

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Diseño de vigas de polietileno reciclado reforzado con cascarilla de arroz  
para uso de soporte de techo de viviendas”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniera Mecánica**

Presentado por:

Demis Adriana Cabrera Álava

Andrea Melissa Mena Abad

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

## DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mi madre, Teresa Álava, que ha estado conmigo en todo momento, apoyándome en todo de manera incondicional, haciendo de mis objetivos los suyos para que pueda cumplirlos en su totalidad. A mi padre, Diego Cabrera, que estuvo aconsejándome y motivándome a cumplir con todos mis propósitos en excelencia.

A mi prima Leyleen Ávila y a mi tía Katya Álava que siempre han velado por mí y apoyado a la distancia en todo momento a seguir adelante.

A Erik Lema y a Fernando Amoroso, mis más preciados amigos, que han crecido junto a mí y han estado conmigo en las buenas y en las malas durante este largo trayecto de mi vida universitaria.

***Demis Cabrera Álava***

Este proyecto está dedicado a todos los que han sabido ser Estrella Polar en mi oscuridad.

***Andrea Mena Abad***

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, que estuvieron apoyándome en todo el transcurso de mi formación profesional.

A Andrés Rigail, Ph.D, mi tutor, por ser un excelente guía y estar siempre dispuesto a ayudarnos y aclararnos dudas para la realización de este proyecto integrador.

A las ingenieras Estephany Adrián, Miriam Lazo, y a todo el personal de LEMAT por toda su paciencia y predisposición a ayudarnos en todo momento.

Un agradecimiento especial a Julio Gaona y Bryan Perero, por su valiosa colaboración en las fases críticas del proceso experimental de este trabajo.

Finalmente, a todos mis amigos, compañeros y profesores de ESPOL que fueron fuente de motivación para culminar exitosamente mi carrera profesional, quedo eternamente agradecida.

***Demis Cabrera Álava***

Agradezco principalmente a Dios por siempre cuidar mi caminar.

A mi familia presente y a los que han partido, pues han sido mi inspiración y motivación a lo largo de todo este proceso educativo.

Al Dr. Andrés Rigail, las ingenieras Stephany Adrián, Miriam Lazo y demás personal de LEMAT quienes muy amablemente estuvieron dispuestos a prestarnos su ayuda.

A todos aquellos educadores a quienes, desde muy pequeña, tuve el gusto de presenciar en el aula. Porque más que docentes han sido formadores de la persona que soy ahora.

Por último, agradezco a mi mejor amigo, Alexander Bravo y a todos mis amigos que durante mi vida estudiantil han estado en las buenas y en las peores; porque siempre hemos salido adelante juntos.

***Andrea Mena Abad***

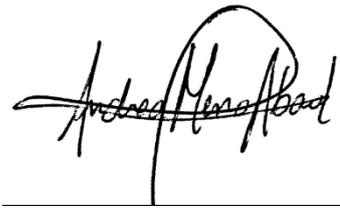
## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Demis Adriana Cabrera Álava y Andrea Melissa Mena Abad 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”



---

Demis Adriana  
Cabrera Álava



---

Andrea Melissa Mena  
Abad

# EVALUADORES

RODOLFO  
EZEQUIEL PAZ  
MORA

Digitally signed by  
RODOLFO EZEQUIEL PAZ  
MORA  
Date: 2021.02.19 14:37:19  
-05'00'

---

**MSc. Rodolfo Paz**

PROFESOR DE LA MATERIA



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

---

**Dr. Andrés Rigail**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En la actualidad, se estima que en el Ecuador solo un 9% de todo el residuo plástico es reciclado. Mientras que, por el lado agroindustrial, es poco el uso que se les ofrece a los residuos orgánicos industriales. La tendencia de la economía circular busca la recuperación y reutilización de dichos residuos como materia prima reciclada para ser reincorporados en nuevos procesos industriales y generar nuevos productos. Es por tal motivo que, también en los últimos años se ha orientado el uso de estos desechos agroindustriales como refuerzo de matrices poliméricas recicladas para el origen de nuevos materiales como la madera plástica.

Bajo dichas premisas, se propone diseñar una viga de polietileno reciclado (rHDPE) reforzado con cascarilla de arroz (CA) y diferentes aditivos, para reemplazar el uso de la madera como soporte de techo de viviendas. Para ello, se planteó trabajar en la extrusora de tornillo simple cuatro mezclas diferentes: rHDPE puro (Mezcla A), rHDPE+CA (Mezcla B), rHDPE+CA+RETAIN (Mezcla C) y rHDPE+CA+LOTADER (Mezcla D); de las cuales la mezcla B no pudo ser procesada. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis de consumo de energía y se realizaron probetas para las pruebas de tracción, tensión, DSC y MFI en los laboratorios de la ESPOL.

Finalmente, se obtuvo que la mezcla C consume la menor cantidad de energía específica, mientras que la mezcla D presenta mejores propiedades para el diseño de la viga con una sección transversal I y con costos de producción accesible y fundamentada en la economía circular.

**Palabras Clave:** Polietileno reciclado, Cascarilla de arroz, Aditivos, Soporte de techo, Consumo energético.

## **ABSTRACT**

*At present, it is estimated that in Ecuador only 9% of all plastic waste is recycled. While, on the agro-industrial side, the use offered to industrial organic waste is little. The trend of the circular economy, seeks the recovery and reuse of said waste as recycled raw material to be reincorporated in new industrial processes and generate new products. It is for this reason that in recent years the use of these agro-industrial waste has also been oriented as reinforcement of recycled polymeric matrices for the origin of new materials such as plastic wood.*

*Under these premises, it is proposed to design a beam of recycled polyethylene (rHDPE) reinforced with rice husk (RH) and different additives, to replace the use of wood as a support for the roof of houses. To do this, three different mixtures were worked in the single screw extruder: Pure rHDPE (Mix A), rHDPE + RH (Mix B), rHDPE + RH + RETAIN (Mix C) and rHDPE + RH + LOTADER (Mix D) of which mix B could not be processed. Subsequently, an energy consumption analysis was carried out and specimens were made for the tensile and stress test. Also, DCS and MFI tests were carried out in the ESPOL laboratories.*

*Finally, it was obtained that Mix C consumes the least amount of specific energy while Mix D presents better properties for the design of the beam with a cross section I and with accessible production costs based on the circular economy.*

*Keywords: Recycled polyethylene, Rice husk, Additives, Roof support, Energy consumption.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del problema .....	2
1.2 Justificación del proyecto.....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos .....	5
1.4 Marco teórico .....	6
1.4.1 Madera Plástica o WPC .....	6
1.4.2 Proceso de Extrusión .....	6
1.4.3 Extrusora de Tornillo Simple .....	7
1.4.4 Consumo de energía en la extrusión .....	7
1.4.5 Ensayo de Tracción.....	8
1.4.6 Calorimetría Diferencial de Barrido.....	8
1.4.7 La Madera como material de construcción .....	8
CAPÍTULO 2.....	9
2. Metodología .....	9
2.1 Diseño Conceptual .....	11

2.1.1	Establecimiento de Objetivos .....	11
2.1.2	Establecimiento de restricciones .....	13
2.1.3	Establecimiento de Funciones.....	14
2.1.4	Propuestas de alternativas de solución .....	15
2.1.5	Selección de la mejor alternativa.....	15
2.2	Diseño Preliminar .....	18
2.2.1	Materia Prima .....	18
2.2.2	Preparación de la Cascarilla de arroz (CA).....	18
2.2.3	Proceso de mezclado .....	19
2.2.4	Proceso de extrusión.....	21
2.2.5	Proceso de peletizado .....	25
2.2.6	Proceso de Secado de los pellets .....	26
2.2.7	Ensayos reológicos .....	26
2.2.8	Proceso de Inyección .....	28
2.2.9	Ensayos Mecánicos .....	28
2.3	Diseño Detallado .....	30
2.3.1	Especificaciones de diseño .....	30
2.3.2	Diseño de forma .....	32
2.3.3	Determinación de las Inercias .....	35
2.3.4	Análisis de cargas .....	42
2.3.5	Análisis de esfuerzos y deflexiones .....	47
2.3.6	Análisis de falla .....	48
2.3.7	Simulación.....	49
CAPÍTULO 3.....		51
3.	Resultados y Análisis .....	51
3.1	Resultados y Análisis de Consumo Energético .....	51
3.2	Resultados y Análisis del ensayo de Índice de Fluidez o MFI .....	55

3.3	Resultados y Análisis del ensayo de Calorimetría diferencial de barrido	
	DSC (Differential Scanning Calorimetry) .....	56
3.3.1	Muestra A: rHDPE puro .....	56
3.3.2	Muestra C: rHDPE + CA + RETAIN.....	57
3.3.3	Muestra D: rHDPE + CA + LOTADER .....	57
3.4	Ensayos Mecánicos .....	58
3.4.1	Resultados y Análisis del ensayo de Tensión.....	59
3.5	Resultados y Análisis del ensayo de Impacto IZOD.....	62
3.6	Diseño y Simulación .....	64
3.6.1	Inercias .....	64
3.6.2	Cargas .....	64
3.6.3	Diagrama de Cortante, Momento y Deflexiones .....	64
3.6.4	Simulación.....	68
3.7	Análisis de Costos .....	77
CAPÍTULO 4.....		81
4.	Conclusiones y Recomendaciones.....	81
4.1	Conclusiones .....	81
4.2	Recomendaciones .....	82
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
LEMAT	Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales
INEC	Instituto Nacional de estadística y censos
rHDPE	Recycled High Density Polyethylene
CA	Cascarilla de Arroz
WPC	Wood Polymer Composites
MFI	Melt Flow Index
DSC	Differential Scanning Calorimetry
MPY	Milésimas de pulgadas por año
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censo

## SIMBOLOGÍA

mm	Milímetros
°C	Celsius
J	Joules
m	Metro
mg	Miligramo
N	Newton
Ni	Níquel
C	Carbono
W	Vatio
cm	Centímetro
Pa	Pascales
g	gramo
h	horas

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de Metodología de diseño para el diseño de vigas de polietileno reciclado reforzado con cascarilla de arroz para soportes de techos de viviendas .....	10
Figura 2.2. Árbol de Objetivos .....	12
Figura 2.3 Árbol combinado (Objetivos y Requerimientos) .....	13
Figura 2.4 Diagrama de caja negra .....	14
Figura 2.5 Diagrama de la caja transparente.....	14
Figura 2.6 Estufa SECAGEM .....	19
Figura 2.7 Balanza digital .....	20
Figura 2.8 Mezclado manual .....	21
Figura 2.9 Extrusora.....	21
Figura 2.10 Sensores de temperatura de la extrusora .....	23
Figura 2.11 Sensores de presión de la extrusora .....	23
Figura 2.12 Equipo medidor de consumo energético .....	24
Figura 2.13 Cámara infrarroja .....	24
Figura 2.14 Cortadora .....	26
Figura 2.15 Equipo de índice de fluidez .....	27
Figura 2.16 Equipo de ensayos DSC .....	27
Figura 2.17 Inyectora .....	28
Figura 2.18 Equipo de ensayos universales .....	29
Figura 2.19 Equipo de ensayo de impacto IZOD .....	30
Figura 2.20 Sistema de poste y viga (JUNAC, 2000) .....	31
Figura 2.21 Estructura de la vivienda .....	32
Figura 2.22 CAD de la sección rectangular sólida .....	33
Figura 2.23 CAD de la sección rectangular hueca.....	33
Figura 2.24 CAD de la sección I .....	34
Figura 2.25 CAD de la sección C .....	34
Figura 2.26 CAD de la sección T.....	35
Figura 2.27 Dimensiones sección rectangular sólida.....	36
Figura 2.28 Dimensiones sección rectangular hueca .....	37
Figura 2.29 Dimensiones sección I.....	38
Figura 2.30 Dimensiones sección C .....	39

Figura 2.31 Dimensiones sección T .....	41
Figura 2.32 Detalle de la sujeción de la viga (Alvarado, 2014) .....	44
Figura 2.33 DCL de la viga.....	44
Figura 2.34 Tabla de pendiente y deflexión para superposición .....	45
Figura 2.35 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de I.....	49
Figura 2.36 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de I.	50
Figura 3.1 Resultado del consumo de energía para cada mezcla.....	52
Figura 3.2 Resultados del consumo de energía específico para cada mezcla.....	52
Figura 3.3 Resultados del caudal de salida de material para cada mezcla.....	53
Figura 3.4 Resultados de la temperatura de salida del material extruido para cada mezcla.....	54
Figura 3.5 Resultados de la presión ejercida en el dado para cada mezcla .....	55
Figura 3.6 Gráfica para la mezcla A (100%rHDPE).....	56
Figura 3.7 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla C (92%rHDPE+3%CA+5%RETAIN) .....	57
Figura 3.8 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla D (92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER) .....	57
Figura 3.9 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla A (100%rHDPE).....	59
Figura 3.10 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla C (92%rHDPE+3%CA+5%RETAIN) .....	60
Figura 3.11 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla D (92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER) .....	61
Figura 3.12 Resultados de la resistencia al Impacto en Joules para cada mezcla.....	63
Figura 3.13 Resultados de la resistencia al Impacto en J/m para cada mezcla .....	63
Figura 3.14 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección rectangular sólida.....	65
Figura 3.15 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección rectangular hueca .....	65
Figura 3.16 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección T	66
Figura 3.17 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección I .	66
Figura 3.18 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección C .....	67

Figura 3.19 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil rectangular sólida .....	68
Figura 3.20 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil rectangular sólida .....	68
Figura 3.21 Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil rectangular sólida .....	69
Figura 3.22 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil rectangular hueca .....	69
Figura 3.23 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil rectangular hueca .....	70
Figura 3.24 Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil rectangular hueca .....	70
Figura 3.25 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de I .....	71
Figura 3.26 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de I .....	71
Figura 3.27 Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de I .....	72
Figura 3.28 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de C .....	72
Figura 3.29 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de C .....	73
Figura 3.30 Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de C .....	73
Figura 3.31 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de T .....	74
Figura 3.32 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de T .....	74
Figura 3.33 Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de T .....	75
Figura B.1 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra A.....	91
Figura B.2 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra A .....	91
Figura B.3 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra A .....	92
Figura B.4 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra A .....	92
Figura B.5 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra C .....	93
Figura B.6 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra B .....	93
Figura B.7 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra B .....	94
Figura B.8 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra B .....	94
Figura B.9 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra D .....	95
Figura B.10 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra D ....	95
Figura B.11 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra D ....	96
Figura B.12 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra D ....	96

Figura G.1 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil rectangular sólido.....	104
Figura G.2 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil rectangular sólido.....	104
Figura G.3 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil rectangular hueco .....	105
Figura G.4 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil rectangular hueco .....	105
Figura G.5 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de C .....	106
Figura G.6 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de C .....	106
Figura G.7 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de T.....	107
Figura G.8 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de T.....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Cuadro de comparación por pares para los objetivos de primer nivel.....	11
Tabla 2.2 Cuadro de comparación por pares para los objetivos de segundo nivel .....	13
Tabla 2.3 Tabla de comparación por pares para los criterios de selección.....	17
Tabla 2.4 Criterio de ponderación cualitativo y cuantitativo para cada alternativa .....	17
Tabla 2.5 Matriz de decisión del grado del polietileno .....	17
Tabla 2.6 Masa pasante y retenida para cada uno de los tamices utilizados.....	18
Tabla 2.7 Proporciones de las mezclas realizadas .....	19
Tabla 2.8 Proporciones en Kilogramos de las mezclas realizadas .....	20
Tabla 2.9 Parámetros para de extrusora .....	22
Tabla 2.10 Formato para el registro de los datos para cada una de las muestras durante el proceso de extrusión .....	25
Tabla 2.11 Variables utilizadas para el cálculo de centroides e Inercias para cada perfil .....	36
Tabla 2.12 Dimensiones de la sección rectangular sólida .....	36
Tabla 2.13 Dimensiones de la sección rectangular hueca .....	37
Tabla 2.14 Dimensiones de la sección IR.....	38
Tabla 2.15 Dimensiones de la sección canal.....	40
Tabla 2.16 Dimensiones de la sección T .....	41
Tabla 2.17 Cargas muertas y vivas dadas por la NEC-SE-CG .....	42
Tabla 2.18 Símbolos y notación para las combinaciones de cargas.....	43
Tabla 2.19 Fórmulas de las combinaciones de cargas consideradas según la NEC-SE-CG .....	43
Tabla 2.20 Tabla de deformaciones de la viga modelo.....	46
Tabla 2.21 Parámetros ingresados en el módulo Static Structure de ANSYS .....	49
Tabla 3.1 Simbología utilizada para la descripción de las distintas variables.....	51
Tabla 3.2 Resultados de las mediciones del consumo de energía para las distintas mezclas.....	51
Tabla 3.3 Resultados de las mediciones del consumo de energía para las distintas mezclas.....	55

Tabla 3.4 Resultados de ensayos DSC .....	58
Tabla 3.5 Simbología utilizada para la descripción de las distintas variables .....	59
Tabla 3.6 Tabla de resultados del ensayo de tracción realizado para cada mezcla.....	59
Tabla 3.7 Resultados de la resistencia al impacto para las diferentes mezclas .....	62
Tabla 3.8 Resultados de centroides e inercias para cada sección .....	64
Tabla 3.9 Resultados de las cargas puntuales por vigueta de madera para cada combinación .....	64
Tabla 3.10 Resultados de las deflexiones máximas obtenidas para cada sección transversal .....	67
Tabla 3.11 Resultados tabulados de los análisis realizados mediante la simulación en ANSYS .....	75
Tabla 3.12 Obtención de la masa total por viga.....	77
Tabla 3.13 Materia prima requerida para producción mensual de las vigas .....	78
Tabla 3.14 Masa total requerida para la cascarilla de arroz .....	78
Tabla 3.15 Costo de materia prima requerida para producción mensual de las vigas ..	78
Tabla 3.16 Costo de la energía consumida por equipo.....	79
Tabla 3.17 Costos de los equipos de seguridad necesarios .....	79
Tabla 3.18 Costo total de producción mensual.....	79
Tabla A.1 Ficha técnica de la Tamizadora.....	88
Tabla A.2 Ficha técnica de la Estufa .....	88
Tabla A.3 Ficha técnica de la Balanza .....	88
Tabla A.4 Ficha técnica de la Extrusora .....	89
Tabla A.5 Ficha técnica de la Inyectora.....	89
Tabla A.6 Ficha técnica de la Máquina Universal de Ensayos 10 KN.....	89
Tabla A.7 Ficha técnica del Chiller .....	90
Tabla A.8 Ficha técnica del Analizador Térmico DSC .....	90
Tabla C.1 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra A (100% rHDPE).....	97
Tabla C.2 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN).....	97
Tabla C.3 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER) .....	98

Tabla D.1 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla A (100% rHDPE) .....	99
Tabla D.2 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla A (100%rHDPE) .....	99
Tabla D.3 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN) .....	99
Tabla D.4 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN) .....	100
Tabla D.5 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER) .....	100
Tabla D.6 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER) .....	100
Tabla E.1 Resultados del ensayo de impacto para cada una de las probetas de la mezcla A (100%rHDPE) .....	101
Tabla E.2 Resultados del ensayo de i .....	101
Tabla E.3 Resultados del ensayo de impacto para cada una de las probetas de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER) .....	101
Tabla F.1 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE puro .....	102
Tabla F.2 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE + CA + RETAIN .....	102
Tabla F.3 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE + CA + LOTADER .....	103

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Según la información más actualizada y registrada por el Instituto Nacional de estadística y censos (INEC) para la Gestión de Residuos Sólidos hasta el año 2018, los desechos plásticos conforman el 11.4% del total de los residuos sólidos en Ecuador. Por lo tanto, se estima una cantidad de 530.07 toneladas anuales de desechos plásticos considerando que, en el 2018, se recolectaron aproximadamente 12.739 toneladas de residuos sólidos al día en el país. (Censos, 2018)

El plástico, aparte de constituir el mayor porcentaje entre los residuos sólidos inorgánicos, es altamente contaminante para el ambiente. Según el último informe del Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (PNUMA), uno de los principales problemas ambientales del planeta en 2019 fue la contaminación por plástico (Ecuador, 2020). Por otra parte, según la revelación de la ONU en el día del medio ambiente del 2018, solo un 9% de todo el residuo plástico es reciclado. Del 91% restante, 12% es incinerado y 79% se encuentra esparcido en el medio ambiente.

A nivel nacional, Ecuador solo recicla un 4% de todos los desechos generados, el 96% restante es enterrado en los rellenos especiales para la basura. Guayaquil es la ciudad que más desperdicios diarios genera, su relleno 'Las Iguanas' recibe 3.395 toneladas diarias de basura, el cual en términos económicos se traduce a una inversión de \$169.759 diarios, considerando que el costo de enterrar una tonelada de basura es de \$50 en promedio (Morán, 2020).

Hoy en día, debido a la crisis sanitaria provocada por la pandemia del Coronavirus, el problema de la generación de desechos plásticos ha incrementado en exceso. En los hogares, debido a las restricciones impuestas por la pandemia, el consumo de plásticos desechables aumentó por la preferencia de comida procesada y contenida en recipientes plásticos, el incremento de pedidos de envío a domicilio que requieren de recipientes plásticos en el caso de pedidos de alimento, y de embalajes en el caso

de otros productos de comercio. Como consecuencia a esto, la Asamblea Nacional ha recurrido a proyectos que controlen la contaminación por plástico, entre estos la aprobación de la Ley Orgánica para la racionalización, reutilización y reciclaje de plásticos de un solo uso en el comercio (Universo, 2020).

