3.4 se muestran las curvas de esfuerzo deformación para las probetas ensayadas por flexión, en un análisis comparativo se puede determinar que bajo cargas de flexión las mezclas poseen un esfuerzo máximo mayor que bajo cargas axiales y una mayor resiliencia para poder recuperarse en la zona elástica. in embargo, el módulo de elasticidad es casi 3 veces mayor en tensión, en otros términos, baja cargas axiales se tiene una mayor rigidez en la zona elástica.

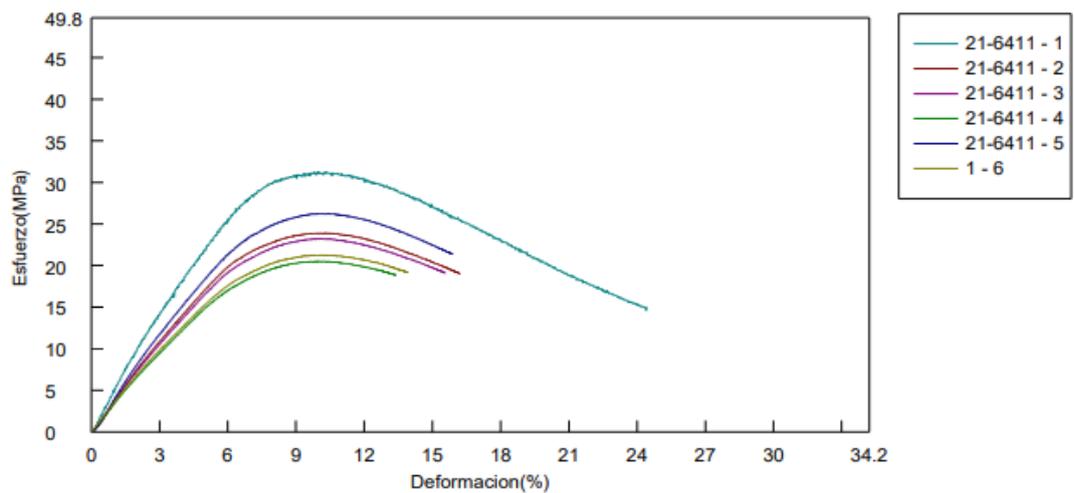


Figura 3.4 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra A

La primera muestra que fue la de 100% rHDPE posee un esfuerzo máximo de 24.45 MPa y un módulo de Young de 341 MPa que es superior a las otras dos muestras, lo que hace a este compuesto sea el más resistente a la flexión. Posteriormente, en el gráfico 3-4 se muestra el comportamiento de la composición que contiene 5% de afrecho de cebada, la cual fue la que se consideró para el diseño de las vigas, ya que a pesar de tener un menor esfuerzo de fluencia (9.7MPa) en relación con el 100% del polietileno de alta reciclado, la diferencia entre los dos no es significativa (12%). De este modo, se puede aprovechar el afrecho de cebada para poder mejorar las propiedades en tracción y mantenerlas en flexión.

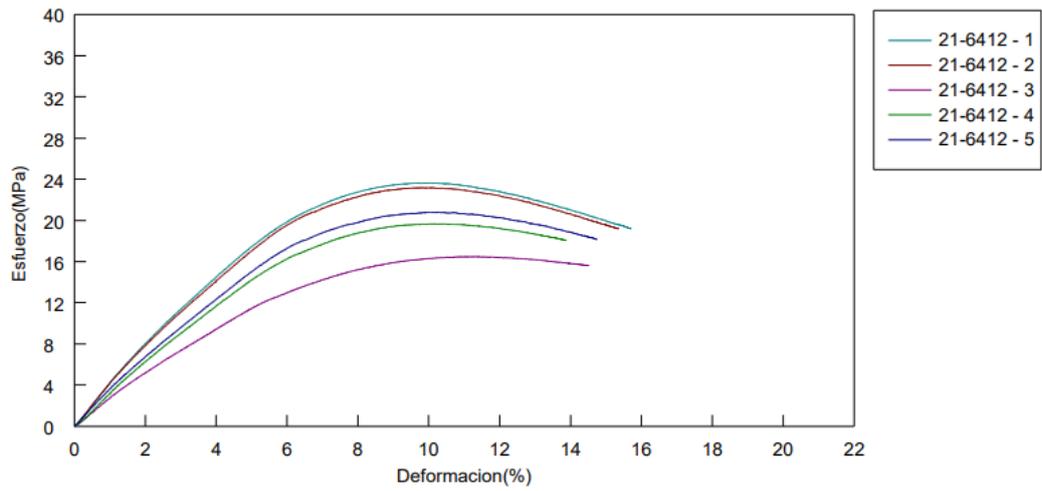


Figura 3.5 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra B

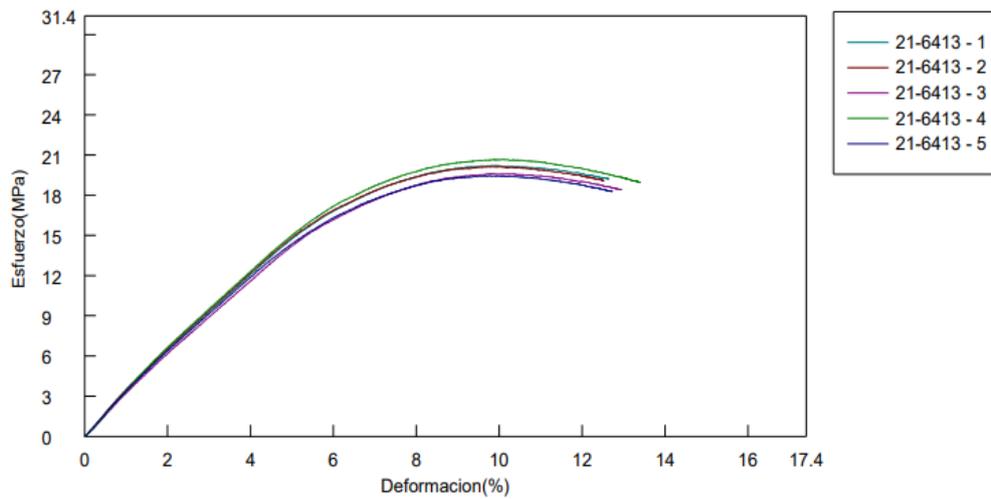


Figura 3.6 Curva esfuerzo vs deformación del ensayo de flexión de la muestra C

3.1.3 Ensayo Impacto

En cuanto al ensayo de impacto se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Resultados del ensayo de impacto IZOD

Muestra	Longitud mm	Ancho de la muestra	Espesor	Resistencia Impacto (J)	Resistencia al impacto (kJ/m ²)
A	62	13	3.08	2.42 ±0.55	59.52±13.77
C	62.9	13.11	2.86	1.75±0.31	45.61±8.25

A partir de los resultados se puede determinar que la adición del aditivo compatibilizante LOTADER no representa cambios positivos para la resistencia al impacto, por lo que la muestra A que se refiere a 100% HDPE absorbe mayor energía de impacto de 59.52 kJ/m² con respecto a la muestra C con 45.61 kJ/ m². Es decir que el material puro es más resistente al impacto.