Por otra parte, uno de los problemas ambientales que existe en el campo agroindustrial nacional es el poco uso que se les ofrece a los residuos orgánicos industriales como el tamo de arroz, aserrín de madera, bagazo de caña de azúcar, raquis de palma africana, subproductos del desfibrado de plantas como la cabuya, ciscos de café, entre otros. Si bien es cierto, existen industrias que aprovechan estos desechos como biomasa para generación de energía eléctrica; sin embargo, este proceso es altamente contaminante para el medio ambiente debido a los gases emitidos por la incineración de dichos residuos. Por tal motivo, en los últimos años se ha orientado el uso de estos desechos agroindustriales como refuerzo de matrices poliméricas recicladas para el origen de nuevos materiales como la madera plástica.

Entre el extenso grupo de fibras naturales como refuerzo para matrices poliméricas, el aserrín de madera fue el primero en estudiarse en este campo y por ende es el único que tiene un mercado establecido con productos ya comerciales. Los polímeros reforzados con aserrín tuvieron su patente en 1971 como resultado de las ventajas económicas, ambientales y mecánicas que estos presentaron (García D. I., 2003). Posteriormente, y hasta la actualidad, se han realizado nuevos estudios de polímeros reforzados con fibras naturales, los cuales presentaron otras ventajas que el aserrín de madera no posee como es la resistencia a factores ambientales y menor dificultad en su procesamiento.

### **1.1 Definición del problema**

Actualmente, la tendencia de la mayoría de las empresas para la innovación de sus productos se enmarca dentro del modelo de 'Economía circular', el cual integra en una sola unidad los aspectos económicos, sociales y ambientales a corto, medio y largo plazo. Los excesivos desperdicios de recursos no renovables y orgánicos no son un problema específicamente local, sino global, el cual ha ido incrementando paulatinamente con el paso de los años,

aportando significativamente a la contaminación terrestre y marina. Entre estos desperdicios, el plástico es el más contaminante y el más frecuente. Una de las propuestas enmarcadas dentro de la Economía circular para reducir el impacto ambiental, es la recuperación y reutilización de dichos residuos como materia prima reciclada para ser reincorporados en nuevos procesos industriales y generar nuevos productos.

Implementar una nueva alternativa utilizando polímeros reciclados reforzados con residuos orgánicos como materia prima para el procesamiento de nuevos productos plásticos es bastante tentativo. Sin embargo, a nivel industrial, se carece de conocimiento sobre la cantidad de energía que esta demanda, lo cual es un factor importante a la hora de establecer la relación costo beneficio que esta alternativa ofrece para las macro industrias interesadas en implementar este nuevo proceso en su catálogo.

## **1.2 Justificación del proyecto**

Los costos de proceso de extrusión se deben a un 50% el costo de materia prima y 25% los costos de energía. En cuanto a la materia prima, en la actualidad, la economía circular promueve el reciclaje de plásticos para desarrollar nuevos materiales y productos. El provecho que se obtiene de los procesos de reciclado es fuertemente dependiente de su correcto procesamiento.

Debido a la capacidad que poseen los polímeros para ser transformados, incluir fibras vegetales como parte de su estructura permite crear materiales reforzados que pueden ser usados como alternativa sostenible para el diseño y fabricación de productos generalmente elaborados a partir de la madera como materia prima.

Alrededor del 60% de los plásticos contenidos en los residuos sólidos urbanos son Polietileno y polipropileno (Carlos Córdoba, 2010). Para este estudio se ha escogido el uso de Polietileno de alta densidad reciclado (RHDPE) como el polímero base debido a la accesibilidad que la institución posee de este

material. En base a estudios previos realizados en los laboratorios del Centro de Investigaciones en Procesamiento de Polímeros de la Universidad de los Andes, se evaluó el desempeño de tres tipos de fibras orgánicas como refuerzo en una matriz de polietileno de alta densidad (cascarilla de arroz, el aserrín de madera y el cisco de café), las cuales demostraron una buena compatibilidad con el rHDPE. Sin embargo, debido a que se tiene suficientes estudios con respecto al aserrín de madera, se ha escogido la cascarilla de arroz como la fibra reforzante de la matriz polimérica considerando que es un residuo orgánico altamente generado a nivel Nacional comparado con los residuos de café.

Actualmente, el reemplazo de la madera por materiales poliméricos reforzados posee un campo de aplicación que, como elemento estructural, se enfoca únicamente en la construcción de elementos ornamentales de viviendas (cercas, diseños rústicos de interiores, etc.); mas no existen aplicaciones de la madera plástica como elemento estructural principal para una vivienda. Es por esto que cumplir con los objetivos de este proyecto puede llegar a tener un gran impacto comercial al reemplazar el uso de vigas de madera como elementos de construcción para viviendas, además de extender la aplicabilidad de la madera plástica y su vez la de los materiales reciclados.

Por otra parte, siendo la energía un segundo rubro de importancia en el procesamiento de plásticos, es imprescindible realizar un estudio que permita conocer el efecto sobre la eficiencia térmica que tendría la implementación de un refuerzo de cascarilla de arroz como fibra vegetal y diferentes aditivos comerciales al polietileno de alta densidad reciclado.

Como en el consumo de energía se considera el conocimiento de todo el voltaje o potencia de toda la máquina, es necesario analizar el impacto del empleo de los diferentes compatibilizadores en el consumo de energía en función de Joules, capacidades de transporte de la maquina (kg/h) y el consumo de energía específico en J/kg y sus propiedades mecánicas. Al final, se pretende conocer el consumo de energía con los diferentes aditivos y

propiedades resultantes del polietileno reciclado reforzado con la adición de la cascarilla de arroz. Todo esto con la finalidad de comprobar la factibilidad del diseño de una viga elaborada a partir del material con las mejores propiedades resultantes.

Este proyecto se enmarca dentro de la tendencia de la economía circular ya que busca ahorrar materia prima virgen usando materia prima reciclada y desechos agroindustriales, también busca un ahorro energético en el procesamiento de dichos materiales, y finalmente desarrolla una alternativa sostenible al uso de la madera en la construcción de soportes para viviendas.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una viga de polietileno reciclado reforzado con cascarilla de arroz, mediante el procesamiento eficiente de la materia prima, utilizando la técnica de extrusión de tornillo simple y los ensayos para las evaluaciones de las propiedades mecánicas requeridas, con la finalidad de reemplazar el uso de la madera como soporte de techo de viviendas.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Medir la temperatura de salida del material del dado de la extrusora mediante cámara infrarroja. (Ingeniería en Ciencias de los materiales)
2. Cuantificar en tiempo real el consumo de energía para cada mezcla procesada en la extrusora mediante el uso de un equipo de medición de poder. (Ingeniería en Electrónica y Automatización)
3. Verificar los efectos del refuerzo de la cascarilla de arroz, el empleo de tres aditivos comerciales diferentes y su respectivo consumo de energía. (Ingeniería en Ciencias de los materiales)
4. Comparar las propiedades mecánicas de las distintas combinaciones del rHDPE con/sin refuerzo de cascarilla y aditivos, bajo las condiciones de operación definidas. (Ingeniería Mecánica)
5. Seleccionar la mezcla óptima como materia prima para el diseño de una viga de soporte para el techo de una vivienda. (Ingeniería Mecánica)

6. Simular mecánicamente el comportamiento de una viga en condiciones de servicio con las propiedades obtenidas a partir de los ensayos realizados a la probeta de rHDPE/CA. (Ingeniería Mecánica)

En el siguiente proyecto se presentará la creación de un nuevo material a partir del uso de los desechos no renovables, como es el polietileno reciclado, generados por las macro industrias de plástico y reforzado con desechos orgánicos, como lo es la cascarilla de arroz, para el diseño de vigas de madera plástica como soporte de techo de viviendas. Al mismo tiempo, se mostrará el consumo de energía que el procesamiento de este nuevo material demanda.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 Madera Plástica o WPC**

La madera plástica o WPC (Wood Polymer Composites) es el material que se obtiene a partir del reciclaje de los residuos plásticos, los cuales son generalmente reforzados con otros residuos sólidos urbanos (papel, cartón, etc.) o residuos orgánicos generados por las industrias agrícolas y madereras. La madera fabricada a partir del plástico reciclado está caracterizada por poseer componentes 100% reciclados y reciclables, lo cual lo convierte en un material altamente ecológico al evitar la tala de árboles para la obtención de materia prima virgen (Restrepo, 2014).

### **1.4.2 Proceso de Extrusión**

El proceso de extrusión es un método de procesamiento de plásticos que permite el moldeo de los mismos para generar perfiles de sección transversal deseados. El proceso principal consiste en fundir el material termoplástico sólido a partir del calor generado por las resistencias térmicas ubicadas en el exterior del canal cilíndrico y por la difusión viscosa generada a partir de la fricción entre el material y el tornillo helicoidal giratorio de la extrusora.

### 1.4.3 Extrusora de Tornillo Simple

La extrusora de tornillo simple es la más común entre los extrusores. Está compuesto por la tolva, donde se ingresa el polímero en forma de partículas, el cilindro de metal, donde se encuentra el tornillo helicoidal que transforma al polímero en una masa compacta con la ayuda de las resistencias eléctricas y la transporta hasta la boquilla, elemento final conocido también como dado, donde se genera la presión máxima y la forma del perfil deseado.

### 1.4.4 Consumo de energía en la extrusión

#### Balance de energía en el extrusor

Es necesario conocer el modelo de una extrusora basado en su conservación de energía, donde la energía requerida para la fusión y formación del material a través de las zonas de mezclado ( $E_{util}$ ), se expresa como:

$$E_{util} = E_{entrada} - E_{pérdidas} \quad (1.1)$$

En esta expresión,  $E_{entrada}$  es la energía de entrada proveniente de la energía eléctrica asociada a los diferentes dispositivos del equipo de extrusión como el motor de accionamiento del tornillo helicoidal, las resistencias eléctricas, los sensores de control de temperatura y velocidad, la bomba de agua, etc.  $E_{pérdidas}$  es la energía que se pierde como fricción durante la transmisión y calor por conducción, convección y radiación a través de los dispositivos que consumen energía (Chamil Abeykoon, 2013).

#### Eficiencia Termodinámica del extrusor

Se la puede determinar a partir de la comparación entre la energía real consumida por la extrusora y la energía teórica requerida para el procesamiento del polímero y está dada por la siguiente expresión:

$$\eta_{e,t} = \frac{\dot{M} * \Delta h}{E_{entrada}} * 100\% \quad (1.2)$$

Donde  $\eta_{e,t}$  es la eficiencia termodinámica del extrusor,  $\dot{M}$  el caudal másico, y  $\Delta h$  el cambio de entalpía generada en la fusión (supuesta a presión constante) y formación (supuesta a temperatura constante).

#### **1.4.5 Ensayo de Tracción**

En este ensayo se pueden obtener las propiedades mecánicas de un material como el esfuerzo de fluencia, último y de fractura, la elongación y el módulo de Young que indican la ductilidad y la rigidez del material respectivamente, y finalmente el área bajo la curva que representa la energía absorbida por el material o tenacidad

#### **1.4.6 Calorimetría Diferencial de Barrido**

Es una técnica que permite determinar la cantidad de calor que una sustancia libera o absorbe a temperatura constante durante un intervalo de tiempo determinado. De esta forma es posible identificar los componentes de una muestra mediante la determinación de sus puntos de fusión.

#### **1.4.7 La Madera como material de construcción**

Para la construcción interna y externa de una vivienda a base de madera, debe distinguirse 2 categorías de este material. En la primera categoría, denominada Madera Estructural, se encuentra todo el material cuya aplicación tiene fines resistentes, pues constituyen la estructura base de la vivienda. Dentro de esta categoría se encuentran principalmente las columnas, los entramados de muros, techos y los pisos elevados. En la segunda categoría, denominada Madera no estructural, se encuentra todo el material cuya aplicación no requiere la resistencia de cargas importantes. Entre estos se encuentran las puertas, ventanas, revestimientos, etc. (JUNAC, 2000).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La elaboración general de este proyecto se llevó a cabo en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP). La preparación de la fibra orgánica se la realizó en el Laboratorio de Bioplásticos, también ubicada en FIMCP. La caracterización y análisis de las propiedades mecánicas de los productos obtenidos se realizó en el Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales (LEMAT). El proceso de diseño que se siguió es una adaptación del modelo de Pahl y Beitz, el cual denota la identificación del problema, el diseño conceptual, preliminar y detallado, gracias al cual se detallan las diferentes fases para dar una posible solución a un problema determinado.

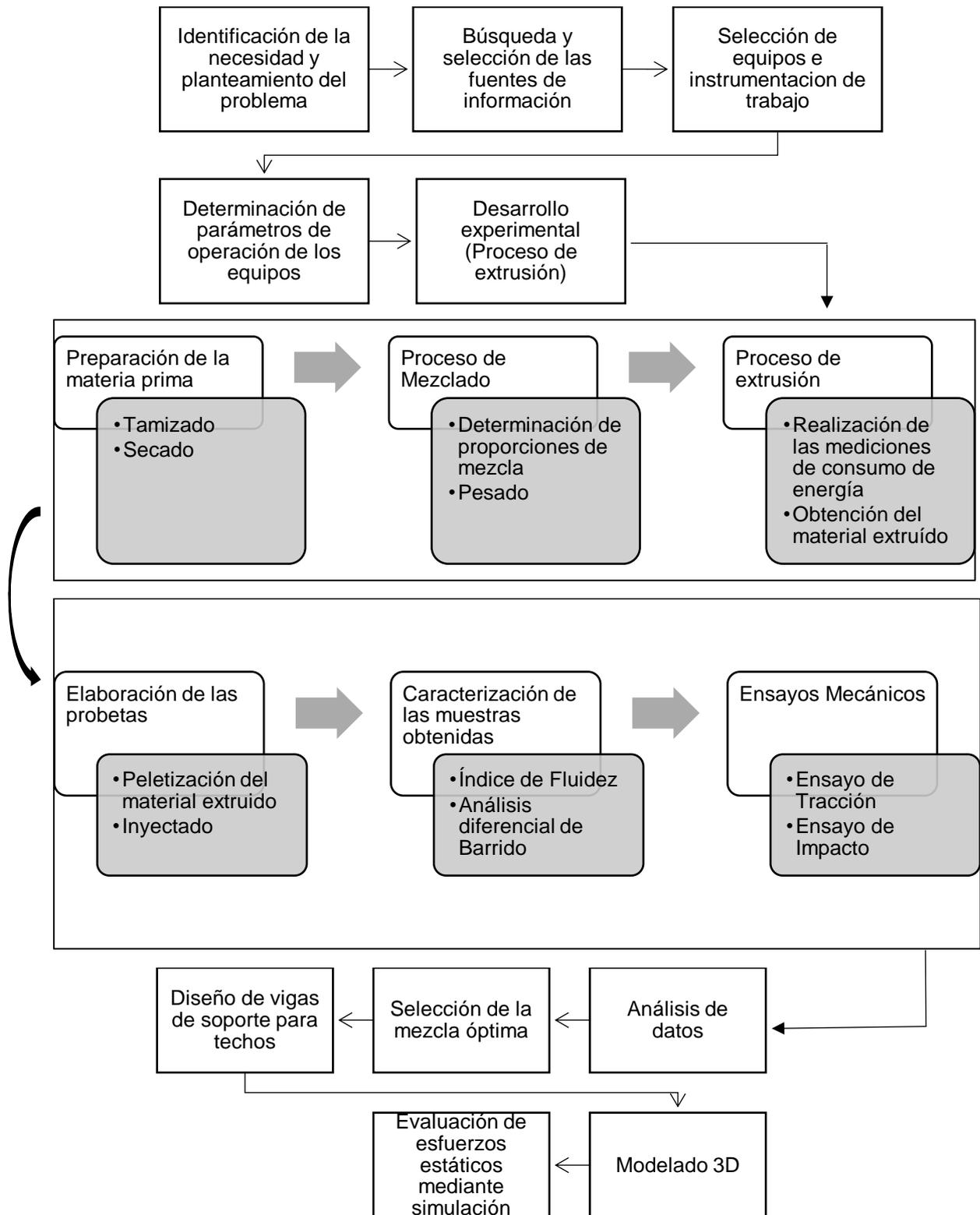


Figura 2.1 Diagrama de Metodología de diseño para el diseño de vigas de polietileno reciclado reforzado con cascarilla de arroz para soportes de techos de viviendas

Fuente: Elaboración Propia

## 2.1 Diseño Conceptual

### 2.1.1 Establecimiento de Objetivos

Para esto se hizo uso de la herramienta de diseño “Árbol de Objetivos”, el cual jerarquiza los objetivos de tal manera que en el primer nivel se encuentra el tema del diseño, en el segundo nivel se encuentran los objetivos principales, tercer nivel se encuentran los objetivos secundarios, derivados de los objetivos principales, y así sucesivamente (Véase ilustración 2.2).

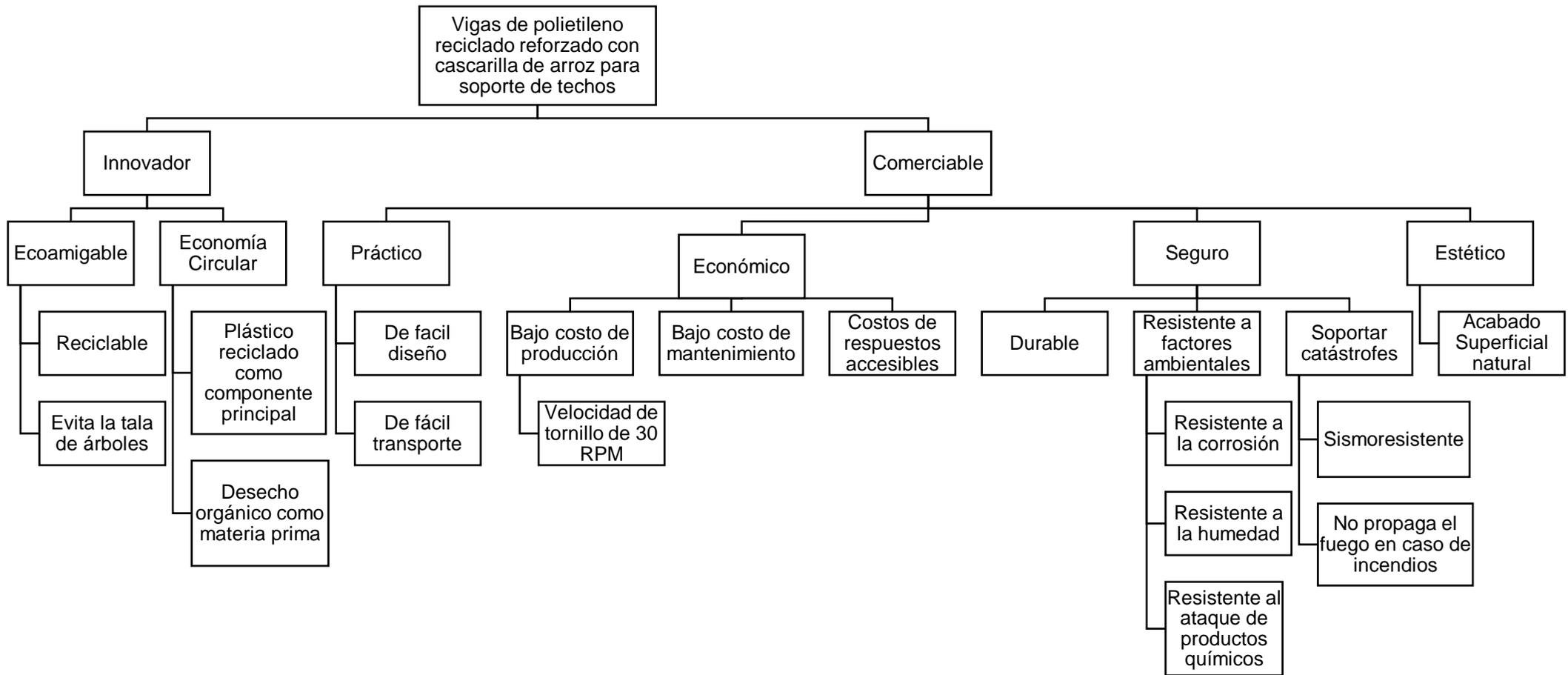
También se hizo uso de la tabla de comparación por pares para ordenar los objetivos principales en base a su importancia. Para indicar que el objetivo de la columna es más importante que el objetivo de la fila, se designa el número “1”, caso contrario, de considerar el objetivo de la fila más importante que el objetivo de la columna, se designa el número “0” en el respectivo casillero.

**Tabla 2.1 Cuadro de comparación por pares para los objetivos de primer nivel**

Metas	Innovador	Comerciable	Total
Innovador	1	1	2
Comerciable	0	1	1

Fuente: Elaboración Propia

Considerando el valor de “2” como el más importante y “1” como el de menor importancia (pero no insignificante), se obtuvo que el objetivo de primer nivel con más grado de importancia es el ser innovador.