3.2 Calorimetría diferencia de barrido DSC

A partir de las muestras de DSC de cada material se determinó la temperatura de fusión, el cual fue evaluado al realizar el perfil de temperatura en la extrusión posterior del material.

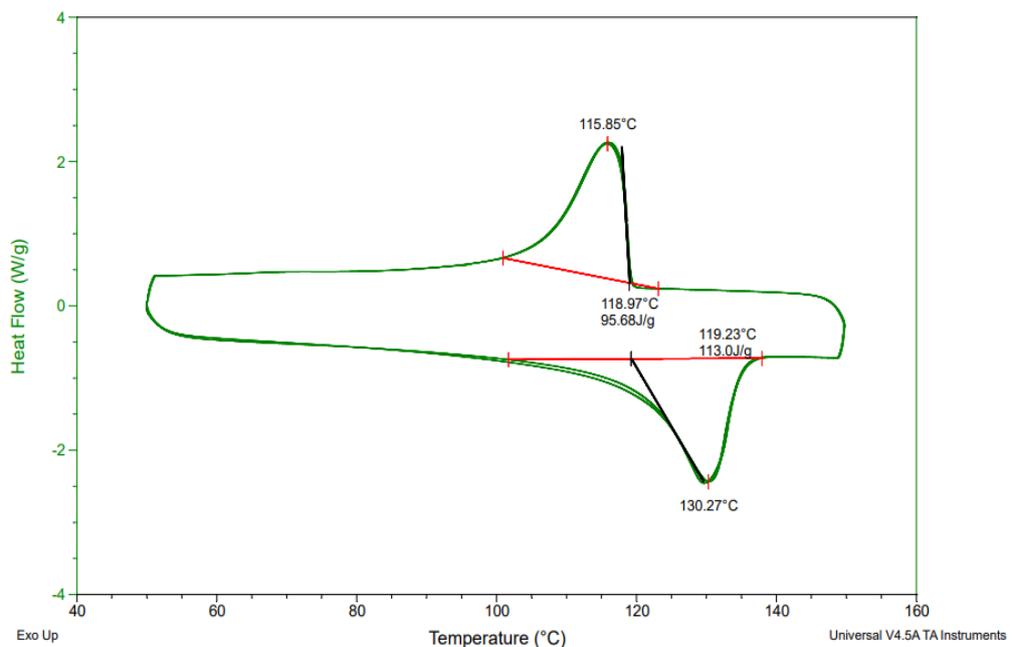


Figura 3.7 Gráfica de la muestra A

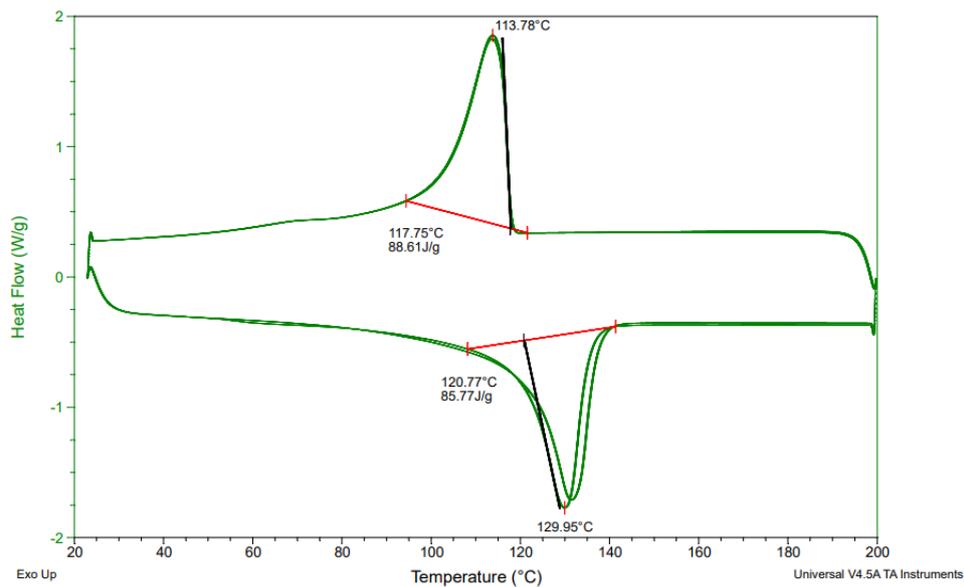


Figura 3.8 Gráfica de la muestra B

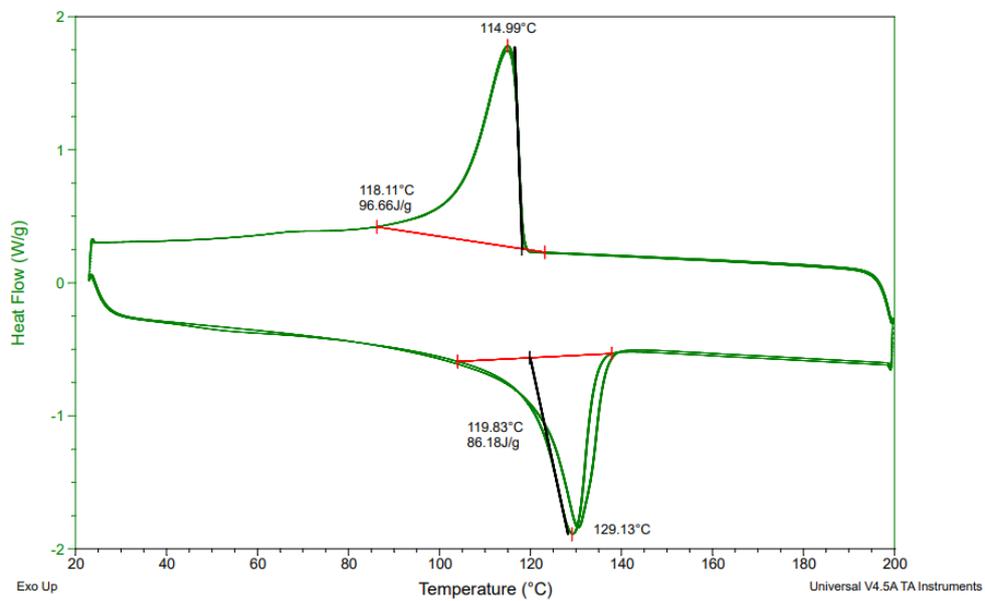


Figura 3.9 Gráfica de la muestra C

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de calorimetría de barrido

Muestra	Temperatura de cristalización [°C]	Temperatura de fusión [°C]	Entalpía específica de fusión [J/g]	Entalpía específica de cristalización [J/g]
A	115.85	130.27	113	95.68
B	113.78	129.95	85.77	88.61
C	114.99	129.13	86.18	96.66

En la tabla 3.4 se observan los parámetros estudiados en las muestras ensayadas en el DSC. Se pudo observar que la muestra B disminuye su temperatura de cristalización, es decir que las moléculas se cristalizan a menor temperatura por lo que se necesita menor energía. En cuanto a la muestra C, se observa que el aditivo compatibilizante aumenta la temperatura de cristalización y a su vez la entalpía específica asemejándose a la muestra referencial. Es importante mencionar que la cristalinidad del material influye directamente en las propiedades mecánicas, cuando un material es más cristalino que otro significa que internamente existe mayor homogeneidad en el ordenamiento de sus moléculas lo que lo hace más resistente a la tracción y más duro que otro. Como se observa en el compatibilizante, dado que realiza un mejor enlace molecular por lo que sus variables son muy semejante al material puro. Es así que para procesos industriales la implementación de un material reforzado al 5% dentro de sus líneas no varía considerablemente los parámetros de temperatura por lo que se podría mantener un perfil de temperatura similar.