**Figura 2.2. Árbol de Objetivos**  
 Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.2 Cuadro de comparación por pares para los objetivos de segundo nivel**

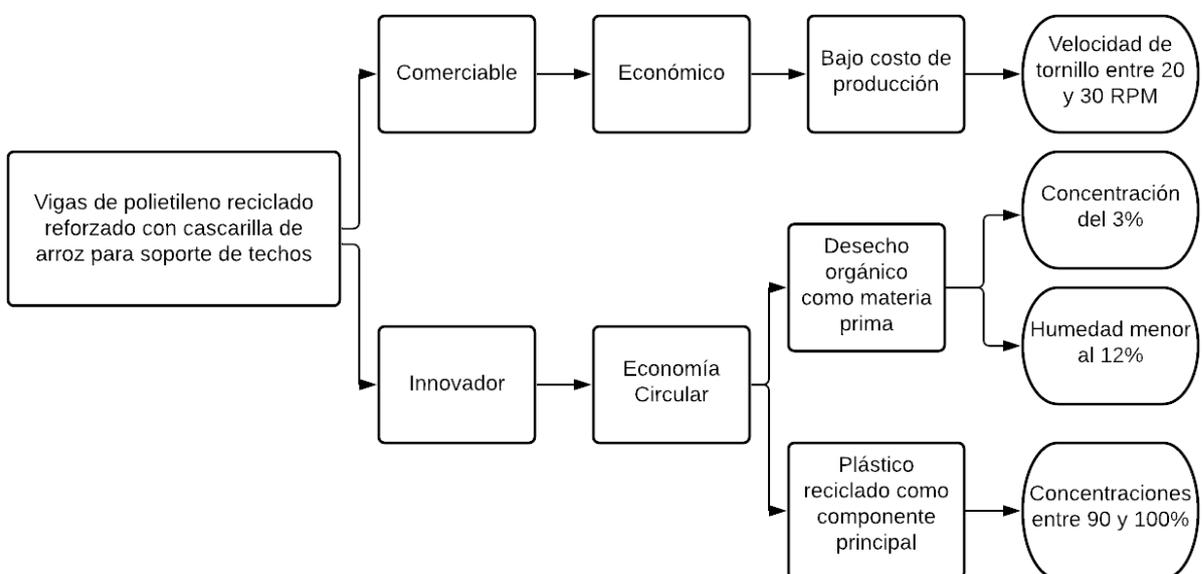
Metas	Ecoamigable	Práctico	Seguro	Estético	Económico	Total
<b>Ecoamigable</b>	1	1	0	1	1	4
<b>Práctico</b>	0	1	0	1	0	2
<b>Seguro</b>	1	1	1	1	1	5
<b>Estético</b>	0	0	0	1	0	1
<b>Económico</b>	0	1	0	1	1	3

Fuente: Elaboración Propia

Considerando el valor de “5” como el más importante y ‘1’ como el de menor importancia (pero no insignificante), se obtuvo que el objetivo con más grado de importancia es el de seguridad.

### 2.1.2 Establecimiento de restricciones

Para el establecimiento de las restricciones se hizo uso el árbol combinado, el cual combina objetivos y restricciones. Los objetivos son enmarcados en cuadros rectangulares mientras que las restricciones son enmarcadas en cuadros de bordes suaves.

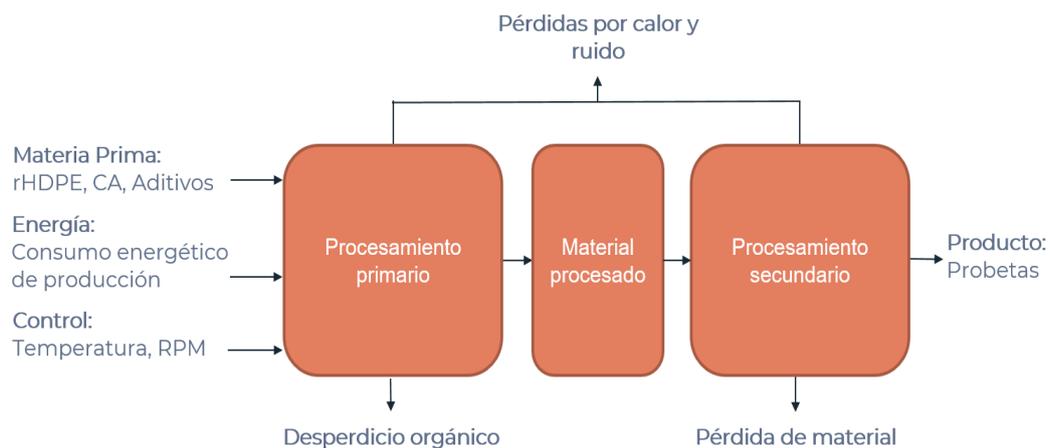


**Figura 2.3 Árbol combinado (Objetivos y Requerimientos)**

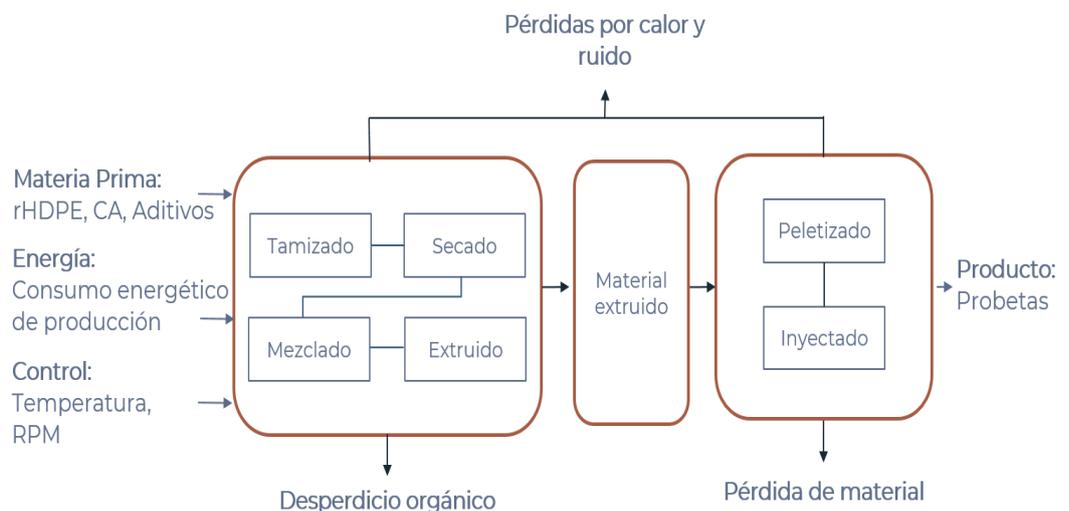
Fuente: Elaboración Propia

### 2.1.3 Establecimiento de Funciones

Para establecer las funciones que el diseño debe realizar, se hizo uso de las herramientas “caja negra” y “caja transparente”, donde la caja hace referencia al proceso central de transformación de los insumos en productos. La caja “negra” es utilizada cuando se desconoce el proceso interno, y la caja “transparente” se utiliza cuando dichos procesos son conocidos.



**Figura 2.4 Diagrama de caja negra**  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.5 Diagrama de la caja transparente**  
Fuente: Elaboración Propia

#### **2.1.4 Propuestas de alternativas de solución**

En Guayaquil podemos encontrar el soplado de botellas, la extrusión de fundas y la inyección de tapas como las principales fuentes de plástico reciclado por lo que se escogieron estas tres alternativas para el análisis de selección.

#### **2.1.5 Selección de la mejor alternativa**

La selección de la mejor alternativa se dio a partir de la elaboración de una matriz de decisión con las alternativas anteriormente definidas y los criterios planteados a partir de la definición de las funciones. Los criterios de selección y su justificación se detallan a continuación:

- Disponibilidad: Que hace referencia a la facilidad de encontrar la materia prima.
- Costo: Se refiere netamente al costo de la materia prima.
- Procesabilidad: Se entiende como la facilidad con la que un material puede pasar por un proceso determinado.
- Grado de calidad del polietileno: Representa la calidad de la materia prima, su degradación y propiedades.

En cuanto a la disponibilidad del material y según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INEC), Guayaquil es la ciudad con el mayor índice de producción de desechos plásticos llegando a generar hasta 100 toneladas diarias; además, se reporta un consumo anual aproximado de 225 botellas por ciudadano de las cuales solamente el 10% se reciclan. Por otro lado, Ecuador emplea cerca de 257 millones de fundas plásticas por año y según las estadísticas, una persona utiliza alrededor de 6 a 7 fundas mensualmente. Por último, en cuanto al reciclaje de tapas no se tiene datos concretos de su disponibilidad, ya que por el momento solo existen campañas incipientes que fomenten este tipo de reciclaje por lo que se consideró una fuente poco disponible.

Algo muy importante a tener en cuenta es la época de Coronavirus que estamos viviendo actualmente. Las tareas de reciclaje han sido truncadas por la emergencia sanitaria ya que los recicladores informales se han visto forzados a parar sus labores y permanecer en sus domicilios, por lo que los

centros de acopio han recibido menor volumen de reciclado. Aun así, al hacer la comparación se pudo determinar que el grado del polietileno con mayor disponibilidad en la ciudad de Guayaquil correspondería al soplado de botellas, y, a pesar de existir una mayor cultura en el reciclaje de fundas, en contraste con el de tapas, el volumen que se necesita para hacer viable esta alternativa es elevado debido a su peso liviano.

El criterio del costo va estrechamente ligado al peso de la materia prima ya que los precios de los centros de acopio y recicladoras se determinan por el kilo de reciclado. En Guayaquil, se aproxima que el costo de 25 botellas (un kilo) va entre los \$0,60 y \$0,65. Para el caso de las fundas plásticas, según un estudio de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, el costo del kilo está alrededor de los \$0,45, mientras que el kilo de tapas de botella es aproximadamente \$0,55.

Para describir el criterio de procesabilidad es necesario tener en cuenta que la materia prima que se debe ingresar por la tolva de la extrusora debe ser en forma de pellets. Se definió que las botellas y tapas plásticas presentan una mayor procesabilidad ya que ESPOL cuenta con el equipo necesario para “picar” este material y transformarlo en pellets; sin embargo, no presenta la maquinaria adecuada para procesar las fundas plásticas y hacerlas pellets.

Por último, en cuando al grado de calidad, la materia prima que pasa por un proceso de extrusión y soplado utiliza material de elevado peso molecular, lo cual proporciona al producto alta viscosidad y resistencia al impacto. Por otro lado, los productos que pasan por un proceso de inyección tienen un mejor manejo del espesor y del peso ya que suelen ser más ligeros. El gradiente de presión utilizado permite una mezcla homogénea lo cual aumenta sus propiedades mecánicas y, por tanto, aumenta su grado de calidad.

**Tabla 2.3 Tabla de comparación por pares para los criterios de selección**

	Disponibilidad	Costo	Procesabilidad	Grado de calidad	Total	%
<b>Disponibilidad</b>	1	1	1	1	4	40
<b>Costo</b>	0	1	1	1	3	30
<b>Procesabilidad</b>	0	0	1	1	2	20
<b>Grado de calidad</b>	0	0	0	1	1	10

Fuente: Elaboración Propia

Considerando el valor total de “4” como el de mayor importancia y “1” como el de menor importancia (pero no insignificante), se obtuvo que el criterio de selección con más peso en porcentaje es el de disponibilidad.

**Tabla 2.4 Criterio de ponderación cualitativo y cuantitativo para cada alternativa**

Condición	Calificación
Excelente	5
Muy bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Malo	1

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.5 Matriz de decisión del grado del polietileno**

Alternativas Criterios	%	Soplado de botellas		Extrusión de fundas		Inyección de tapas	
		Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
<b>Disponibilidad</b>	40	5	2	2	0.8	3	1.2
<b>Costo</b>	30	3	0.9	5	1.5	4	1.2
<b>Procesabilidad</b>	20	4	0.8	1	0.2	4	0.8
<b>Grado de calidad</b>	10	4	0.4	4	0.4	5	0.5
		<b>TOTAL</b>	<b>4.10</b>	<b>TOTAL</b>	<b>2.90</b>	<b>TOTAL</b>	<b>3.70</b>

Fuente: Elaboración Propia

La alternativa ganadora para el grado del polietileno a utilizar fue el obtenido a partir del soplado de botellas.

## 2.2 Diseño Preliminar

### 2.2.1 Materia Prima

La materia prima para el polímero base de para esta investigación fue donado por la empresa de reciclaje de plásticos “Nutec Recycle” ubicado en la ciudad de Guayaquil. La cantidad de materia prima base del cual se tuvo disposición fue de 2 sacos de 25 kg cada uno, las cuales contenían rHDPE con un grado de polietileno por soplado de botellas.

### 2.2.2 Preparación de la Cascarilla de arroz (CA)

#### 2.2.2.1 Proceso de Tamizado

En este proceso, las partículas de la cascarilla de arroz fueron separadas en diferentes tamaños al ser pasadas por un filtro (tamiz) con el objetivo de tener un tamaño de partícula requerido para el proceso experimental, el cual, debido a los orificios de 45  $\mu\text{m}$  que posee los orificios del filtro de la extrusora, se determinó este mismo como el tamaño para las partículas de la cascarilla.

**Tabla 2.6 Masa pasante y retenida para cada uno de los tamices utilizados**

Carga Inicial= 400 g					
Tiempo de tamizado= 15 Min					
Tamiz (Mesh)	Abertura [ $\mu\text{m}$ ]	Masa retenida [g]	Masa Retenida [%]	Masa Pasante [g]	Masa Pasante [%]
No. 50	300	208.90	52.225	191.10	47.775
No. 80	180	98.00	24.5	93.10	23.275
No. 100	150	36.00	9	57.10	14.275
No. 140	106	0.10	0.025	57.00	14.25
No. 200	75	11.20	2.8	45.80	11.45
No. 325	45	17.00	4.25	28.80	7.2

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 2.6 presenta los porcentajes de masa retenida y pasante que se obtuvo luego de pasar manualmente la cascarilla por cada uno de los tamices requeridos.

### 2.2.2.2 Proceso de Secado

Posterior al proceso de tamizado de la cascarilla de arroz, se procedió a llevarlo a la estufa de secado ubicado en el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos de ESPOL (Véase en apéndices la tabla A.2 para la ficha técnica del equipo), donde se lo colocó sobre una bandeja de aluminio para secarlo durante 24 horas a una temperatura de 80°C con el objetivo de eliminar la humedad de la cascarilla.



Figura 2.6 Estufa SECAGEM

### 2.2.3 Proceso de mezclado

Tabla 2.7 Proporciones de las mezclas realizadas

	MEZCLA	rHDPE	CA	RETAIN	LOTADER
<b>A</b>	<b>rHDPE puro</b>	100 %	0 %	0 %	0 %
<b>B</b>	<b>rHDPE + CA</b>	97 %	3 %	0 %	0 %
<b>C</b>	<b>rHDPE + CA +RETAIN</b>	92 %	3 %	5 %	0 %
<b>D</b>	<b>rHDPE + CA +LOTADER</b>	92 %	3 %	0 %	5 %

Fuente: Elaboración Propia

Se emplearon 5 kilogramos como peso total de la mezcla puesto que la extrusora requería de esa cantidad mínima para su estabilización. Los

porcentajes detallados fueron establecidos en base a una investigación previa (Julio Gaona, 2019), y con ellos se establecieron los kilogramos para cada uno de los componentes por muestra, tal como se muestra a continuación:

**Tabla 2.8 Proporciones en Kilogramos de las mezclas realizadas**

MEZCLA		rHDPE	CA	RETAIN	LOTADER
		[Kg]	[Kg]	[Kg]	[Kg]
<b>A</b>	<b>rHDPE PURO</b>	5	0	0	0
<b>B</b>	<b>rHDPE + CA</b>	4.85	0.15	0	0
<b>C</b>	<b>rHDPE + CA +RETAIN</b>	4.6	0.15	0.25	0
<b>D</b>	<b>rHDPE + CA +LOTADER</b>	4.6	0.15	0	0.25

Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente, se procedió a pesar la materia prima correspondiente en la balanza (Véase en apéndices la tabla A.3 para la ficha técnica del equipo) para cada una de las mezclas en el Laboratorio de Bioplásticos.



**Figura 2.7 Balanza digital**

Las combinaciones que contenían diferentes componentes se realizaron en un bote de plástico para que cada uno de éstos se pueda mezclar de manera adecuada.



Figura 2.8 Mezclado manual

#### 2.2.4 Proceso de extrusión

Este proceso se realizó en la extrusora de tornillo simple del laboratorio de plásticos en las instalaciones de la ESPOL.



Figura 2.9 Extrusora

Para esto, fue necesario determinar las condiciones óptimas para obtener los resultados más eficientes.

**Tabla 2.9 Parámetros para de extrusora**

Parámetros		Valor	Unidades
Velocidad del tornillo		22	RPM
Zona de alimentación	Temperatura 1	170	°C
Zona de compresión	Temperatura 2	175	°C
	Temperatura 3	180	°C
Zona de dosificación	Temperatura 4	185	°C
	Temperatura 5	190	°C

Fuente: Elaboración Propia

La velocidad del tornillo fue determinada gracias a una investigación previa de la ESPOL (Rommel Humberto Salas Arévalo, 2018) en las que se concluyó que las velocidades mayores a los 30 rpm presentan productos con fallas superficiales. Por lo tanto, la velocidad óptima escogida para procesar rHDPE estuvo entre los 20 y 30 rpm, ya que a esta velocidad es cuando el proceso presentó menor consumo de energía y el producto tuvo una mayor cristalinidad, es decir, mejores propiedades mecánicas.

Para establecer las temperaturas de las diferentes zonas, se tomó en cuenta que el punto de fusión del polietileno reciclado de alta densidad está alrededor de los 132 °C y la degradación de la cascarilla se da a partir de los 180 °C. A pesar de eso, al mezclar el polietileno con un componente orgánico, su temperatura de termoformado se encuentra entre 180 °C y 200 °C, por lo que es necesario el empleo de agentes compatibilizadores que permitan una mejor homogenización y eviten la degradación temprana de la cascarilla de arroz, en el rango de temperaturas anteriormente mencionado. Debido a que en el proceso de extrusión es preciso que la mezcla pase por un calentamiento uniforme, las temperaturas que se escogieron empezaron en 170 °C en la zona 1 y aumentaron 5 °C hasta llegar a la 190 °C en la zona 5.

En este proceso, se tomaron los datos de temperatura y la presión del dado mediante el sensor instalado en el panel de la extrusora.



Figura 2.10 Sensores de temperatura de la extrusora



Figura 2.11 Sensores de presión de la extrusora

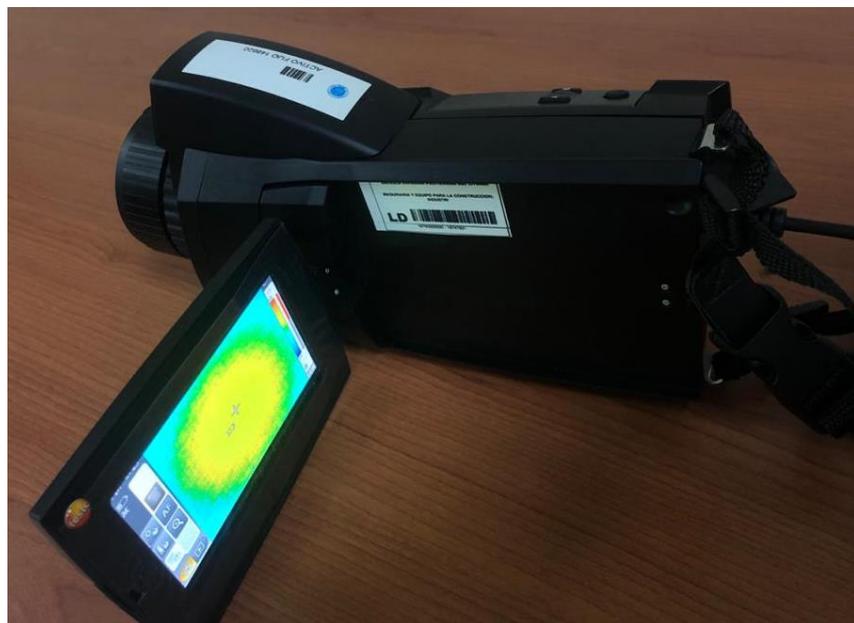
Por otra parte, se realizaron la toma de mediciones del consumo de energía (KW) del mismo por medio del equipo que fue instalado en el

panel de la extrusora, evitando el uso del equipo de medición de poder “Fluke” que se tenía previsto en un inicio.



**Figura 2.12** Equipo medidor de consumo energético

Así también, se tomó la temperatura a la salida del dado con la cámara infrarroja.



**Figura 2.13** Cámara infrarroja

En esta fase del diseño preliminar, se tuvieron ciertos imprevistos con respecto a la capacidad de extrusión de nuestro equipo, pues este presentó problemas en el procesamiento de la mezcla B donde se obtuvo inicialmente un material quemado y luego ya no se obtenía salida de material.

El problema identificado fue una obstrucción de cascarilla en el dado por la falta de coalescencia que poseen estas partículas con la matriz polimérica, por lo cual se decidió no procesar la mezcla de rHDPE+CA sin aditivo alguno.