3.3 Ensayo de Reología

Con respecto a la figura 3.10 que se presenta a continuación, se estudiaron las 3 muestras en el reómetro de placas paralelas. Donde se analiza el comportamiento de las composiciones con respecto a la viscosidad y la velocidad de corte a una temperatura controlada.

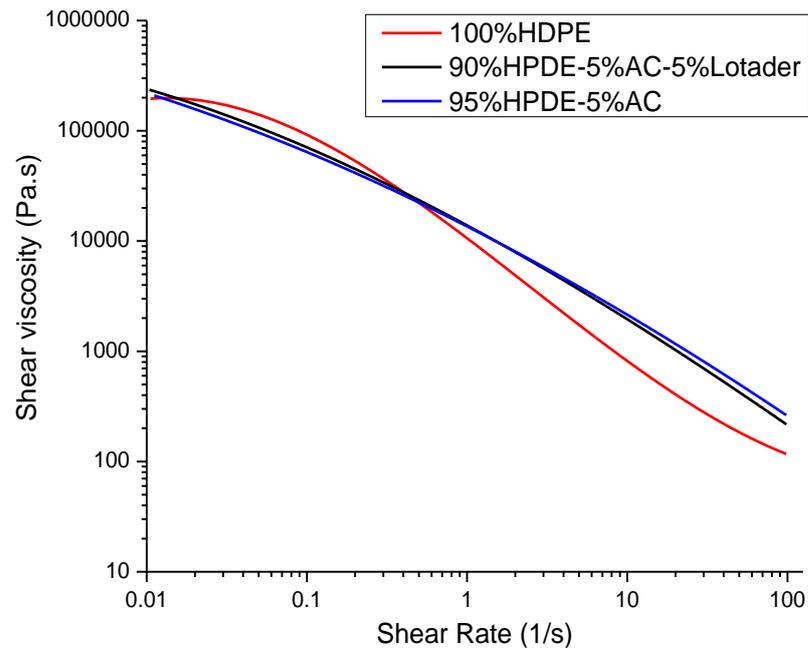


Figura 3.10 Ensayo de reología de las 3 muestras.

Se observa un comportamiento de flujo pseudoplástico correspondiente a la matriz polimérica, donde la viscosidad desciende a medida que la velocidad de corte aumenta. La viscosidad representa la resistencia o el esfuerzo del material a fluir a determinadas condiciones, para el ensayo se estableció un rango de velocidad de corte de 1-100 s^{-1} correspondiente a un proceso de extrusión. A partir de la muestra A se puede comparar el comportamiento de contenido de 5% de afrecho, donde la viscosidad aumenta por el refuerzo orgánico a partir de una velocidad de corte de 0.5 s^{-1} , 32% y 25% para las muestras B y C respectivamente. Lo que significa que la fluidez y el flujo volumétrico disminuyen afectando el consumo eléctrico. De manera análoga, el aditivo no realiza mayor efecto respecto a la muestra B que no presenta el compatibilizante, por lo que se puede determinar que las composiciones no se ven alteradas significativamente entre la muestra B y C.

3.4 Ensayo termogravimétrico (TGA)

Se realizó el ensayo termogravimétrico de 2 muestras de refuerzo de rHDPE,

a las cuales se les agrego 10% de afrecho de cebada determinada como la muestra D y 5% de afrecho de cebada correspondiente a la muestra B, respectivamente. A continuación, se muestran los resultados de rangos de temperatura de degradación determinados para cada muestra.

Tabla 3.5 Resultados de rangos de temperaturas de degradación

Muestra	T _o deg [°C]	T _r deg [°C]
B	463.41	495.09
D	465.64	496.10

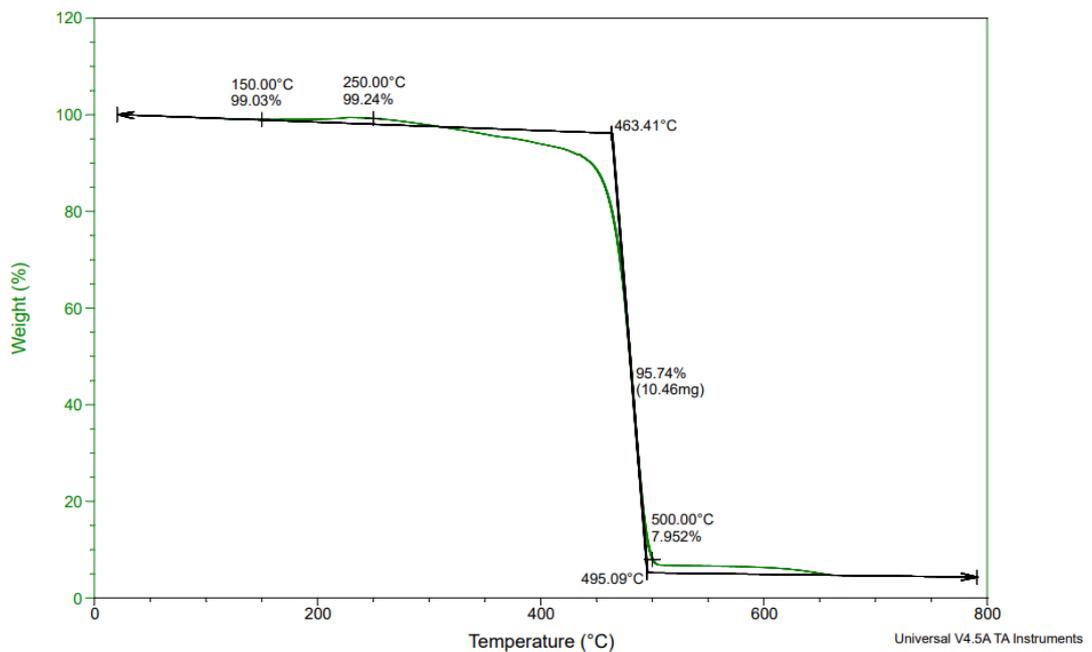


Figura 3.11 Gráfica de ensayo TGA para muestra 90% HDPE + 10% AC

Los ensayos de TGA determinan la degradación temprana del material, para temperaturas menores a 150°C se degradan los componentes volátiles y de bajo peso molecular, en la muestra D se puede observar que para este punto de temperatura se ha perdido 0.97% del peso. En cuanto a la muestra B se ha perdido 1.33 %, es decir la muestra B contenía mayor elemento volátiles, como el agua.

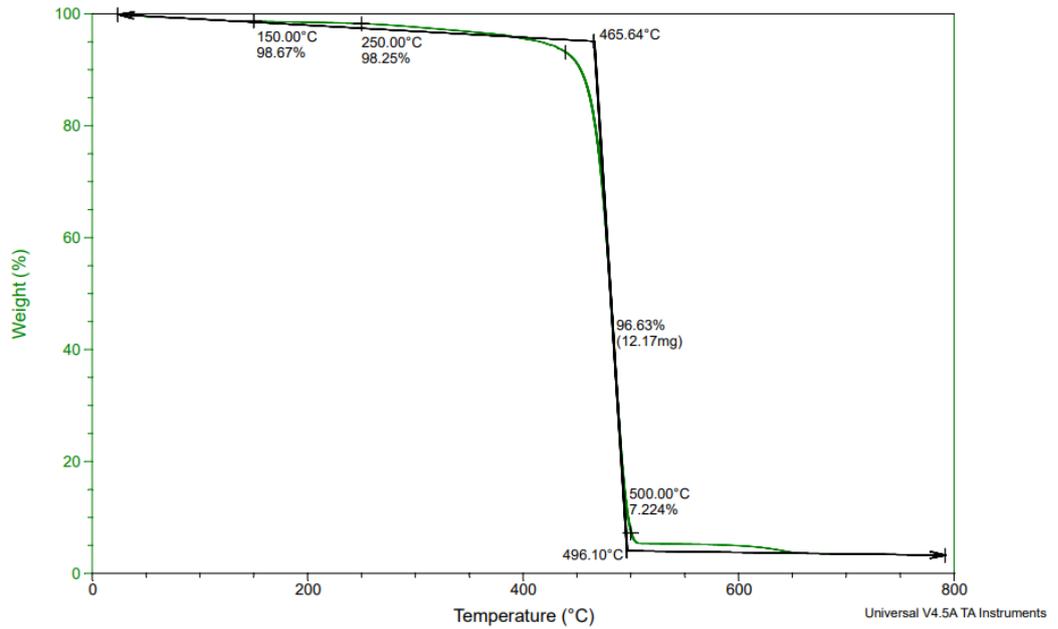


Figura 3.12 Gráfica de ensayo TGA para muestra 90% HDPE + 5% AC

La segunda zona de análisis de 150°C a 250°C donde hay pérdidas de componentes de bajo peso molecular como aditivos, los cuales refieren a los primeros productos en descomposición. En cuanto a la zona 3 inicia la degradación térmica donde se comparan los rangos de degradación para la muestra D la temperatura promedio de degradación es de 479.25°C y para la muestra B de 480.87°C. Es importante mencionar que debido a que la composición posee componente orgánico, la degradación del material compuesto dependerá de la temperatura de combustión del afrecho, correspondiente a 200°C. Sin embargo, no existe variación significativa en las temperaturas de degradación entre la adicción de 10% de afrecho por lo que es posible aumentar paulatinamente el contenido de la fibra de refuerzo para posteriores análisis.

3.5 Diseño de la estructura de la vivienda

3.5.1 Cargas en la estructura

Como se mencionó anteriormente, se consideró para el diseño la carga que tendrá que soportar la armadura central ya que en esta se producirán los esfuerzos máximos.

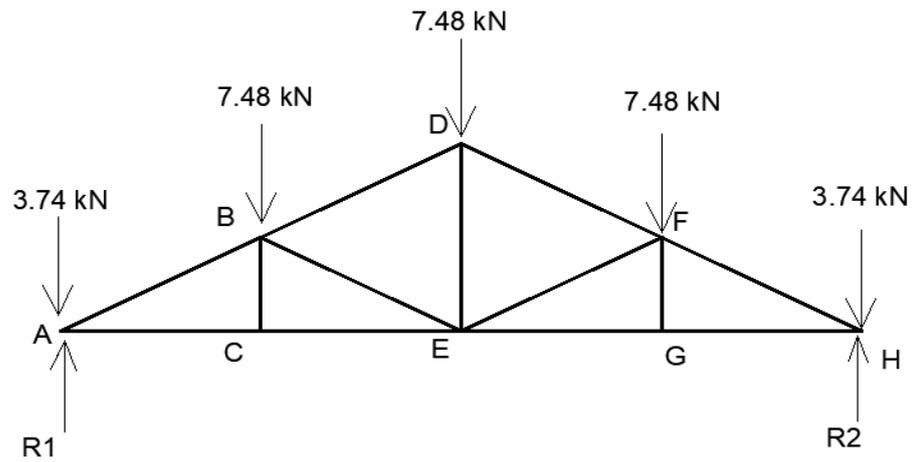


Figura 3.13 Cargas en la estructura del techo

Se determinaron las cargas de compresión o tensión que se generan en cada viga de la estructura producto de la carga superficial que debe soportar según la norma.

Tabla 3.6 Fuerzas internas en la estructura del techo

Viga	Carga
F_{AC}	31.42 kN
F_{GH}	31.42 kN
F_{AB}	38.6 kN
F_{FH}	38.6 kN
F_{BC}	0
F_{FG}	0
F_{CE}	31.42 kN
F_{GE}	31.42 kN
F_{BE}	9.37 kN
F_{FE}	9.37 kN
F_{BD}	9.6 kN
F_{FD}	9.6 kN
F_{DE}	7.55 kN

En la figura 3.14 se observa la viga AH que está sometida a flexión bajo una carga de 268 N producto de las cargas transmitidas por el resto de los elementos, además, se realizó el diagrama de fuerza cortante y del momento flector. En la figura 3.15, el momento máximo es de 13.21 kN-m considerado para el dimensionamiento de ancho y alto de la viga, el esfuerzo de flexión depende proporcionalmente de esta variable.

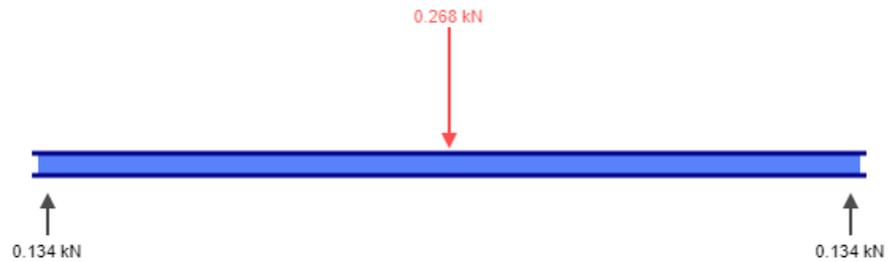


Figura 3.14 Viga AH sometida a carga de flexión.