**Tabla 2.10 Formato para el registro de los datos para cada una de las muestras durante el proceso de extrusión**

<b>Muestra:</b>	<b>Densidad:</b>				
<b>Intervalos de tiempo</b>	<b>5 min</b>	<b>10 min</b>	<b>15 min</b>	<b>20 min</b>	<b>Promedio</b>
<b>Masa [kg]</b>					
<b>Temperatura de salida [°C]</b>					
<b>Consumo de energía [kW]</b>					
<b>Consumo de energía [kWh]</b>					
<b>Consumo de energía [J]</b>					
<b>Consumo de energía específica [J/g]</b>					
<b>Presión [Pa]</b>					
<b>Temperatura de fundido [F]</b>					
<b>Caudal [cm<sup>3</sup>/s]</b>					

Fuente: Elaboración Propia

### **2.2.5 Proceso de peletizado**

Una vez extruida y enfriada la mezcla, se tomó el producto y se lo procesó para convertirlo en pellets por medio de la cortadora del Laboratorio de plásticos de la ESPOL.



Figura 2.14 Cortadora

## 2.2.6 Proceso de Secado de los pellets

Posterior a la peletización del material extruido, se secaron los pellets de las diferentes muestras en la estufa SECAGEM a una temperatura de 50°C durante 24 horas para extraer toda la humedad contenida en los mismos.

## 2.2.7 Ensayos reológicos

### 2.2.7.1 Índice de Fluides o MFI (Melt Flow Index)

Luego del proceso de trituración y secado del material extruido, se cortaron los pellets obtenidos en trozos más pequeños para evitar obstrucciones en el equipo de índice de fluides mediante el uso de unas tijeras de poda hasta obtener un total de 100 g. Posteriormente, se realizó la prueba reológica del índice de fluides para las diferentes muestras preparadas en las instalaciones de LEMAT. Las corridas se realizaron a una temperatura de 190 °C y una carga del pistón de 21,6 y 5 Kg, parámetros estandarizados por la norma ASTM D1238 – 20.



Figura 2.15 Equipo de índice de fluidez

### 2.2.7.2 Calorimetría Diferencial de barrido o DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Para la prueba de calorimetría diferencial de barrido fueron necesarios 10 g del material previamente cortado. El análisis se realizó en las instalaciones del laboratorio de plásticos de la ESPOL. El equipo realizó 4 corridas para obtener como resultado una gráfica de flujo de calor versus temperatura.



Figura 2.16 Equipo de ensayos DSC

## 2.2.8 Proceso de Inyección

Para obtener las probetas de las diferentes mezclas para los ensayos de tracción e impacto, se utilizó la técnica de inyección, para el cual se utilizaron los pellets ya previamente secados.



Figura 2.17 Inyectora

## 2.2.9 Ensayos Mecánicos

### 2.2.9.1 Ensayo de tensión

Para el ensayo de tracción de las probetas de las diferentes mezclas, se requirieron 10 probetas por cada grupo. Se percató de que todas las probetas preparadas por inyección cumplan con las dimensiones estandarizadas. Posteriormente, se hizo uso de la máquina de ensayos universal (Ilustración 2.18) para llevar a cabo la prueba de tracción bajo la norma ASTM D638 a una velocidad de ensayo de 500 mm/min. Se tuvo especial interés por determinar la resistencia a la tracción y módulo de Young del material.



Figura 2.18 Equipo de ensayos universales

### 2.2.9.2 Ensayo de impacto IZOD

Para el ensayo de impacto de las probetas de las diferentes mezclas, se requirieron entre 6 y 7 probetas que cumplieran con las dimensiones estandarizadas, para cada muestra. Posteriormente, se trasladaron las probetas a LEMAT para realizar el ensayo de impacto mediante el uso de la máquina de impacto IZOD (Ilustración 2.19) bajo la norma ASTM D 256 que proporciona 4 métodos distintos de ensayo, se escogió el método A (utilizado para materiales que poseen una Resistencia de impacto mayor a 27 J/m) con una energía de péndulo y de fricción de 11 y 0.039 J respectivamente y una velocidad de impacto de 3.5 m/s.



Figura 2.19 Equipo de ensayo de impacto IZOD

## 2.3 Diseño Detallado

### 2.3.1 Especificaciones de diseño

En este proyecto se propuso brindarle una aplicación al material obtenido. Esta aplicación busca ser sostenible y contribuir al sistema de economía circular mediante la reutilización de desechos como materia prima para la creación de nuevos productos industriales, con precios accesibles y características similares o superiores a las yacentes en el mercado ecuatoriano, beneficiando a las industrias dedicadas al procesamiento de plásticos y a la distribución de materiales de construcción mediante la innovación del catálogo de sus productos. Bajo esta premisa, se establecieron las limitaciones a considerar en el diseño de las vigas como soporte para los techos de viviendas.

Las vigas tuvieron una sección transversal de 100 x 230 mm<sup>2</sup> teniendo en cuenta las dimensiones recomendadas por el manual de diseño para maderas del grupo Andino y la disponibilidad de dichas dimensiones en el mercado ecuatoriano para vigas de madera estructural.

Para el diseño se consideró una vivienda del plan habitacional Socio Vivienda Guayaquil, las cuales cuentan con 38 m<sup>2</sup> de construcción.

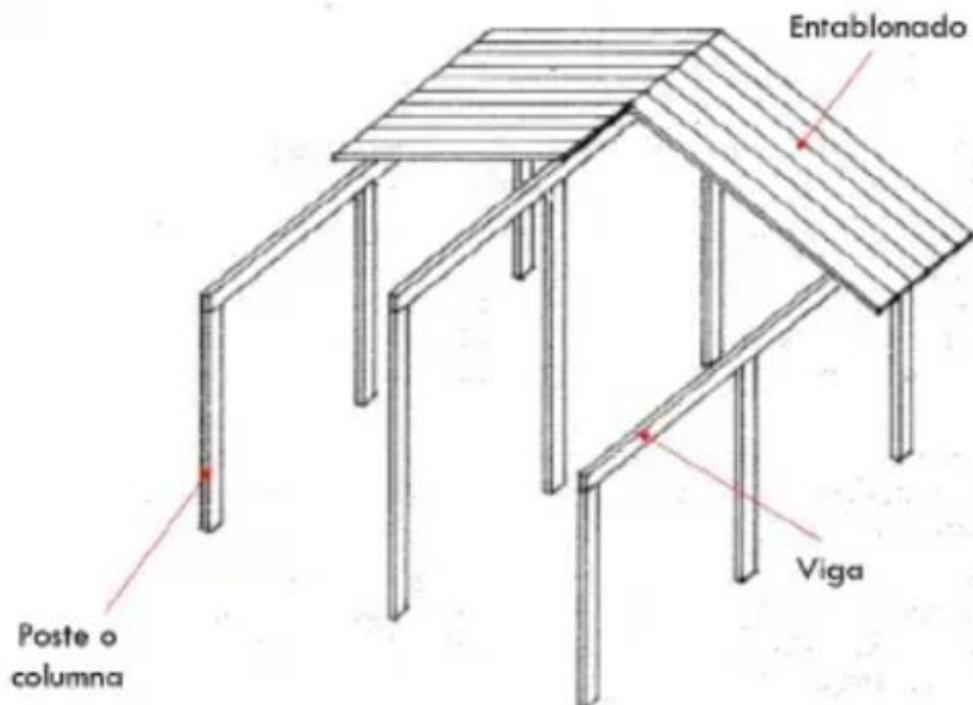


Figura 2.20 Sistema de poste y viga (JUNAC, 2000)

Para la distribución de la estructura se tomó el diseño planteado por Víctor Hugo Salazar Alvarado en la tesis “Vivienda con estructura de madera en la ciudad de Guayaquil” de la Universidad Espíritu Santo, en la cual se detallan los planos de construcción de una vivienda con sistema de poste-viga.

La modulación transversal de la vivienda se compuso de 3 columnas con una viga de 3 metros de largo entre ellas. Las vigas más críticas entre todas las que componen la estructura de la vivienda fueron las 2 centrales, puesto

que soportan cargas puntuales dadas por los extremos de 2 viguetas de madera y por lo tanto fueron las analizadas en este proyecto.

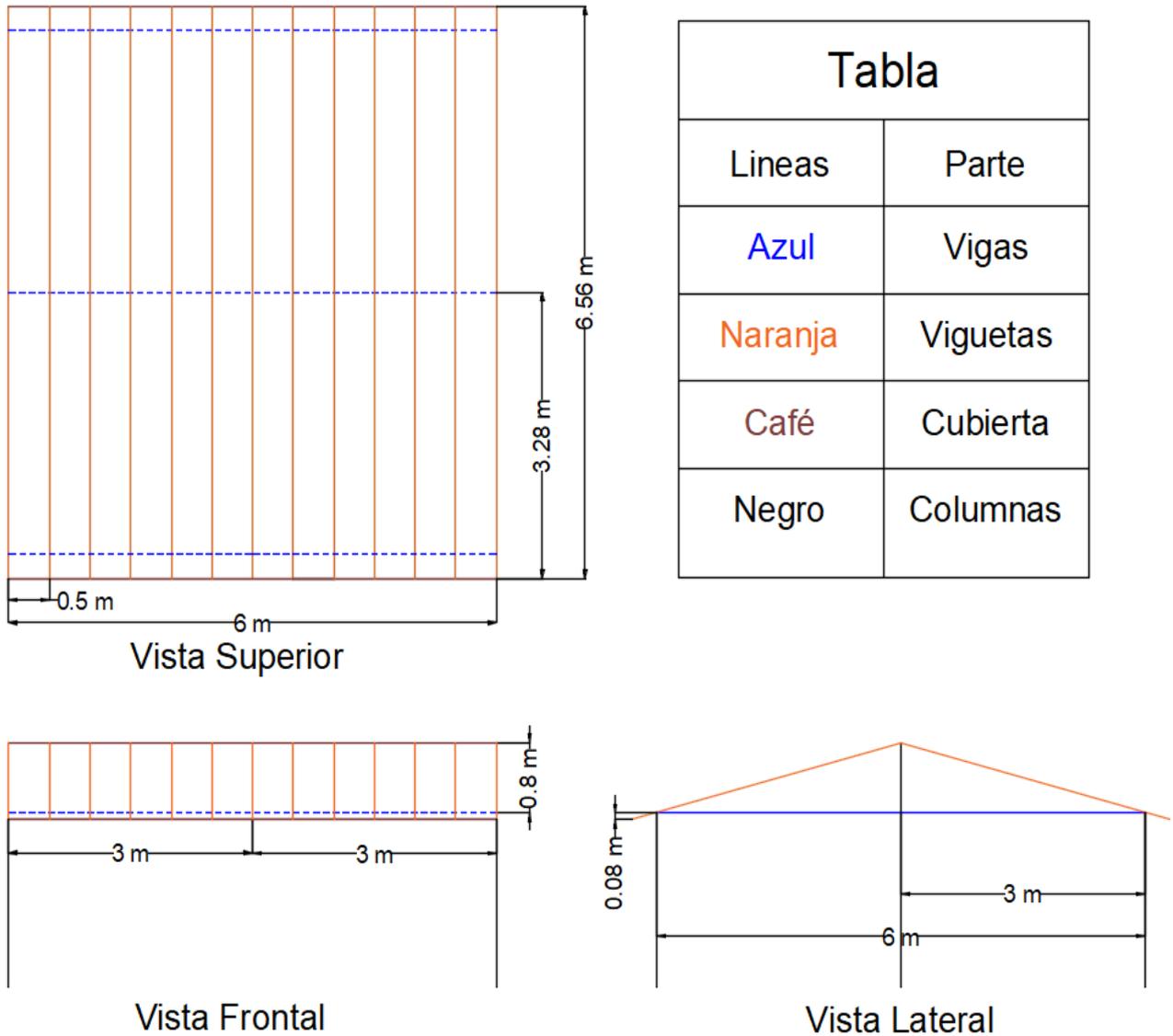
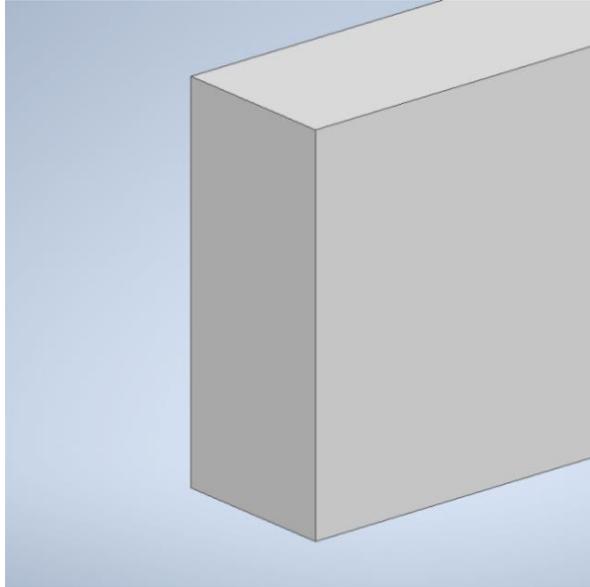


Figura 2.21 Estructura de la vivienda  
Fuente: Elaboración Propia

### 2.3.2 Diseño de forma

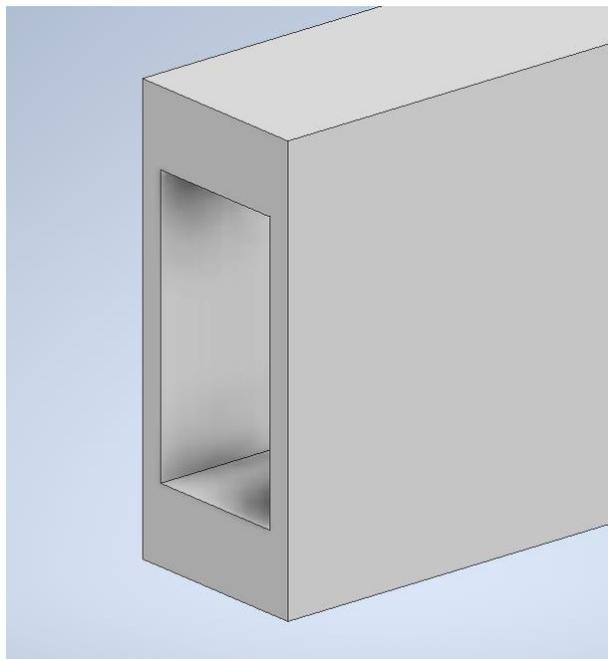
Los perfiles escogidos fueron el rectángulo sólido, rectángulo hueco, circulas sólido, circulas hueco y la sección IR.

**Alternativa 1: Sección rectangular sólida**



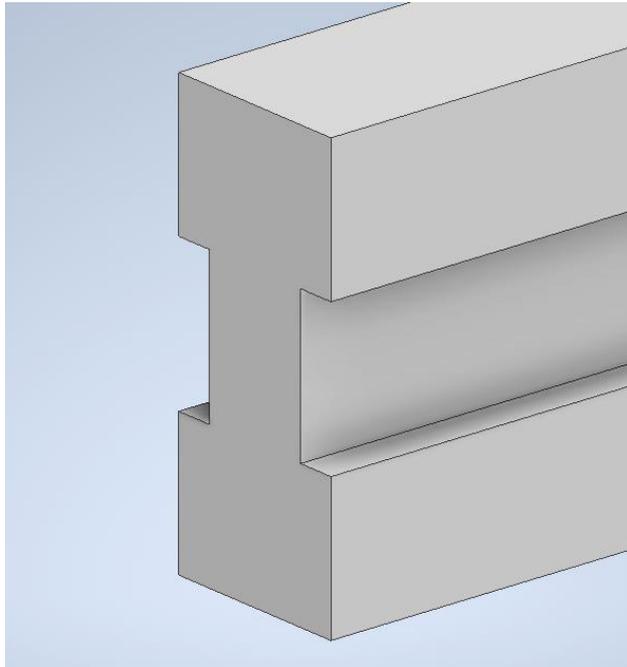
**Figura 2.22 CAD de la sección rectangular sólida**  
Fuente: Elaboración Propia

**Alternativa 2: Sección rectangular hueca**



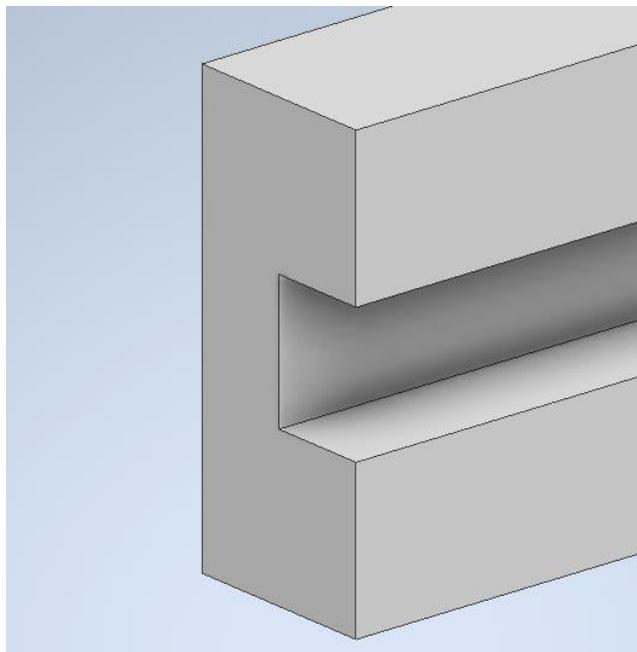
**Figura 2.23 CAD de la sección rectangular hueca**  
Fuente: Elaboración Propia

**Alternativa 3: Sección I**



**Figura 2.24 CAD de la sección I**  
Fuente: Elaboración Propia

**Alternativa 4: Sección Canal**



**Figura 2.25 CAD de la sección C**  
Fuente: Elaboración Propia

### Alternativa 5: Sección T

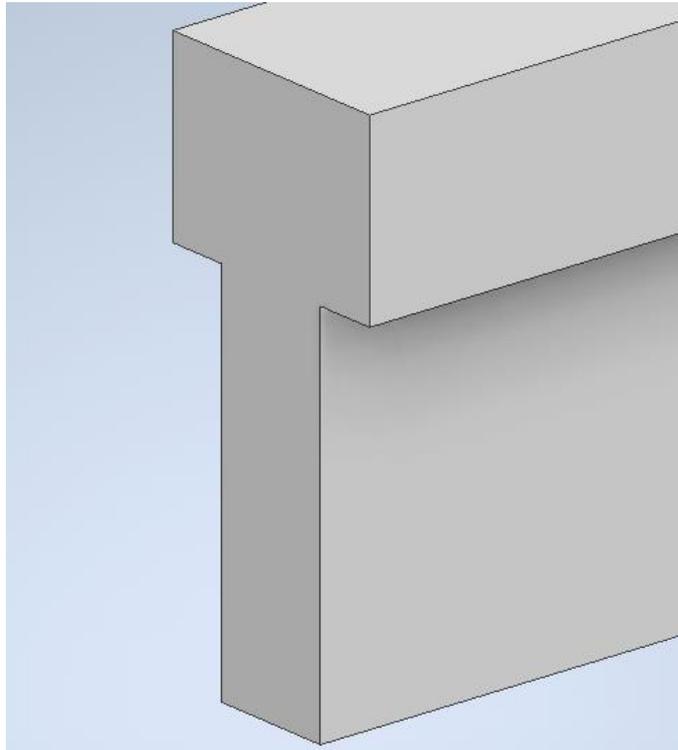


Figura 2.26 CAD de la sección T  
Fuente: Elaboración Propia

### 2.3.3 Determinación de las Inercias

Para calcular las inercias de las diferentes secciones transversales, se utilizaron las ecuaciones de cálculo de inercia mediante el uso del Teorema de Steiner o Teorema de ejes paralelos.

$$I_{total} = \sum(I_i + A_i d_i^2) \quad (2.1)$$

Donde:

$I_i$  = El momento de inercia del segmento individual alrededor de su propio centroide

$A_i$  = Área del segmento individual.

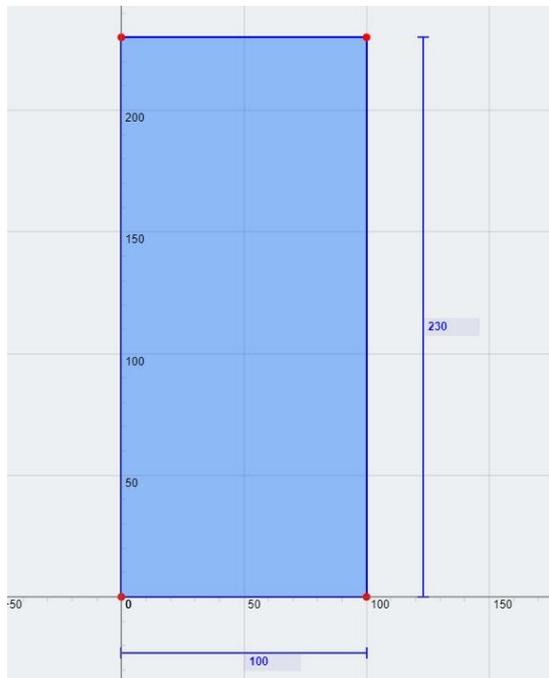
$d_i$  = Distancia vertical del centroide del segmento al eje neutro.