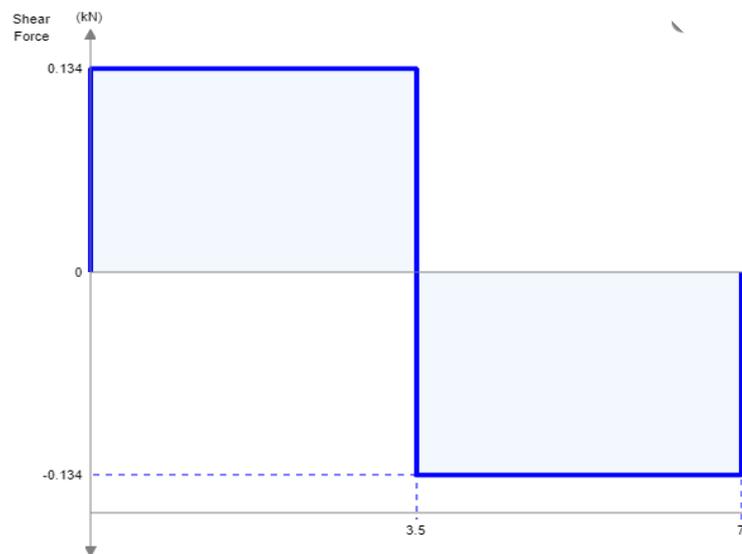


Figura 3.15 Diagrama del Esfuerzo cortante en la viga

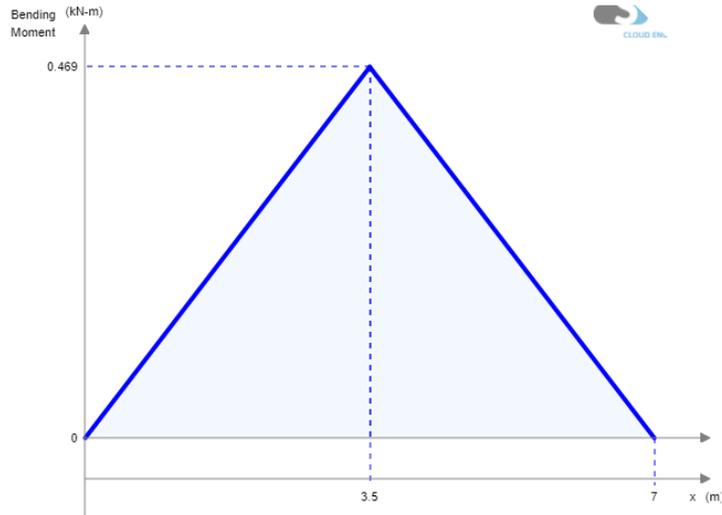


Figura 3.16 Diagrama de momento de la viga AH

3.5.2 Dimensionamiento de la viga

La viga AH es el elemento más crítico ya que se encuentra sometida a esfuerzo de flexión. Además, el esfuerzo de fluencia de flexión considerado fue el de la muestra de 95% rHDPE 5% AC con un valor de 9.70 MPa. Se reemplazó la ecuación 2.4 en la ecuación 2.6 del esfuerzo axial producto de la flexión, obteniendo así la ecuación resultante (Tabla 3.7). Se resuelve la expresión dando como resultado un valor de la variable 'a' de 95.8mm. De este modo, se obtuvo la dimensión de la viga cuadrada más económica para el Proyecto.

Tabla 3.7 Tabla de resultado del dimensionamiento

Ecuación del esfuerzo de flexión	$\sigma_{fw} = \frac{Mc}{I} = \frac{S_y}{n}$
Ecuación resultante	$\frac{a^4}{12} - \left[8 * 10^{-4} \left(\frac{a}{2} - 0.01 \right)^2 + 5.33 * 10^{-8} \right] - \frac{469 * a * 2}{2 * 9700000} = 0$
Dimensión final (a)	$a = 95.8mm = 96 mm$

3.5.3 Simulación

Tabla 3.8 Resultados de la simulación de tensión

Nombre	Máximo	Mínimo
Tensión De Von Mises	0.9991 ksi	0.0002 ksi
Tercera Tensión Principal	0.185 ksi	-1.074 ksi
Desplazamiento	2.86388 in	0 in
Coefficiente De Seguridad	15	1.35
Deformación Equivalente	0.007078 u	0.000001 u

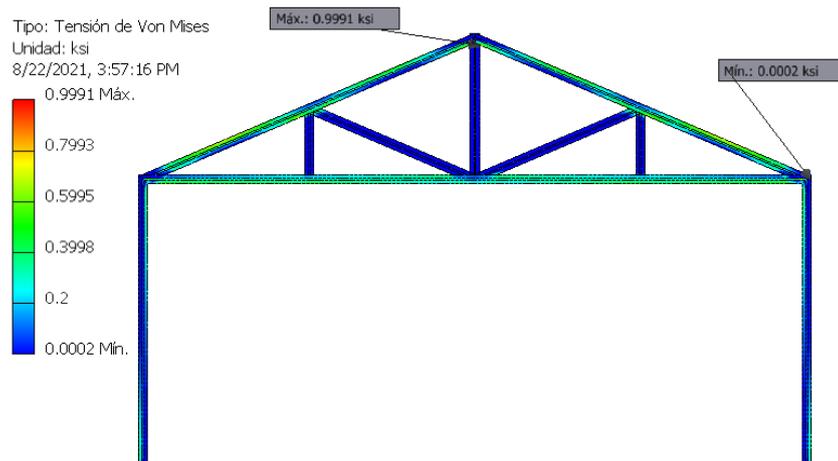


Figura 3.17 Esfuerzo Von Mises para las vigas cuadradas de la estructura.

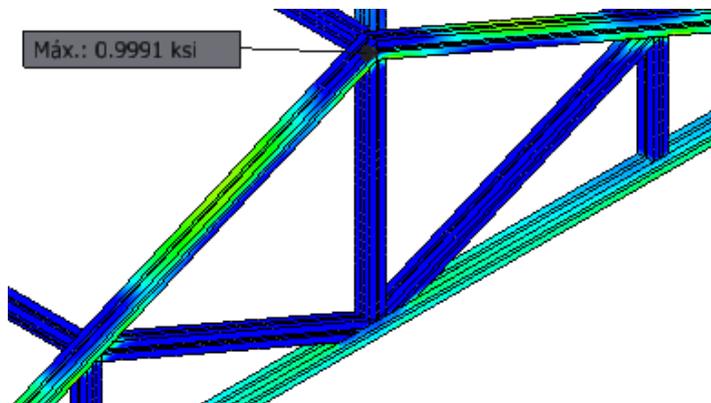


Figura 3.18 Zona de la estructura donde se produce el mayor esfuerzo Von-Mises

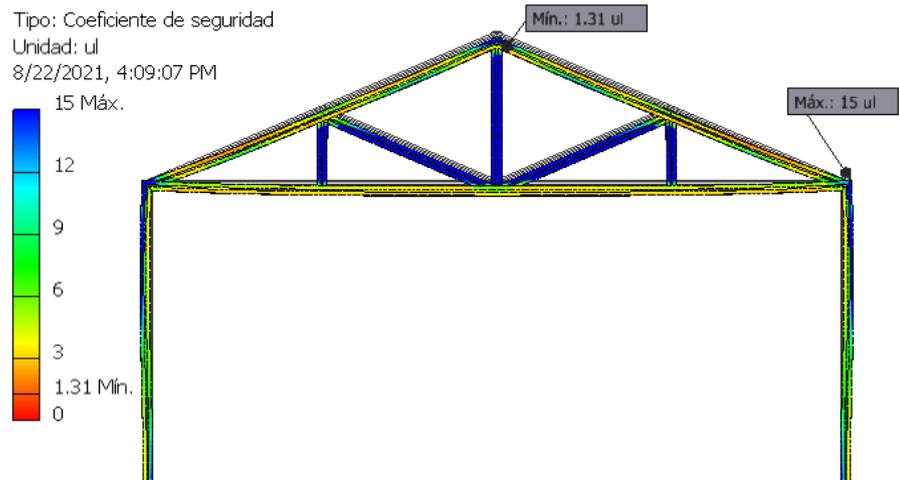


Figura 3.19 Análisis del coeficiente de seguridad en la estructura de la vivienda

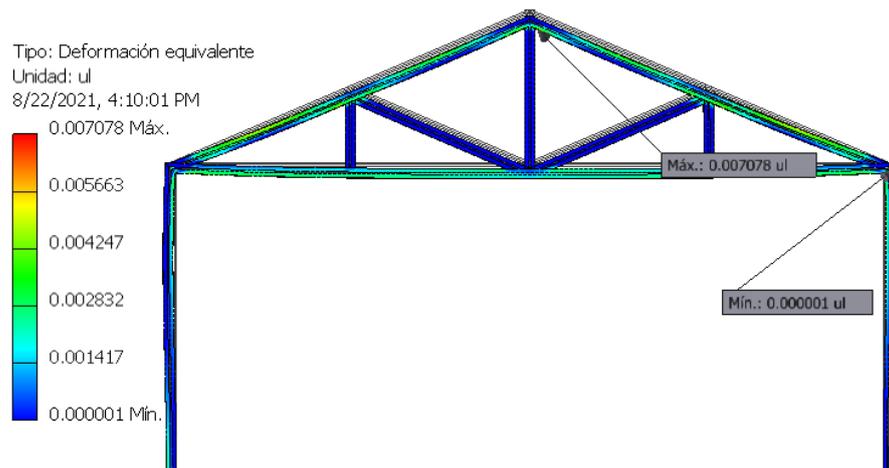


Figura 3.20 Análisis de la deformación equivalente en la estructura de la vivienda

Para el análisis de tensión realizado en Autodesk Inventor, se establecieron las propiedades de la composición 95% HDPE 5%AC tal como se muestra en la tabla 3.8. El esfuerzo Von Mises producto de la combinación de los esfuerzos de flexión y axial se observa en la figura 3.17. Debido al cambio

de sección en la unión de las vigas inclinadas, se produce un concentrador de esfuerzo en ese punto haciendo que los esfuerzo se disparen y se tenga un máximo de 0.99 ksi /6.83 MPa. Además, se corroboró que en la viga AH, que soporta la estructura del techo para que se apoyen en las columnas, se producen los mayores esfuerzos producto de la flexión con valores entre 0.39 y 0.6 ksi.

En la figura 3.20 se observa la deformación equivalente de la estructura obteniendo una deflexión máxima de 0.7% en las zonas más críticas que son la viga inferior AH, las vigas inclinadas AD y DH. Estos valores se encuentran dentro de la deformación admisible del material antes de ingresar a la zona de ruptura que es del 10.3%. Un aspecto principal del análisis es el coeficiente de seguridad, en la tabla 3.8 se establece que el mínimo valor registrado en la estructura es de 1,3. Como el coeficiente de seguridad mínimo es mayor a 1 la estructura no fallara en ese punto.

3.6 Análisis de costos

Para el efecto de la estimación de los costos de producción, se consideró aspectos principales como costo de materia prima, mano de obra, consumo energético y otros costos indirectos del proceso. Para la producción de una viga con las dimensiones mencionadas de 7000x95x95 mm se requiere una cantidad de 50.6 kg de material compuesto de rHDPE y afrecho de cebada como se observa en la tabla 3.9

Tabla 3.9 Masa total de la viga

Variable	Valor
Volumen	0.05198 m ³
Densidad	973 kg/m ³
Masa	50.57 kg

Por otro lado, el valor de la materia prima depende del precio de las fundas de banana reciclado que primero pasan por un proceso de pelletizado en otra

extrusora que representa el 95% del producto el otro 5% es del afrecho. Es importante mencionar que para la empresa de reciclaje el costo de materia prima incluye el transporte de las fundas de banano se y la transformación. Obteniendo un costo total de \$25.41 por viga producida. Este valor comparado con el precio de una viga de polímero reciclado es un 4% menor ya que el precio del afrecho es menor.

Tabla 3.10 Cantidad de materia prima y precio por unidad

Materia Prima	Precio viga con AC	Precio de viga 100% rHDPE
Costo total kg de rHDPE pelletizado	\$0.52	\$0.52
Cantidad de rHDPE [kg]	48.04	50.57
Costo del afrecho	\$0.17	\$0
Cantidad de afrecho [kg]	2.53	0
Costo total por unidad	\$25.41	\$26.30

Para la producción de una viga en la extrusora, se requiere de dos operarios para poder desmontar el molde y alimentar la tolva con material, por este motivo se consideran 4 personas por día. De igual modo, dentro del proceso de producción existen otros consumos indirectos que afectan al costo del producto. El consumo de la energía de la extrusora es de \$0.09 por kilogramo. Dentro de esta clasificación también se incluyen el mantenimiento de la máquina, la depreciación, el embalaje y distribución a los clientes, dando como resultado un valor de \$0,21.

Finalmente, se obtiene el costo de producción por unidad que es de \$45.24, y con un margen de contribución o ganancia del 25%, el precio de venta sugerido es de \$52.30 sin incluir IVA. Comparado con la viga de 100% de la matriz polimérica el precio reduce en un 2% al reemplazar un 5 % con el refuerzo orgánico. El precio de una viga de madera se encuentra en \$1.09 por kilogramo, que es el producto competidor frente a las vigas recicladas las cuales, presentan un precio de 1.03\$ por kilogramo que es un valor similar a

la propuesta. Sin embargo, se obtienen otras ventajas frente a la madera, como el tiempo de vida y la disminución de la deforestación.

Tabla 3.11 Costo total de producción por unidad y precio de venta

Costo	Mezcla B	Mezcla A
Costo de Materia Prima por unidad	\$25.41	\$26.30
Costo de mano de obra por unidad	\$ 8.97	\$ 8.97
Costos indirectos de fabricación por unidad	\$10.86	\$10.86
Costo Producción Postes (U)	\$45.24	\$46.13
% Margen Contribución	14%	14%
Precio De Venta Sugerido (U)	\$52.30	\$53.19

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El refuerzo orgánico del afrecho de cebada junto al rHDPE genera un aumento en la resistencia a la tensión de un 3% respecto a la muestra del polietileno reciclado de fundas, sin embargo, cuando se somete esta composición a cargas de flexión sus propiedades disminuyen en un 12% provocando una menor resistencia. Lo que refleja que el material mantiene mayor resistencia a cargas de tensión que de flexión.
- En cuanto a la deformación del ensayo de flexión se observa un efecto positivo para la composición B con un incremento de 2.7% lo que representa que el material mantiene un comportamiento dúctil, aumentando la elongación del material antes de romperse. Con respecto a la muestra C la deformación disminuye en 2.3% por lo que se observa que el aditivo LOTADER no genera cambios positivos en cuanto a la deformación.
- La muestra más factible para el diseño fue la del 95% rHDPE y 5% afrecho de cebada, ya que presenta un módulo de rigidez mayor para el análisis en tensión y un esfuerzo de fluencia considerable para soportar el momento flexionante en la viga. Además, presenta una ventaja en la disminución de los costos de producción debido a que su precio de adquisición es bajo.
- En la mezcla del rHDPE+AC, el aumento de aditivo LOTADER no produce cambios significativos en las propiedades mecánicas, principalmente en tracción y flexión, no obstante, proporciona una mezcla más homogénea en el proceso de extrusión.
- La estructura de dimensiones de 7x7x2.8 bajo una carga de 1.27 kPa posee un factor de seguridad mínimo de 1.35, producto de los concentradores de esfuerzos que se producen en las uniones de las vigas, que implica que la estructura no falla y por lo tanto se cumple con la normativa NEC CG SE para cargas no sísmicas.