**Tabla 2.11 Variables utilizadas para el cálculo de centroides e Inercias para cada perfil**

Variables	Símbolos
Inercia total	$I_T$
Inercia del segmento 1	$I_1$
Inercia del segmento 2	$I_2$
Inercia del segmento 3	$I_3$
Área del segmento 1	$A_1$
Área del segmento 2	$A_2$
Área del segmento 3	$A_3$
Centroide	$\bar{y}$

Fuente: Elaboración Propia

**Sección rectangular sólida**



**Figura 2.27 Dimensiones sección rectangular sólida**

Fuente: Elaboración Propia

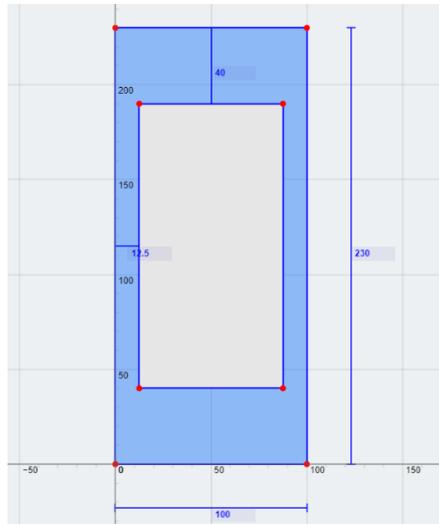
**Tabla 2.12 Dimensiones de la sección rectangular sólida**

Dimensiones	Valor [mm]
Altura	230
Base	100

Fuente: Elaboración Propia

$$I_T = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.2)$$

### Sección rectangular hueca



**Figura 2.28 Dimensiones sección rectangular hueca**  
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.13 Dimensiones de la sección rectangular hueca**

Dimensiones	Valor [mm]
<b>Segmento Sólido</b>	
<b>Altura</b>	230
<b>Base</b>	100
<b>Segmento Hueco</b>	
<b>Altura</b>	150
<b>Base</b>	75

Fuente: Elaboración Propia

$$I_T = \frac{(b_1 \cdot h_1^3) - (b_2 \cdot h_2^3)}{12} \quad (2.3)$$

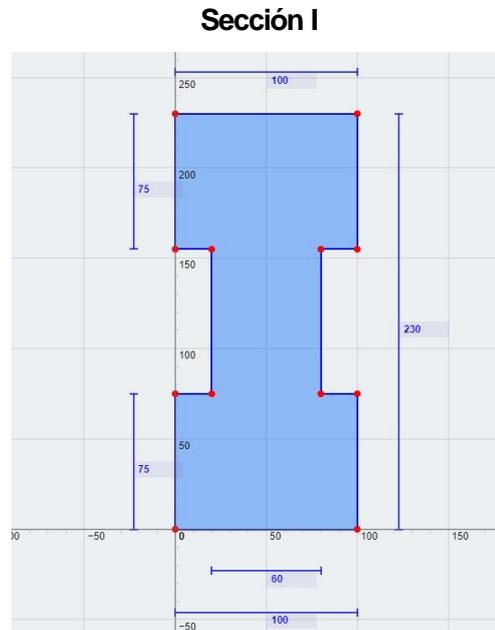
Para los siguientes perfiles fue necesario aplicar el teorema de Steiner para calcular la inercia, por lo cual inicialmente se determinó el centroide mediante la siguiente expresión:

$$\bar{y} = \sum \frac{A_i \cdot y_i}{A_i} \quad (2.4)$$

Donde:

$A_i =$  Area del segmento individual

$y_i =$  distancia del centroide del segmento individual a la línea de referencia



**Figura 2.29 Dimensiones sección I**  
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.14 Dimensiones de la sección I**

Dimensiones	Valor [mm]
<b>Segmento 1</b>	
<b>Altura</b>	75
<b>Base</b>	100
<b>Segmento 2</b>	
<b>Altura</b>	80
<b>Base</b>	60
<b>Segmento 3</b>	
<b>Altura</b>	75
<b>Base</b>	100

Fuente: Elaboración Propia

$$\bar{y} = \frac{(A_1 * y_1) + (A_2 * y_2) + (A_3 * y_3)}{A_1 + A_2 + A_3}$$

$$\bar{y} = \frac{((100 * 75) * 192.5) + ((60 * 80) * 115) + ((100 * 75) * 37.5)}{100 * 75 + 60 * 80 + 100 * 75}$$

$$\bar{y} = 115 \text{ mm}^2$$

Segmento 1 y 3:

$$I_{1,3} = \frac{b * h^3}{12} = \frac{100 * 75^3}{12}$$

$$I_{1,3} = 3515630 \text{ mm}^4$$

$$A_1 = 100 * 75 = 7500 \text{ mm}^2$$

Segmento 2:

$$I_2 = \frac{b * h^3}{12} = \frac{60 * 80^3}{12}$$

$$I_2 = 2560000 \text{ mm}^4$$

$$A_2 = 60 * 80 = 4800 \text{ mm}^2$$

Inercia total:

$$I_T = I_1 + A_1 d_1^2 + I_2 + A_2 d_2^2 + I_3 + A_3 d_3^2$$

$$I_T = 2(3515630 + 4800 * 77.5^2) + 2560000$$

$$I_T = 99685000 \text{ mm}^4$$

### Sección C

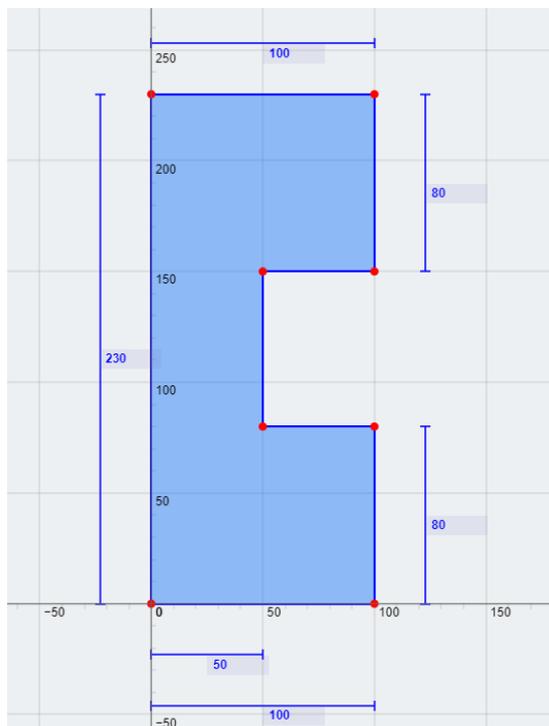


Figura 2. 30 Dimensiones sección C  
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.15 Dimensiones de la sección C**

Dimensiones	Valor [mm]
<b>Segmento 1</b>	
Altura	80
Base	100
<b>Segmento 2</b>	
Altura	70
Base	50
<b>Segmento 3</b>	
Altura	80
Base	100

Fuente: Elaboración Propia

$$\bar{y} = \frac{(A_1 * y_1) + (A_2 * y_2) + (A_3 * y_3)}{A_1 + A_2 + A_3}$$

$$\bar{y} = 115 \text{ mm}$$

Segmento 1 y 3:

$$I_{1,3} = \frac{b * h^3}{12} = \frac{100 * 80^3}{12}$$

$$I_{1,3} = 4266666.67 \text{ mm}^4$$

$$A_1 = 100 * 80 = 8000 \text{ mm}^2$$

Segmento 2

$$I_2 = \frac{b * h^3}{12} = \frac{50 * 70^3}{12}$$

$$I_2 = 1429166.67 \text{ mm}^4$$

$$A_2 = 50 * 70 = 3500 \text{ mm}^2$$

Inercia total:

$$I_T = I_1 + A_1 d_1^2 + I_2 + A_2 d_2^2 + I_3 + A_3 d_3^2$$

$$I_T = 2(4266666.67 + 3500 * 75) + 2560000$$

$$I_T = 99960000 \text{ mm}^4$$

### Sección T

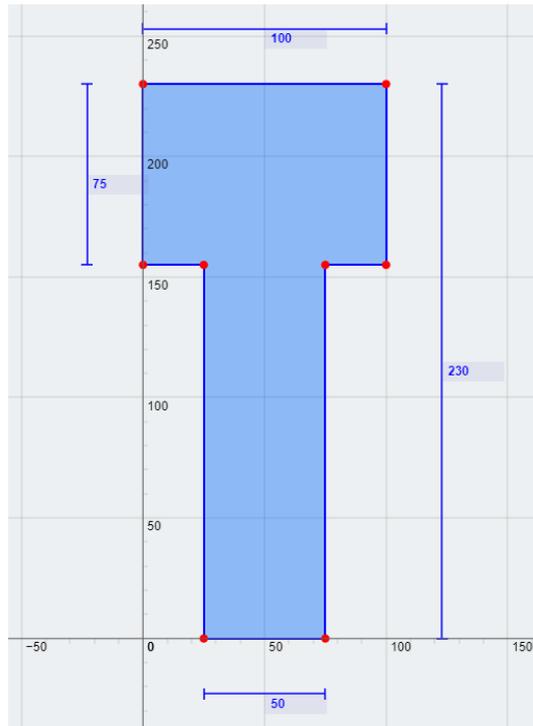


Figura 2.31 Dimensiones sección T  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 2.16 Dimensiones de la sección T

Dimensiones	Valor [mm]
<b>Segmento 1</b>	
<b>Altura</b>	75
<b>Base</b>	100
<b>Segmento 2</b>	
<b>Altura</b>	155
<b>Base</b>	50

Fuente: Elaboración Propia

$$\bar{y} = \frac{(A_1 * y_1) + (A_2 * y_2) + (A_3 * y_3)}{A_1 + A_2 + A_3}$$

$$\bar{y} = 133.63 \text{ mm}$$

Segmento 1:

$$I_1 = \frac{b * h^3}{12} = \frac{75 * 100^3}{12}$$

$$I_1 = 6250000 \text{ mm}^4$$

$$A_1 = 100 * 75 = 7500 \text{ mm}^2$$

Segmento 2:

$$I_2 = \frac{b * h^3}{12} = \frac{50 * 155^3}{12}$$

$$I_1 = 15516145.83 \text{ mm}^4$$

$$A_1 = 155 * 50 = 7750 \text{ mm}^2$$

Inercia total:

$$I_T = I_1 + A_1 d_1^2 + I_2 + A_2 d_2^2$$

$$I_T = 69438500 \text{ mm}^4$$

## 2.3.4 Análisis de cargas

### 2.3.4.1 Determinación de las cargas

La viga crítica escogida fue sometida a cargas puntuales dadas por el peso de las viguetas (92 N por vigueta) que a su vez están sometidas a cargas muertas y vivas según lo decretado en la norma ecuatoriana NEC-SE-CG para cargas no sísmicas. Estas cargas muertas están dadas por el peso de la cubierta, y las cargas vivas dependen de la ocupación de la edificación.

**Tabla 2.17 Cargas muertas y vivas dadas por la NEC-SE-CG**

<b>Cargas muertas</b>	
Cubierta de yeso sobre listones de madera	0.2 kN/ m <sup>2</sup>
<b>Cargas vivas</b>	
Cubiertas inclinadas	0.7 kN/ m <sup>2</sup>

Fuente: Elaboración Propia

Ahora, la NEC-SE-CG ha estipulado una serie de combinaciones de cargas que consideran los efectos más desfavorables de viento y lluvia para el diseño de estructuras. De estas se escogieron las 3 primeras debido a que en este diseño no se consideraron cargas sísmicas y las

cargas por viento pueden ser despreciadas para viviendas menores a los 10 m de altura.

**Tabla 2.18 Símbolos y notación para las combinaciones de cargas**

Variable	Símbolo	Unidades
Carga permanente (carga muerta)	$D$	$\text{kN/m}^2$
Sobrecarga (carga viva)	$L$	$\text{kN/m}^2$
Sobrecarga reducida de la cubierta (carga viva)	$L_r$	$\text{kN/ m}^2$

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.19 Fórmulas de las combinaciones de cargas consideradas según la NEC-SE-CG**

Combinaciones	Fórmula
1	$1.4 D$
2	$1.2 D + 1.6 L + 0.5 L_r$
3	$1.2 D + 1.6 L_r + L$

Fuente: Elaboración Propia

La sobrecarga  $L$  se calculó en función de la sobrecarga no reducida " $L_o$ " dada por la cubierta ( $0.7 \text{ kN/ m}^2$ ) mediante la siguiente expresión:

$$L = L_o \left( 0.25 + \left( \frac{4.57}{\sqrt{K_{LL} A_t}} \right) \right) \quad (2.5)$$

Donde  $K_{LL}$  es el factor de sobrecarga igual a 2 según la norma y  $A_t$  es el área normal a la carga aplicada.

La expresión para el cálculo de la sobrecarga reducida de la cubierta  $L_r$  es:

$$L_r = L_o R_1 R_2 \quad (2.6)$$

Donde  $R_1$  y  $R_2$  son los factores de reducción de conformidad equivalentes a  $0.011 A_T$  y 1 respectivamente según la norma.

### 2.3.4.2 Determinación de los apoyos

Los tipos de apoyos vienen dados según la forma de sujeción entre las columnas y vigas. Dado que las vigas cargadoras se unen a las columnas por medio de soportes de madera fijados con tirafondos, las reacciones que se tuvo tanto a los lados como en el centro fueron apoyos empotrados.

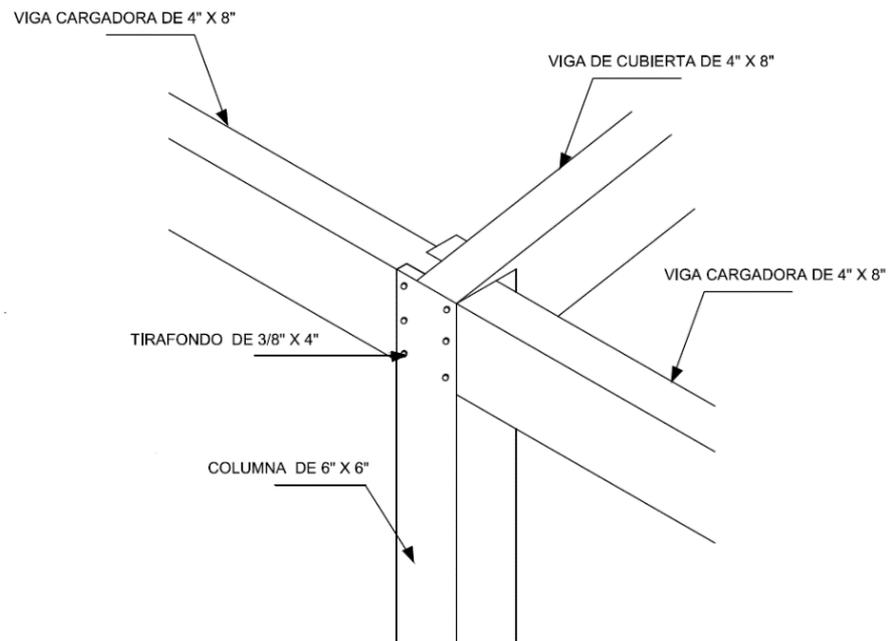


Figura 2.32 Detalle de la sujeción de la viga (Alvarado, 2014)

### 2.3.4.3 Determinación de las reacciones

Las reacciones para el modelo escogido fueron son las siguientes:

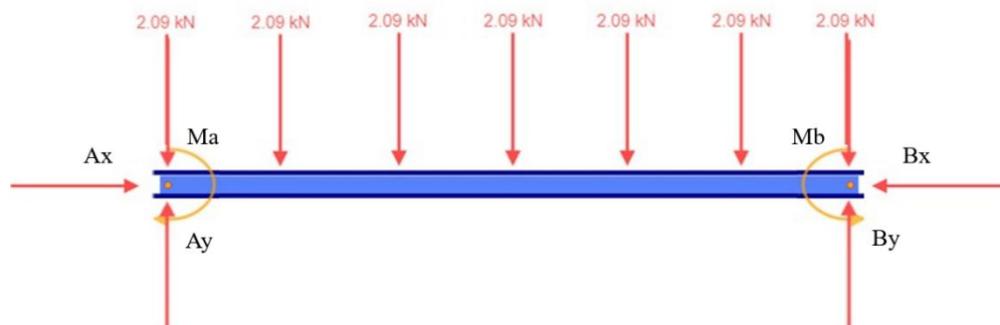


Figura 2.33 DCL de la viga  
Fuente: Elaboración Propia

Se realizó la sumatoria de fuerzas en la dirección y. Debido a la simetría que presentó el modelo planteado, se dedujo que tanto las fuerzas de reacción como los momentos tendrían igual magnitud por lo cual se asignó la variable  $R_y$  para denominar a las reacciones verticales en los apoyos y  $M$  para referirse al momento.

$$\sum F_y = 0 \quad (2.7)$$

$$A_y + B_y - 7(2,09) = 0$$

$$2R_y = 14,63$$

$$R_y = 7,32 \text{ N}$$

Al ser una viga estáticamente indeterminada, se tuvo que emplear el método de superposición para hallar los momentos. Para esto, fue necesario el uso de la siguiente tabla tomada del libro de Singer:

$EI\theta = \frac{ML}{n+1}$ ;  $EI\delta = \frac{ML^2}{n+2}$ ;  $M =$  Momento en el empotramiento

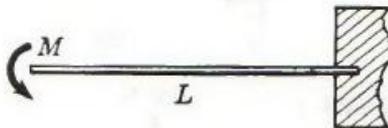
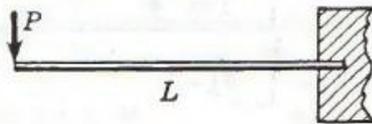
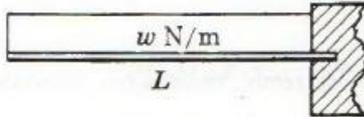
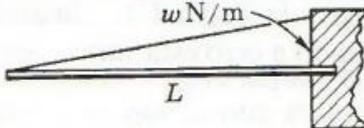
CARGA	$n$	$EI\theta$	$EI\delta$
	0	$\frac{ML}{1}$	$\frac{ML^2}{2}$
	1	$\frac{ML}{2}$	$\frac{ML^2}{3}$
	2	$\frac{ML}{3}$	$\frac{ML^2}{4}$
	3	$\frac{ML}{4}$	$\frac{ML^2}{5}$

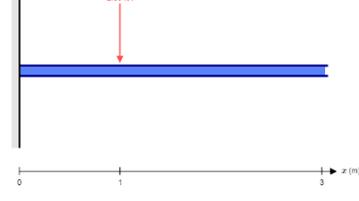
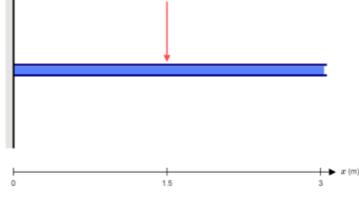
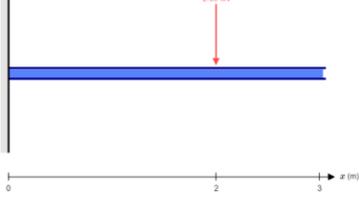
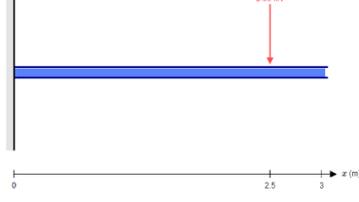
Figura 2. 34 Tabla de pendiente y deflexión para superposición (Ferdinand L. Singer, 1994)

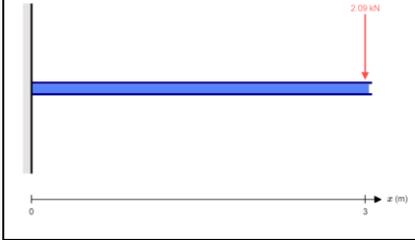
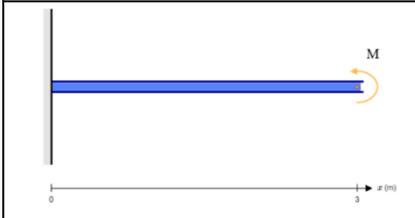
Para el análisis se procedió a hacer el corte en el apoyo empotrado del lado izquierdo. Debido a que la fuerza ejercida sobre el apoyo no provoca ninguna deformación, esta fue despreciada para el análisis. Se emplearon las siguientes ecuaciones para las fuerzas puntuales y para el momento respectivamente:

$$\delta_i = \frac{M_i L_i^2}{3EI} \quad (2.8)$$

$$\delta_{14} = \frac{M_7 L_7^2}{2EI} \quad (2.9)$$

**Tabla 2.20** Tabla de deformaciones de la viga modelo

	$\delta_2 = \frac{M_2 L_2^2}{3EI}$ $\delta_3 = \frac{M_2 L_2 (L - L_2)}{2EI}$	$\delta_2 = \frac{2.9 * 0.5^3}{3EI}$ $\delta_3 = \frac{2.9 * 0.5^2 (3 - 0.5)}{2EI}$
	$\delta_4 = \frac{M_3 L_3^2}{3EI}$ $\delta_5 = \frac{M_3 L_3 (L - L_3)}{2EI}$	$\delta_4 = \frac{2.9 * 1^3}{3EI}$ $\delta_5 = \frac{2.9 * 1^2 (3 - 1)}{2EI}$
	$\delta_6 = \frac{M_4 L_4^2}{3EI}$ $\delta_7 = \frac{M_4 L_4 (L - L_4)}{2EI}$	$\delta_6 = \frac{2.9 * 1.5^3}{3EI}$ $\delta_7 = \frac{2.9 * 1.5^2 (3 - 1.5)}{2EI}$
	$\delta_8 = \frac{M_5 L_5^2}{3EI}$ $\delta_9 = \frac{M_5 L_5 (L - L_5)}{2EI}$	$\delta_8 = \frac{2.9 * 2^3}{3EI}$ $\delta_9 = \frac{2.9 * 2^2 (3 - 2)}{2EI}$
	$\delta_{10} = \frac{M_6 L_6^2}{3EI}$ $\delta_{11} = \frac{M_6 L_6 (L - L_6)}{2EI}$	$\delta_{10} = \frac{2.9 * 2.5^3}{3EI}$ $\delta_{11} = \frac{2.9 * 2.5^2 (3 - 2.5)}{2EI}$

	$\delta_{12} = \frac{M_7 L_7^2}{3EI}$	$\delta_{12} = \frac{2.9 * 3^3}{3EI}$
	$\delta_{13} = \frac{M_7 L_7^2}{3EI}$	$\delta_{13} = \frac{R_y * 3^3}{3EI}$
	$\delta_{14} = \frac{M_7 L_7^2}{2EI}$	$\delta_{14} = \frac{M * 3^2}{2EI}$

Fuente: Elaboración Propia

Por último, dado que la suma algebraica de todas las deformaciones debe ser igual a cero, se tuvo que:

$$\sum_{i=2}^{14} \delta_i = 0 \quad (2.10)$$

$$\delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 + \delta_7 + \delta_8 + \delta_9 + \delta_{10} + \delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{14} = 0$$

Reemplazando las ecuaciones de la tabla anterior se pudo despejar el momento y obtener que:

$$52.110 = 9R_y + 4.5M$$

## 2.3.5 Análisis de esfuerzos y deflexiones

### 2.3.5.1 Esfuerzos

Los esfuerzos que la viga experimenta son axiales de flexión debido a los momentos flectores que las cargas puntuales generan sobre la misma. Para el cálculo del esfuerzo de flexión se utilizó la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (2.11)$$

Donde  $M$  es el momento flector en la sección crítica de análisis,  $c$  e  $I$  son el centroide y la Inercia de la sección transversal escogida para la viga.

### 2.3.5.2 Deflexiones

Para la ecuación diferencial de la elástica se tuvo que:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (2.12)$$

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{5}{7}F\langle x \rangle + 50F + \frac{12}{7}F\langle x - 1.05 \rangle - F\langle x - 1.30 \rangle$$

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{5}{14}F\langle x^2 \rangle + 50Fx + \frac{12}{14}F\langle x - 1.05 \rangle^2 - \frac{F}{2}\langle x - 1.30 \rangle^2 + C1$$

$$EIy = -\frac{5}{42}F\langle x^3 \rangle + 25Fx^2 + \frac{12}{42}F\langle x - 1.05 \rangle^3 - \frac{F}{6}\langle x - 1.30 \rangle^3 + C1x + C2$$

Donde las condiciones de borde son:

$$\text{en } x = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = 0 \quad (2.13)$$

$$\text{en } x = 0 \rightarrow y = 0 \quad (2.14)$$

Utilizando la primera condición se tiene que:

$$EI(0) = -\frac{5}{14}F\langle 0 \rangle + 25F(0) + \frac{12}{14}F\langle 0 - 1.05 \rangle^2 - \frac{F}{2}\langle 0 - 1.30 \rangle^2 + C1$$

$$C1 = 0$$

De la segunda condición se tiene que:

$$EI(0) = -\frac{5}{42}F\langle 0 \rangle + 25F(0) + \frac{12}{42}F\langle 0 - 1.05 \rangle^3 - \frac{F}{6}\langle 0 - 1.30 \rangle^3 + C1(0)$$

$$+ C2$$

$$C2 = 0$$

La ecuación de la elástica de la viga queda entonces:

$$EIy = -\frac{5}{42}F\langle x^3 \rangle + 25Fx^2 + \frac{12}{42}F\langle x - 1.05 \rangle^3 - \frac{F}{6}\langle x - 1.30 \rangle^3$$

### 2.3.6 Análisis de falla

Dado que la viga se encuentra sometida a cargas netamente estáticas, se realizó solo análisis de falla estática. El factor de seguridad se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \quad (2.15)$$

Donde  $S_y$  es la resistencia a la fluencia del material, y  $\sigma$  es el esfuerzo de flexión obtenido a partir de la ecuación 2.11

### 2.3.7 Simulación

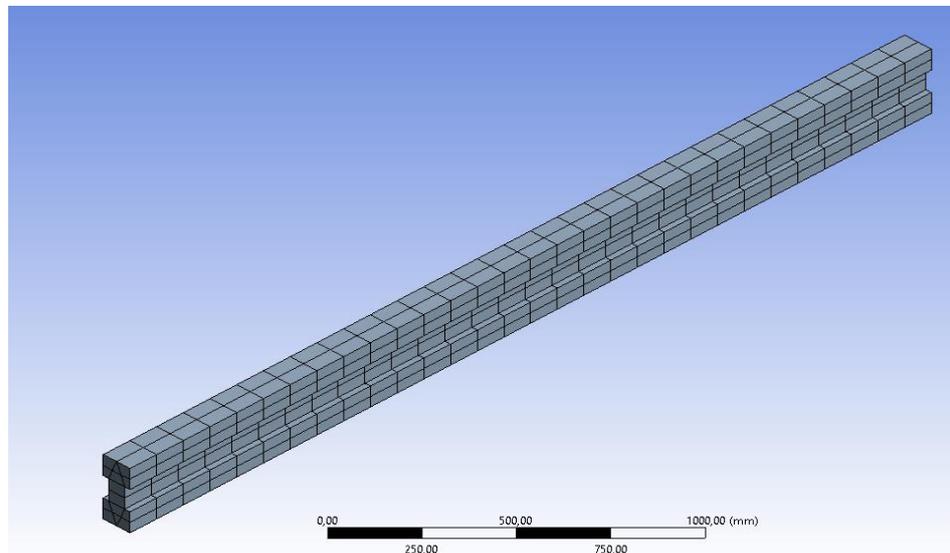
Una vez realizado los modelos CAD de los diferentes perfiles mediante el software de Inventor, se los importaron como archivo. STEP al módulo Static Structure del software de ANSYS Workbench utilizado para el análisis estático de la viga.

**Tabla 2.21 Parámetros ingresados en el módulo Static Structure de ANSYS**

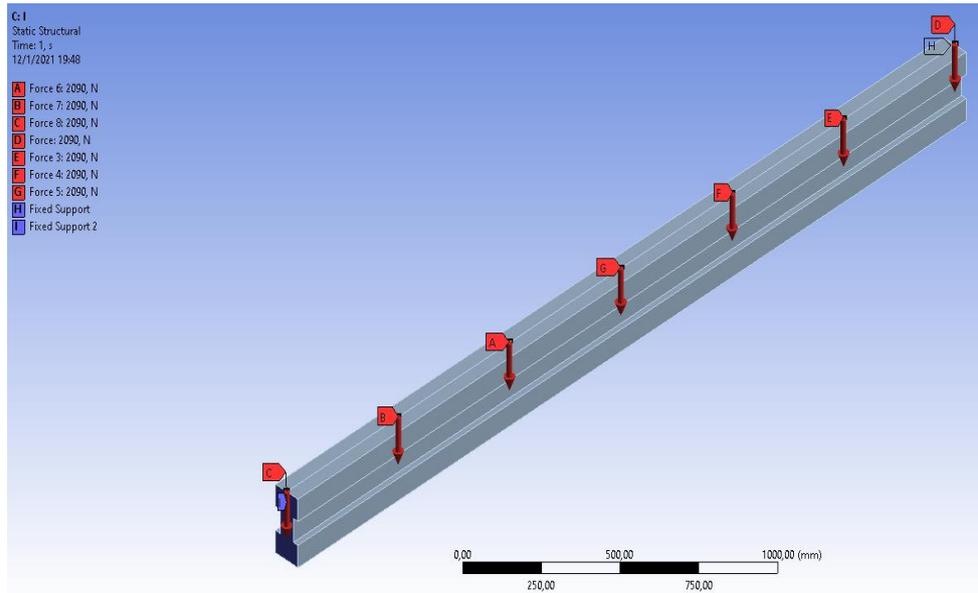
<b>Engineering Data</b>	Módulo de Young
	Relación de Poisson
	Resistencia a la tracción
	Esfuerzo de fluencia
	Densidad
<b>Geometry</b>	Archivo. STEP
<b>Model</b>	# de Mallado

Fuente: Elaboración Propia

Un ejemplo del mallado y el establecimiento de las cargas sobre las vigas se encuentran en la ilustración 2.36 y 2.37 a continuación. Para el resto de las vigas, véase en Anexos, apéndice F.



**Figura 2.35 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de I**  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 2.36 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de I**  
 Fuente: Elaboración Propia

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Resultados y Análisis de Consumo Energético

Para cuantificar el consumo de energía de cada una de las mezclas, se realizaron las mediciones y los cálculos requeridos para la obtención de todos los parámetros especificados en la tabla 3.2. Las tablas con los resultados para cada muestra se encuentran en el apéndice C. De estas se tomaron los valores promedios para realizar los respectivos análisis comparativos presentados a continuación:

**Tabla 3.1 Simbología utilizada para la descripción de las distintas variables**

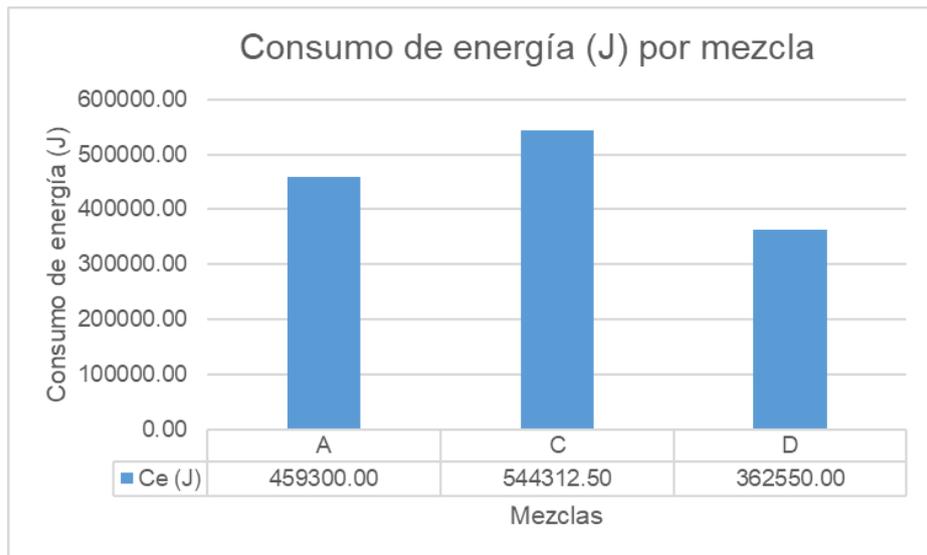
Simbología	Nomenclatura
100% rHDPE	A
92% rHDPE+ 3% CA +5% RETAIN	C
92% rHDPE+ 3% CA +5% LOTADER	D
Consumo de energía	Ce
Consumo de energía específica	Cs
Caudal	Q
Temperatura de salida	Ts
Presión en el dado	P

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.2 Resultados de las mediciones del consumo de energía para las distintas mezclas**

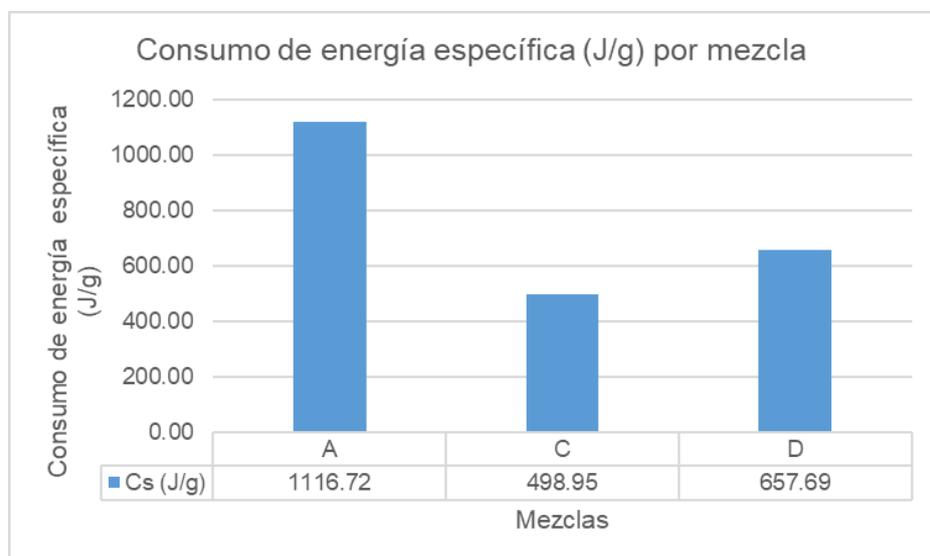
Muestra	Ce [J]	Cs [J/g]	Q [ $cm^3/s$ ]	Ts [°C]	P [bar]
A	459300.00	1116.72	4.885	221.48	214
C	544312.50	498.95	15.765	218.20	200
D	362550.00	657.69	6.869	226.24	206.3

Fuente: Elaboración Propia



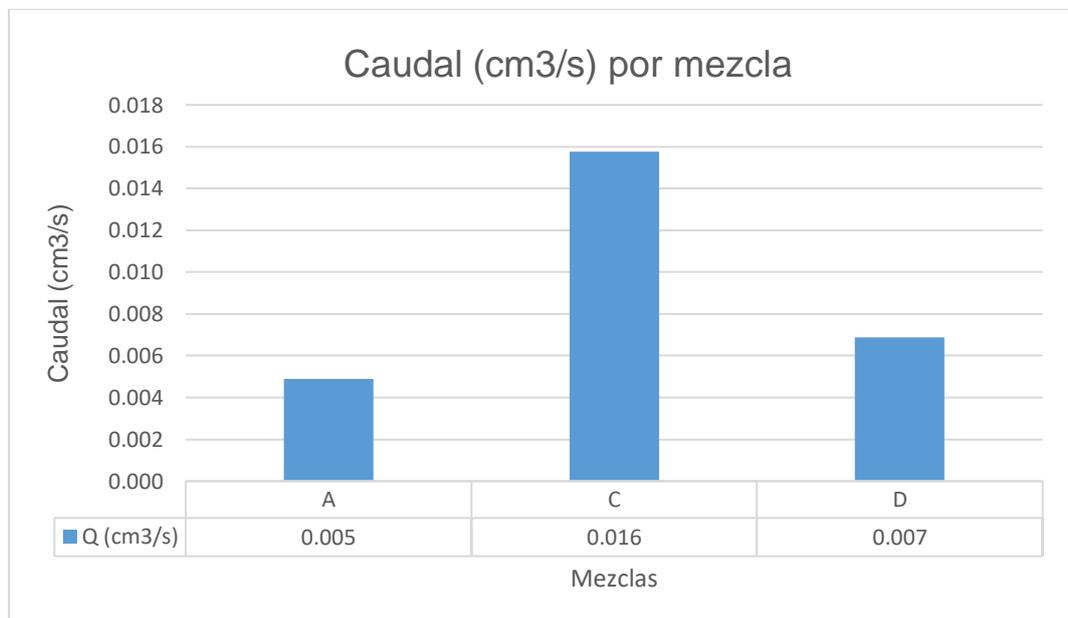
**Figura 3.1 Resultado del consumo de energía para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 3.2 se obtuvo que la mezcla con mayor consumo de energía fue la C, seguido por las mezclas A y D respectivamente. Estos valores representan la energía eléctrica total requerida por los sensores, ventiladores, resistencias y el tornillo durante el procesamiento de cada mezcla independientemente. La comparación entre los resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en la ilustración 3.1.



**Figura 3.2 Resultados del consumo de energía específico para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

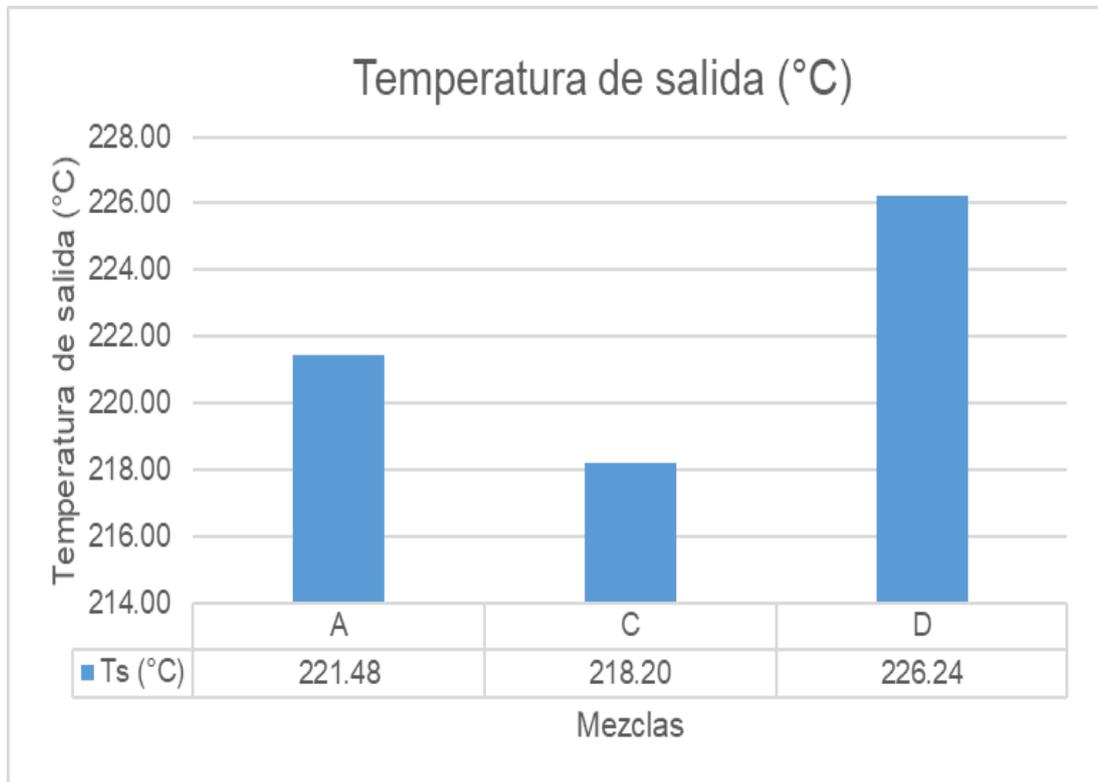
El consumo de energía específico mide la energía eléctrica total invertida por gramo de material obtenido durante el intervalo de tiempo muestreado, en este caso dicho tiempo fue de 5 minutos. De la tabla 3.2 se obtuvo que la mezcla con menor consumo de energía específico fue la C, con un valor menor al 50% de la mezcla A compuesta por rHDPE puro. Cabe recalcar que esta mezcla es la que mayor cantidad de energía demanda para su procesamiento, sin embargo, este resultado se debe a la fluidez otorgada por el aditivo “RETAIN”, el cual permite la obtención de mayor cantidad de material extruido bajo los mismos parámetros de operación, reduciendo en consecuencia la energía específica consumida. La comparación entre los resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en la ilustración 3.2.



**Figura 3.3 Resultados del caudal de salida de material para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 3.2 se obtuvo que la mezcla con mayor tasa de cantidad de material extruido por segundo es la C, lo cual es evidente dado que, como se mencionó en el párrafo anterior, el aditivo otorga fluidez a la mezcla permitiendo así la circulación de mayor cantidad de material por el intervalo de tiempo de muestreo definido. Este aumento en la fluidez de la mezcla

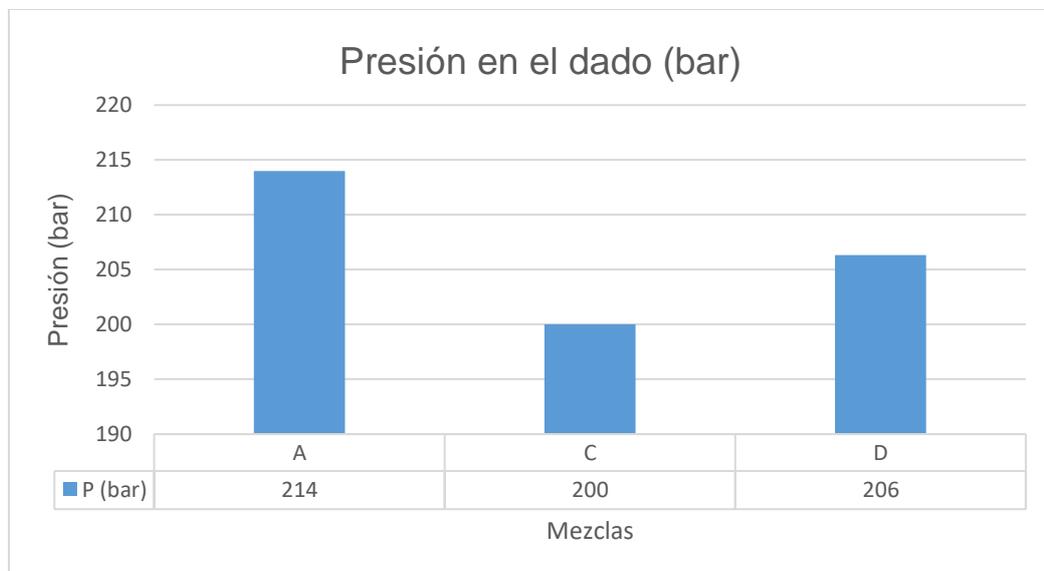
también se pudo corroborar con los resultados del ensayo de índice de fluidez, los cuales son expuestos más adelante en la tabla 3.3. La comparación entre los resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en la ilustración 3.3.