- El ensayo de DSC refleja las temperaturas de fusión y de cristalización de las muestras ensayadas, estableciendo el punto de fusión para la muestra A de referencia en 130.27°C, en cuanto a la muestra B y C se determina una disminución 0.24% y 0.9% por lo que se observa que no existe variación significativa, definiendo que el perfil de temperatura de extrusión no se verá afectado para el material compuesto.
- Las pruebas de reología reflejan un aumento en la viscosidad a partir de una velocidad de corte de 0.5 s⁻¹ de 32% y 25% para las muestras B y C respectivamente. Esto refleja que el material disminuye su fluidez al agregarse el componente orgánico, por lo que el flujo volumétrico disminuye, lo que representa un aumento de consumo energético que se verá reflejado en los costos del producto.
- El refuerzo orgánico analizado en una proporción de 5% y 10% a partir del análisis termogravimétrico demuestra la estabilidad de la muestra al someterla a condiciones de intemperie. Se obtuvo una temperatura de degradación de para las 2 proporciones de aproximadamente 480°C.
- La viga de sección transversal cuadrada con canales y dimensiones calculadas poseen un precio de venta de \$1.03 por kilogramo, el cual comparado con el precio de las vigas de madera que es de \$1.09, es muy similar. Sin embargo, se debe adicionar otras ventajas como evitar la degradación de la estructura debido a la humedad y la radiación solar.
- Adicional a esto, se debe sumar el valor agregado del producto que es ser una alternativa eco amigable y que promueve la economía circular. Por cada vivienda que se construya se están reciclando cerca de 20,430 fundas de banano.

4.2 Recomendaciones

- Extraer toda la humedad que contiene el compuesto antes de realizar el proceso de extrusión se sugiere, colocándolo en una mufla durante 24 horas a una temperatura de 40°C con la finalidad de disminuir las porosidades que producen efectos negativos en las propiedades mecánicas del producto final.

- Adecuar un mezclador durante la alimentación del proceso de extrusión para lograr una mezcla más homogénea, con el propósito de controlar la calidad final del material compuesto.
- Evaluar el uso de un porcentaje bajo de aditivo para protección UV en la composición con el objetivo de aumentar el rango de temperatura de degradación y alargar el tiempo de vida del producto.
- Valorar el uso de un tornillo doble husillo para la extrusión del material compuesto a fin de obtener una mezcla más uniforme, esto se debe a que la fibra de refuerzo orgánica tiene a asentarse, haciendo que el proceso sea más complejo para un equipo de tornillo único.
- Estudiar el comportamiento de la estructura bajo cargas dinámicas como granizo o vientos a partir del análisis de diseño mecánico y la simulación con la finalidad de obtener el dimensionamiento adecuado de la viga para los nuevos esfuerzos.
- Analizar un aumento del 15% y 20% del componente orgánico y caracterizar la muestra comparando que las propiedades mecánicas cumplan la normativa NEC CG SE con la intención de disminuir costos de materia prima al disminuir la cantidad de rHDPE de la composición.
- Hacer uso de los equipos de protección necesarios al momento de la extrusión del material como guantes resistentes al calor, además, mantener un extintor contra incendios cerca de la zona de trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio del Comercio Exterior, «Informe Sector Bananero Ecuatoriano,» Quito, 2017.
- [2] I. Zenner, «Plastic products in agriculture: benefice and ambient cost: a review,» 2013.
- [3] F. a. A. O. o. t. U. Nations, «Banana Market Review - Preliminary results 2020,» Rome, 2021.
- [4] M. Falappa, «De una economía lineal a una circular, en el siglo XXI,» Mendoza, 2019.
- [5] FAO, «Análisis del mercado del banano: resultados preliminares 2019,» Roma, 2020.
- [6] L. León, «The sustainability environmental in the sector productive banana of the canton Machala,» Machala, 2017.
- [7] L. T. Nuñez, «Políticas para gestión integral de plásticos en el Ecuador,» 2014.
- [8] L. Maridueña, «Estudio de impacto ambiental ex post bananera glice S.A,» Triunfo, 2019.
- [9] CENTA, «Guía técnica del cultivo de plátano,» Centro Nacional de tecnología agropecuaria y forestal 'Enriquez Álvarez Córdoba', El Salvador, 2010.
- [10] EFSA, «Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance bifenthrin,» Italy, 2011.
- [11] M. Johnson, B. Luukinen, J. Gervais, K. Buhl y D. Stone, «Bifenthrin Technical Fact Sheet,» National Pesticide Information Center, Oregon State University Extension Services, 2010.
- [12] JAD, «Manejo de residuos plásticos en la Industria del banano,» Junta Agroempresarial Dominicana Inc., República Dominicana, 2013.
- [13] E. Cerdá y A. Khalilova, Economía Circular, Economía Industrial, 2016, pp. 11-20.
- [14] H. Scheuermann, «Parámetros importantes en el proceso de extrusión: su medición y significado para la calidad del producto,» *Informador Técnico*, vol. 41, 1989.

- [15] D. R. Askeland, *Ciencia Ingeniería de Materiales*, Mexico D.F.: Cengage Learning, 2017, p. 185.
- [16] C. Nuñez, *Comportamiento mecánica de los materiales*, vol. 2, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2011.
- [17] E. Rodríguez, «Caracterización de polímeros aplicando el método,» *Metodos y Materiales*, vol. 2, p. 26, 2012.
- [18] MIDUVI, «Norma Ecuatoriana de Construcción: Cargas No Sísmicas (NEC-SE-CG),» *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*, 2014.
- [19] M. Sanchez, «Estudio de factibilidad para la comercialización del tamo de arroz y propuesta de distribución, dirigida a la construcción de viviendas de interés social de la cooperativa valle hermoso de monte sinai en Guayaquil,» Guayaquil, 2015.
- [20] J. Vargas, «Caracterización del subproducto cascarilla de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos,» *Revista Científica*, vol. 23, nº 1, 2013.
- [21] G. Zambrano y C. C. U. A. Valery García, «Aprovechamiento de la cascarilla de arroz (*Oryza sativa*) para la obtención de fibras de celulosa,» Portoviejo, 2021.
- [22] P. Valdés, «Propiedades físico-mecánicas de racimos de banana como objeto de transporte en cable aéreo,» 2020.
- [23] J. Ferrari, «Reutilización de bagazo de cebada cervecera por secado y pelletización como suplemento forrajero,» 2017.
- [24] A. K. Bledzki, «Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties,» 2010.
- [25] P. Bordón, R. Paz, C. Peñalva, G. Vega, M. Mozón y L. García, «Biodegradable Polymer Compounds Reinforced with Banana Fiber for the Production of Protective Bags for Banana Fruits in the Context of Circular Economy,» 2021.
- [26] C. Córdoba, J. Mera, D. Martínez y J. Rodríguez, «APROVECHAMIENTO DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RECICLADOS, REFORZADOS CON FIBRA VEGETAL, TETERA (*Stromanthe Stromathoides*),» *Revista Iberoamericana de Polímeros*, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia, 2010.