**Figura 3.4 Resultados de la temperatura de salida del material extruido para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

La variación de la temperatura de salida está relacionada de manera proporcional con la viscosidad de la mezcla e inversamente proporcional a la fluidez de la misma. Según la tabla 3.2, la mezcla con menor temperatura de salida del material extruido fue la C, y esto es evidente puesto que es la que presenta mayor caudal, lo cual significa que posee mayor fluidez que el resto de las mezclas. Esto se corrobora con los resultados del ensayo de Fluidez, expuestos más adelante en la tabla 3.3, donde se observa que la mezcla con

mayor fluidez es efectivamente la C. La comparación entre los resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en la ilustración 3.4.



**Figura 3.5 Resultados de la presión ejercida en el dado para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 3.2 se obtuvo que la mezcla que ejerció menor presión en el dado de la extrusora fue la C, seguido de la D. Esto es evidente debido al aditivo que se usaron para las mezclas C y D, los cuales otorgan fluidez al material y mejora su circulación dentro de la zona de dosificación del tornillo, ejerciendo en consecuencia menor presión que la mezcla A que procesa rHDPE puro sin aditivo compatibilizador. La comparación entre los resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en la ilustración 3.5.

### 3.2 Resultados y Análisis del ensayo de Índice de Fluidez o MFI (Melt Flow Index)

**Tabla 3.3 Resultados de las mediciones del consumo de energía para las distintas mezclas**

Muestra	190°C/21.6 kg		190°C/5 kg	
	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
A	3.96	0.21	0.13	0.00
C	9.06	0.36	0.39	0.00
D	2.93	0.17	0.09	0.00

Fuente: Elaboración Propia

Las tablas con los resultados para cada muestra se encuentran en el apéndice F. De la tabla 3.3 se pudo observar que bajo ambas cargas se cumple que la muestra C presentó un mayor valor de MFI, seguida por la muestra A y quedando en último lugar la muestra D. Las pruebas de MFI establecen que, a mayor valor obtenido, mejor fluidez del material en cuestión. Por lo tanto, se puede decir que la muestra C es la mezcla donde hay mayor cantidad de material circulando bajo la carga indicada.

El índice de fluidez es inversamente proporcional a la viscosidad, por lo que se pudo decir que entre menos viscosidad presentó la muestra, mayor valor de MFI obtuvo. Un punto importante que se tuvo en cuenta fue que las velocidades a las que se realizó la prueba eran muy bajas en comparación a las empleadas en un proceso de extrusión. Es decir que, a las condiciones de dicho proceso, la tasa de corte será mucho mayor, por consiguiente, la viscosidad del material disminuirá notablemente

### 3.3 Resultados y Análisis del ensayo de Calorimetría diferencial de barrido DSC (Differential Scanning Calorimetry)

#### 3.3.1 Muestra A: rHDPE puro

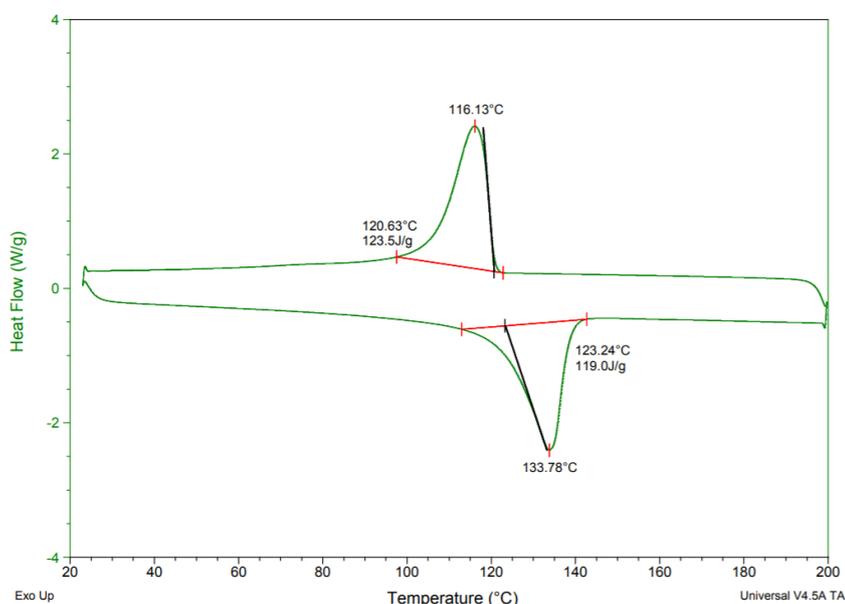


Figura 3.6 Gráfica para la mezcla A (100%rHDPE)

### 3.3.2 Muestra C: rHDPE + CA + RETAIN

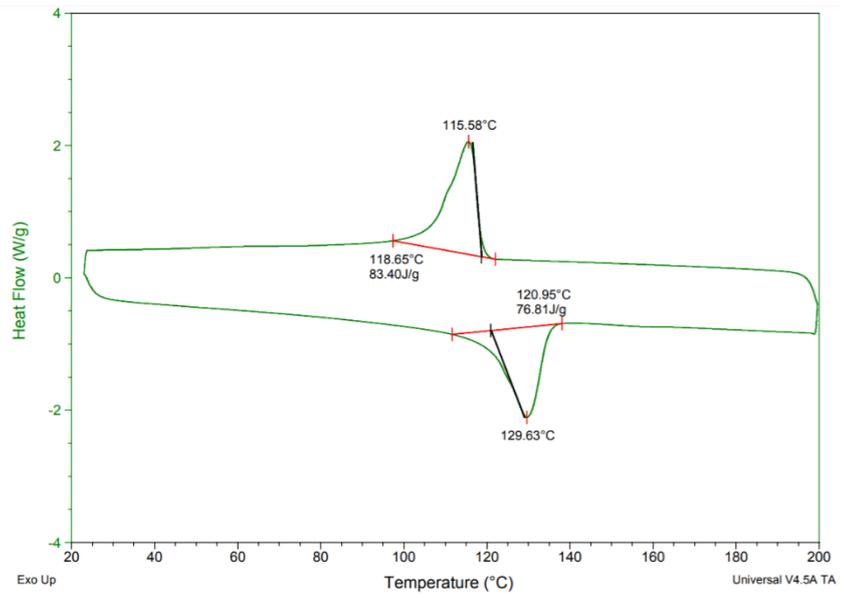


Figura 3.7 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla C (92%rHDPE+3%CA+5%RETAIN)

### 3.3.3 Muestra D: rHDPE + CA + LOTADER

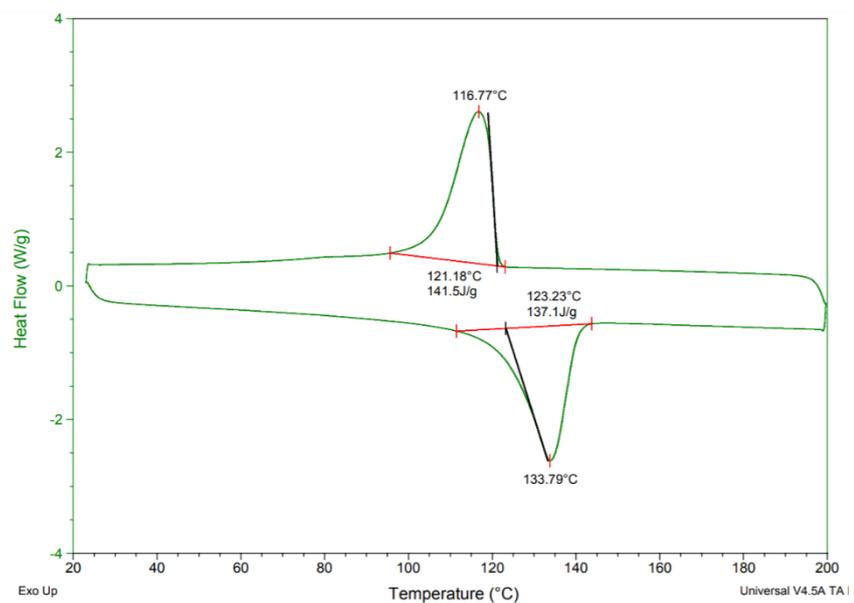


Figura 3.8 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla D (92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER)

**Tabla 3.4 Resultados de ensayos DSC**

Muestra	Temperatura de fusión [°C]	Entalpía específica de fusión [J/g]	Temperatura de cristalización [°C]	Entalpía específica de cristalización [J/g]	Porcentaje de cristalinidad [%]
A	133.78	119.0	116.13	123.5	42.15
C	129.63	76.81	115.58	83.4	28.46
D	133.79	137.1	116.77	141.5	48.29

Fuente: Elaboración Propia

Al hacer la prueba DSC se obtuvieron dos temperaturas importantes para este análisis, la temperatura de fusión y la temperatura de cristalización, con sus respectivas entalpías específicas. Se observó que, al aumentar la energía para poder romper las cadenas cristalinas del polímero, el primero en llegar a su punto de fusión fue la mezcla C, cuya entalpía específica fue mucho menor en comparación a la muestra A y la muestra D necesitando menor energía para llegar a su forma amorfa. De la misma manera, al disminuir la temperatura, la muestra que necesitó menor energía para cristalizarse fue la muestra C, la cual se cristalizó a una menor temperatura que las demás muestras.

En cuanto al porcentaje de cristalinidad, se puede observar que es mayor para la muestra D, este resultado explica el porqué del incremento de la rigidez en el material. En términos de ingeniería, mayor porcentaje de cristalinidad equivale a mayor número de granos en la estructura cristalina del material que impiden el movimiento de las dislocaciones durante la deformación del mismo, aumentando en consecuencia su dureza y resistencia a la tracción. Sin embargo, reduce su capacidad de deformación, lo cual se contrasta con los resultados del ensayo de tracción de la muestra D (Véase tabla 3.5).

### **3.4 Ensayos Mecánicos**

Se evaluaron las propiedades mecánicas de las 3 mezclas bajo las siguientes normativas:

- Resistencia a la tracción: ASTM D638
- Resistencia al Impacto: ASTM D 256

**Tabla 3.5 Simbología utilizada para la descripción de las distintas variables**

Denominación	Simbología
Esfuerzo máximo	$\sigma_{max}$
Deformación máxima	$\delta_{max}$
Esfuerzo de rotura	$\sigma_r$
Módulo de Young	E

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.1 Resultados y Análisis del ensayo de Tensión

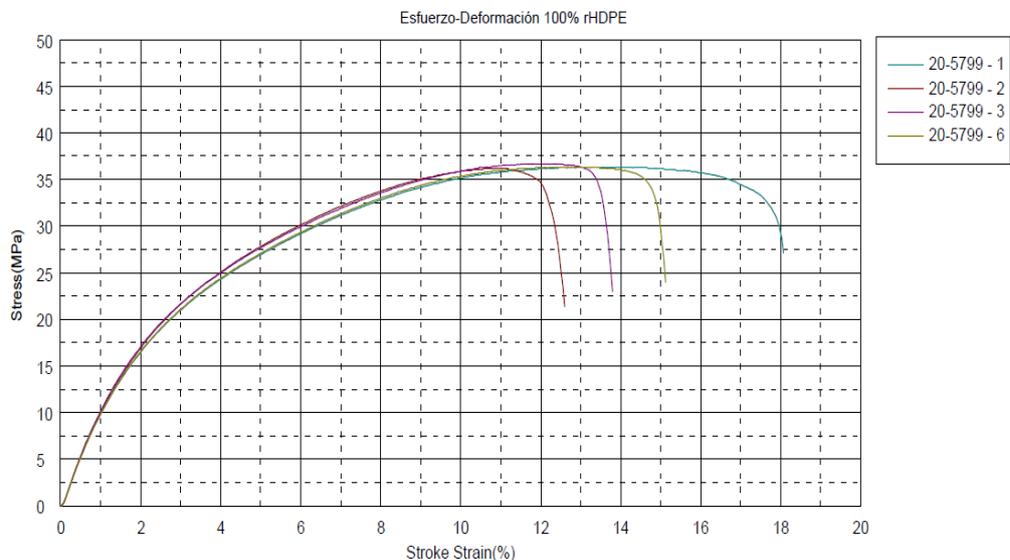
Las tablas con los resultados para cada muestra se encuentran en el apéndice D. De estas se tomaron los valores promedios para realizar los análisis comparativos correspondientes entre las mezclas, los cuales se presentan a continuación:

**Tabla 3.6 Tabla de resultados del ensayo de tracción realizado para cada mezcla**

Muestra	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [%]	$\sigma_r$ [MPa]	E [MPa]
A	36.41±0.23	14.90±2.36	23.87±2.44	1044.73±16
C	25.78±0.55	55.10±6.03	13.17±2.58	708.27±18
D	42.00±0.81	14.21±1.18	40.03±1.31	1104.19±53

Fuente: Elaboración Propia

#### Muestra A (100% Polietileno de Alta Densidad reciclado)



**Figura 3.9 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla A (100%rHDPE)**

Con las curvas de Esfuerzo – Deformación expuestas en la ilustración 3.9, se pudo observar que las probetas de 100%rHDPE poseen una resistencia a la tracción y Módulo de Young bastante elevados, con valores promedios de 36.41 y 1044.73 MPa respectivamente según la tabla 3.6; sin embargo, carecen de ductilidad dado que se deforman hasta un valor promedio del 14.90% en total, lo cual, en términos de ingeniería, significa que la mezcla A es muy rígida pero poco dúctil y tenaz.

Por otra parte, se pudo observar la presencia de dispersiones en los resultados ya que se tiene algunos desfases entre las curvas. Se infirió que esta propagación de error en los resultados se debe a la inestabilidad en el set de parámetros al momento de inyectar las probetas, las cuales fueron modificadas repetidas veces para obtener las probetas como se requerían.

### Muestra C (92% rHDPE + 3% CA + 5% RETAIN)

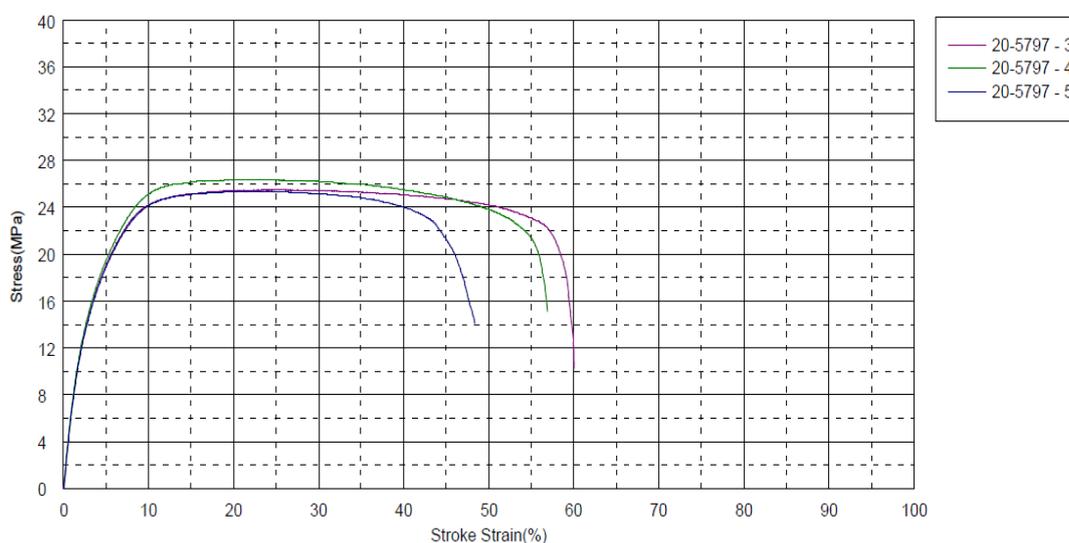


Figura 3.10 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla C (92%rHDPE+3%CA+5%RETAIN)

Con las curvas de Esfuerzo – Deformación expuestas en la ilustración 3.10, se pudo observar que las probetas de 92%rHDPE+3%CA+5%RETAIN poseen menor resistencia a la tracción y módulo de Young que la mezcla A, con valores promedios de 25.78 y 708.27 MPa respectivamente según la tabla 3.6; sin embargo, poseen mucha mayor ductilidad dado que se deforman hasta un valor promedio del 55.10% en total, lo cual, en términos de ingeniería, quiere decir que la mezcla B es menos rígida que la anterior,

pero mucho más dúctil y tenaz, considerando el área bajo la curva que representa la energía que esta absorbe antes de la fractura.

Por otra parte, también se pudo observar desfases entre las curvas, las cuales afectan principalmente a los resultados de elongación final del material y se pueden evidenciar en la desviación estándar obtenida en la tabla D.4 (Véase en Apéndice D). Tal como en la mezcla A, este desfase pudo ser consecuencia de la falta de homogenización durante el proceso de Inyección de las probetas, pues al tratar con un material experimental donde se desconocía los parámetros de operación, se tuvo que modificar constantemente parámetros como la carga de material y la presión de Inyección para obtener las probetas sin presentar vacíos o en su contraparte rebabas.

### Muestra D (92% rHDPE + 3% CA + 5% LOTADER)

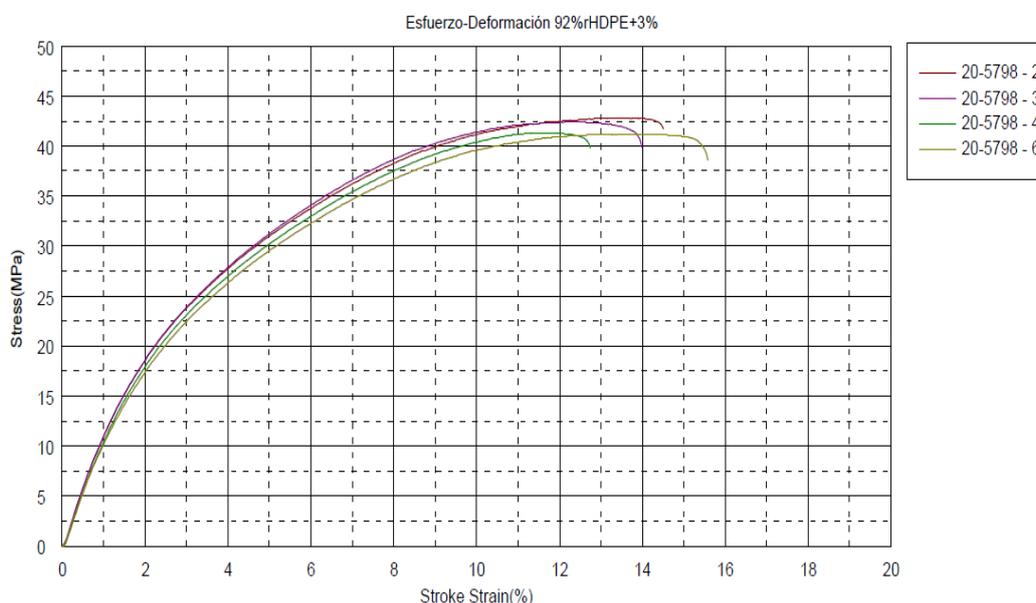


Figura 3.11 Curva Esfuerzo-Deformación para la mezcla D (92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER)

En las curvas de Esfuerzo - Deformación obtenidas para las probetas de 92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER, se pudo observar que la resistencia a la tracción y el módulo de Young es mayor que las presentadas en las mezclas A y C, con un valor promedio de 42.00 MPa y 1104.19 MPa respectivamente según la tabla 3.6. Sin embargo, en contraparte poseen menor deformación que las demás mezclas, con un valor promedio del

14.21%. En términos ingenieriles, esto significa que la mezcla D es muy rígida, pero menos dúctil y tenaz al igual que la mezcla A.

Para el diseño de las vigas de madera plástica como soporte de techos, se requería escoger el material con mayor rigidez. Debido a que esta propiedad se encuentra definida por el Módulo de Young y este era mayor en la mezcla D sobre las demás, se escogió esta mezcla como la materia prima para el diseño de las vigas.

Finalmente, cabe recalcar que con esta mezcla se presentaron menos desfases entre las curvas que en las mezclas anteriores, esto es evidente puesto que fueron las últimas probetas en ser inyectadas por lo que ya se tenía un mejor control en el set de parámetros para la correcta operación de la inyectora.