- [27] D. O. Beatriz, «Materiales de Construcción reciclados y reutilizados para la arquitectura,» Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2018.
- [28] M. Sepe, Thermal Analysis of Polymers, Shawbury, U.K.: RAPRA Technology, 1997, pp. 3-4,8,17-33.
- [29] J. A. Jasen, Characterization of plastics in Failure Analysis, Stork Technimet.
- [30] D. Ponce, «Obtencion de materiales compuestos de matriz polimerica biodegradable reforzada con fibra natural,» 2011.
- [31] V. F. Borrás, O. Fenollar y N. Montañés, «Caracterización de materiales poliméricos,» Universitat Politècnica de València, Valencia, 2016.

APÉNDICES

APÉNDICE A

A.1 Muestras y composiciones de materiales

Tabla A: Composiciones de materiales

Muestra	Composiciones
A	100% de HDPE reciclado
B	95% de HDPE reciclado + 5% de afrecho de cebada
C	90% de HDPE reciclado + 5% de afrecho de cebado+ 5% de aditivo compatibilizante.

APÉNDICE B

B.1 Resultados del ensayo de tracción de la muestra de 100% rHDPE

Tabla B1.1: Dimensiones iniciales de la probeta

Mezcla A	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidades	mm	mm	mm
21-6408 - 1	3.1500	6.0000	63.0000
21-6408 - 2	3.1500	6.0000	63.0000
21-6408 - 3	3.1500	6.0000	63.0000
21-6408 - 4	3.1500	6.0000	63.0000
21-6408 - 5	3.1500	6.0000	63.0000
1 - 6	3.1500	6.0000	63.0000

Tabla B1.2 : Resultados del ensayo de tensión de la muestra A

Nombre	Max. Carga	Max. Esfuerzo	Max. Deformación
Unidades	N	MPa	%
21-6408 - 1	300.438	15.8962	7.53968
21-6408 - 2	337.422	17.8530	5.53254
21-6408 - 3	357.891	18.9360	6.75635
21-6408 - 4	335.750	17.7645	6.82222
21-6408 - 5	349.828	18.5094	7.14762
1 - 6	343.625	18.1812	7.08730

B.2 Resultados del ensayo de tracción de la muestra de 95% rHDPE y 5% afrecho de cebada

Tabla B2.1: Dimensiones iniciales de la probeta

Muestra B	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidades	mm	mm	mm
21-6409 - 1	3.1500	6.0000	63.0000
21-6409 - 2	3.1500	6.0000	63.0000
21-6409 - 3	3.1500	6.0000	63.0000
21-6409 - 4	3.1500	6.0000	63.0000
21-6409 - 5	3.1500	6.0000	63.0000
1 - 6	3.1500	6.0000	63.0000

Tabla B2.2: Resultados del ensayo de tensión de la muestra B

Nombre	Max. Carga	Max. Esfuerzo	Max. Deformación
Unidades	N	MPa	%
21-6409 - 1	351.750	18.6111	6.57460
21-6409 - 2	353.469	18.7020	6.78889
21-6409 - 3	361.547	19.1295	6.79683
21-6409 - 4	323.750	17.1296	6.86349
21-6409 - 5	346.016	18.3077	6.79683
1 - 6	345.563	18.2837	6.81429

B.3 Resultados del ensayo de tracción de la muestra de 90% rHDPE, 5% Afrecho de cebado y 5% aditivo Lotader.

Tabla B3.1: Dimensiones iniciales de la probeta

Mezcla C	Espesor	Anchura	Longitud calibrada
Unidades	mm	mm	mm
21-6410 - 1	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 2	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 3	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 4	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 5	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 6	3.1500	6.0000	63.0000
21-6410 - 7	3.1500	6.0000	63.0000

Tabla B3.2: Resultados del ensayo de tensión de la muestra C

Nombre	Max. Carga	Max. Esfuerzo	Max. Deformación
Unidades	N	MPa	%
21-6410 - 1	277.938	14.7057	5.07778
21-6410 - 2	313.313	16.5774	7.24603
21-6410 - 3	313.297	16.5766	7.38413
21-6410 - 4	316.938	16.7692	6.84921
21-6410 - 5	313.766	16.6014	7.23095
21-6410 - 6	327.391	17.3223	6.81270
21-6410 - 7	324.422	17.1652	7.03492

APÉNDICE C

C.1 Resultados del índice de fluidez (MFI)

Se realizó la prueba de índice de fluidez según la norma **ASTM D1238** que establece para el polietileno de alta densidad mantener temperatura de 190°C con un peso de 2.19 kg.

Tabla C.1 Resultados del ensayo del índice de fluidez

Muestra	%	MFI [g/10 min]	Desviación estándar
A	100	0.062	0.00
B	95-5	0.048	0.01
C	90-5-5	0.080	0.01

APÉNDICE D

D.1 Parámetros de la Simulación de la estructura

Tabla D: Descripción del modelo y propiedades del material simulado

Variable	Valor
Volumen	0.843 m^3
Masa	817.19 kg
Material	Polietileno de alta densidad
Densidad	$0.035 \frac{\text{lb}}{\text{in}^3}$
Límite De Elasticidad	1305.34 lpc
Coficiente Poisson	0.392
Numero De Vigas	40
Numero De Fuerzas	15
Numero De Restricciones	6
Carga 1	7.48 kN
Carga 2	3.74 kN
Presión	1.21 kPa

APÉNDICE E

E.1 Costos de producción

Tabla E.1: Costo total de mano de obra por kg.

Mano de Obra	Número de Personas	4
	Costo por persona	933.67
	Total	3,734.67
	Costo por kg	0.18

Tabla E.2: Tiempos de producción y unidades producidas

Tiempo en producir una unidad	77.8 min
Horas por turno	9 h
Turnos	2
Días de trabajo	30
Kilogramos por hora	39.00 kg
Kilogramos al mes	21,060.70 kg
Unidades por hora	0.77
Unidades por mes	416

Tabla E.3: Costos indirectos

Costos indirectos de fabricación	Energía Extrusora	0.09
	Depreciación Pellet# 2	0.02
	Mantenimiento	0.01
	Distribución/Embalaje	0.10
	Costo CIF por kg	\$ 0.21