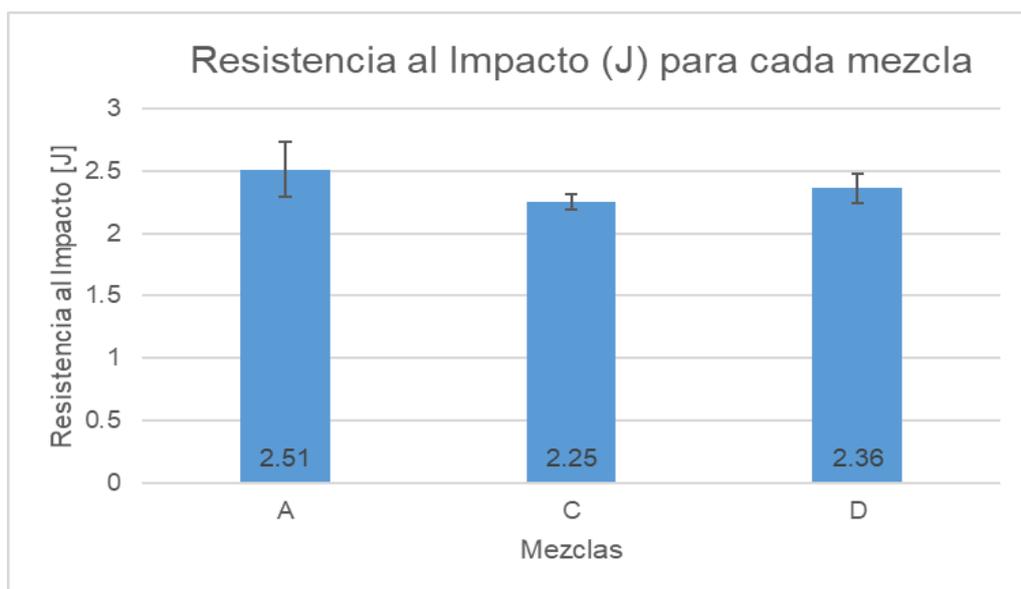
### 3.5 Resultados y Análisis del ensayo de Impacto IZOD

Las tablas con los resultados para cada muestra se encuentran en el apéndice E. De estas se tomaron los valores promedios para realizar los análisis comparativos correspondientes entre las mezclas, los cuales se presentan a continuación:

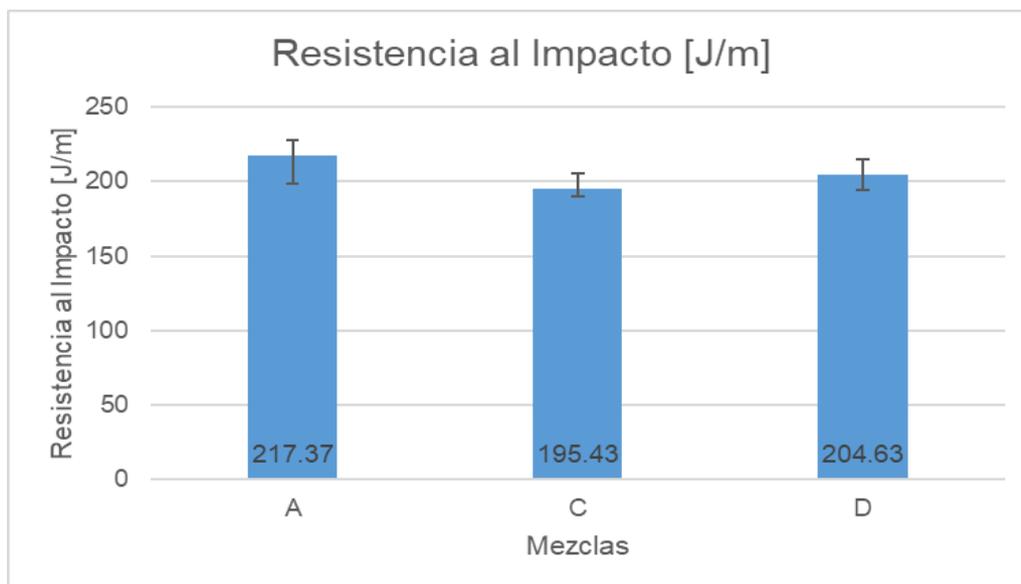
**Tabla 3.7 Resultados de la resistencia al impacto para las diferentes mezclas**

<b>Datos Iniciales de las probetas</b>	<b>Longitud [mm]</b>	63.50
	<b>Ancho debajo de la muesca [mm]</b>	11.54
	<b>Espesor [mm]</b>	3.021
<b>Muestra</b>	<b>Resistencia al Impacto [J]</b>	<b>Resistencia al Impacto [J/m]</b>
<b>A</b>	2.51 ± 0.22	217.37 ± 18.64
<b>C</b>	2.25 ± 0.06	195.43 ± 5.56
<b>D</b>	2.36 ± 0.12	204.63 ± 10.51

Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.12 Resultados de la resistencia al Impacto en Joules para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.13 Resultados de la resistencia al Impacto en J/m para cada mezcla**  
Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados presentados en la tabla 3.6, se pudo observar que las mezclas de rHDPE+CA+ADITIVO no presentaron ventajas en la resistencia al impacto del material frente al uso de rHDPE puro. Estos exponen que la muestra A absorbe mayor energía de impacto, con un valor de 217.37 J/m, frente a los resultados de las muestras C y D. La comparación entre los

resultados para cada mezcla puede visualizarse mejor en las ilustraciones 3.12 y 3.13.

### 3.6 Diseño y Simulación

#### 3.6.1 Inercias

**Tabla 3.8 Resultados de centroides e inercias para cada sección**

Sección	Centroide [mm]	Inercia [mm <sup>4</sup> ]
Rectangular sólida	115	101399166.7
Rectangular hueca	115	80297916.67
Perfil I	115	99685000
Perfil C	115	99960000
Perfil T	133.63	69438500

Fuente: Elaboración Propia

#### 3.6.2 Cargas

**Tabla 3.9 Resultados de las cargas puntuales por vigueta de madera para cada combinación**

Combinación	Carga puntual por vigueta [kN]
1	0.53
2	2.04
3	2.09

Fuente: Elaboración Propia

Se escogió la combinación 3 para la carga puntual generada por vigueta, pues presentó la carga más crítica con un valor de 2.09 kN.

#### 3.6.3 Diagrama de Cortante, Momento y Deflexiones

Para la elaboración de los diagramas de fuerza cortante, momento flector y deformación de la viga se utilizó el software de ANSYS Workbench.

## Sección rectangular sólida

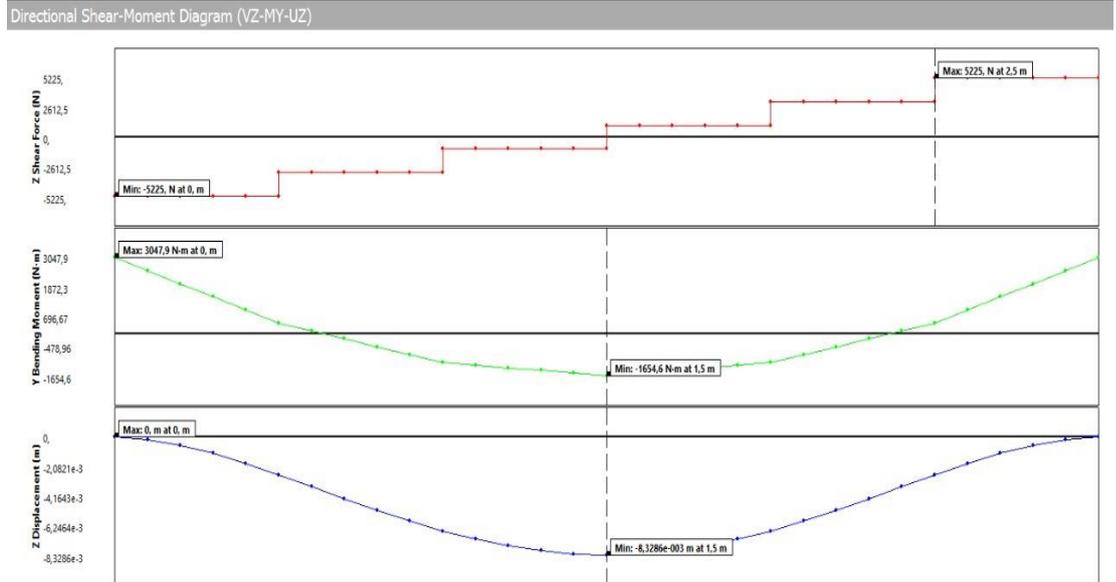


Figura 3.14 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección rectangular sólida  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección rectangular hueca

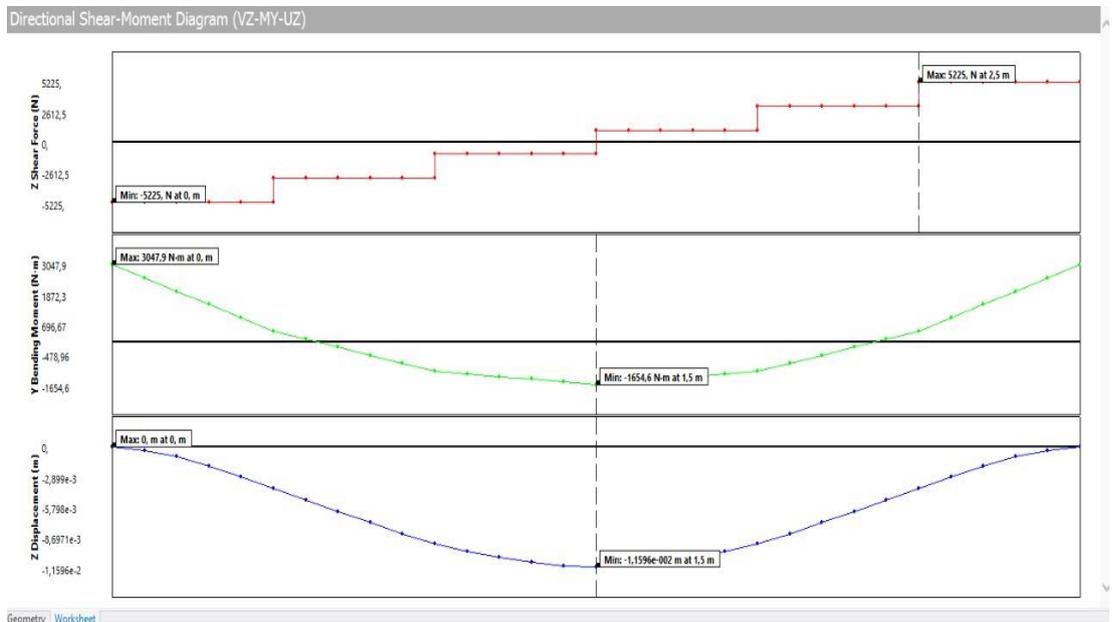


Figura 3.15 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección rectangular hueca  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección T

Directional Shear-Moment Diagram (VZ-MY-UZ)

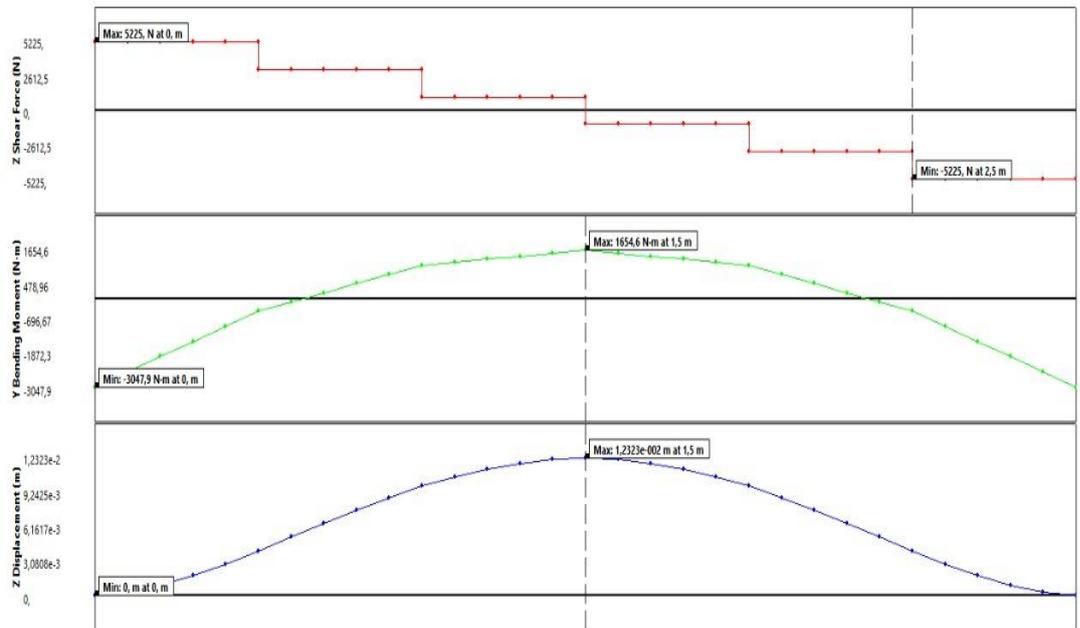


Figura 3.16 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección T  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección I

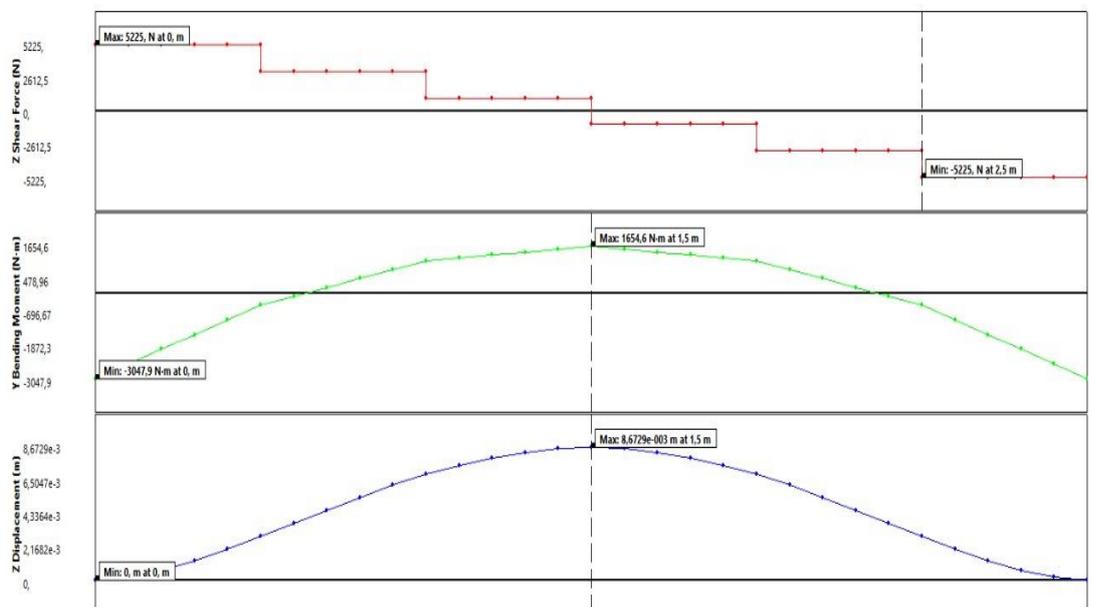


Figura 3.17 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección I  
Fuente: Elaboración Propia

### Sección C

Directional Shear-Moment Diagram (VZ-MY-UZ)

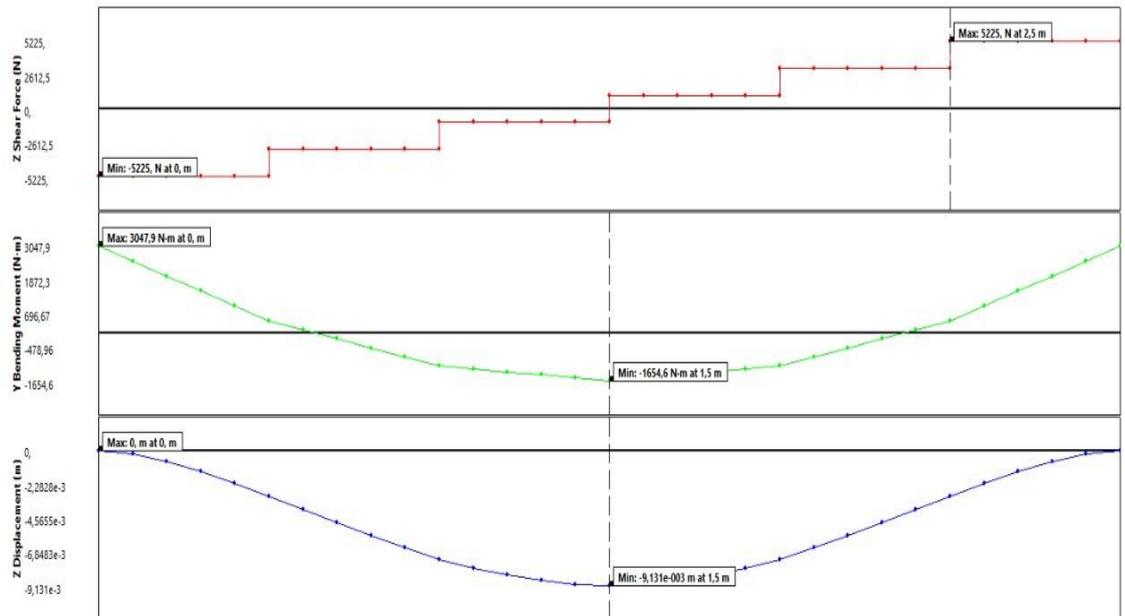


Figura 3.18 Diagrama de fuerza cortante, momento flector y deflexión para sección C  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.10 Resultados de las deflexiones máximas obtenidas para cada sección transversal

Sección transversal	Deflexión máxima admisible [mm]	Deflexión máxima obtenida [mm]
rectangular sólida	L/300 = 10	8.398
rectangular hueca		11.709
T		12.433
I		8.751
C		9.756

Fuente: Elaboración Propia

### 3.6.4 Simulación

#### Sección Rectangular sólida

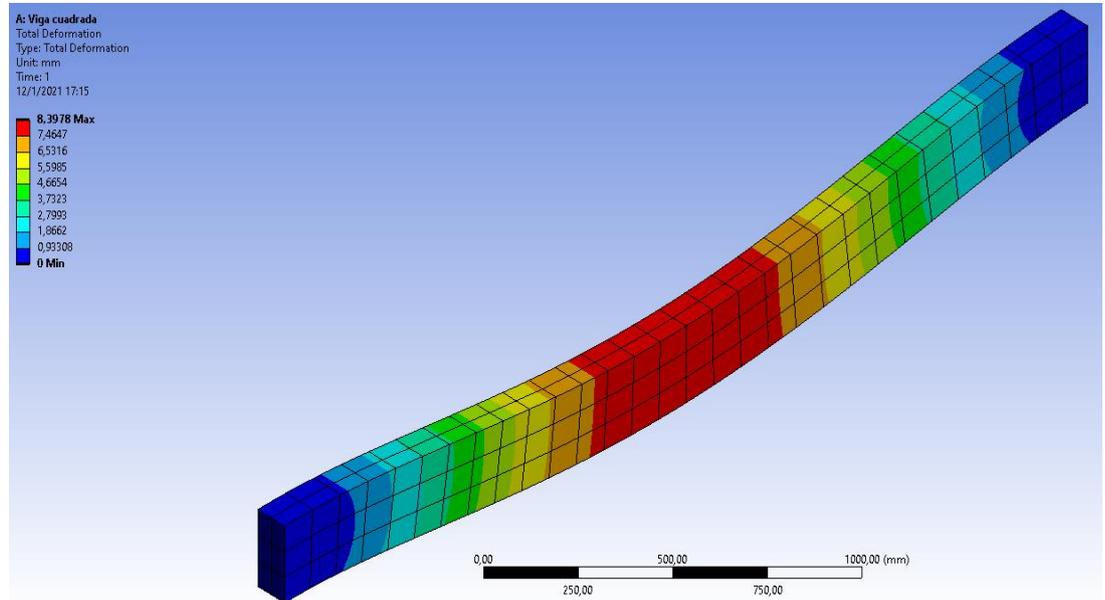


Figura 3.19 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil rectangular sólida  
Fuente: Elaboración Propia

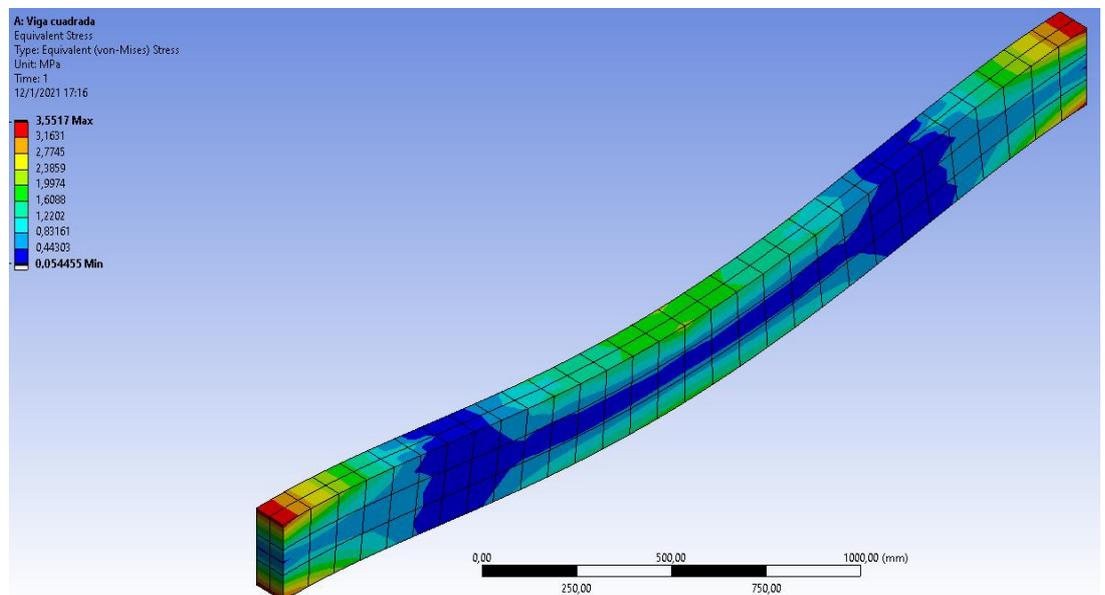
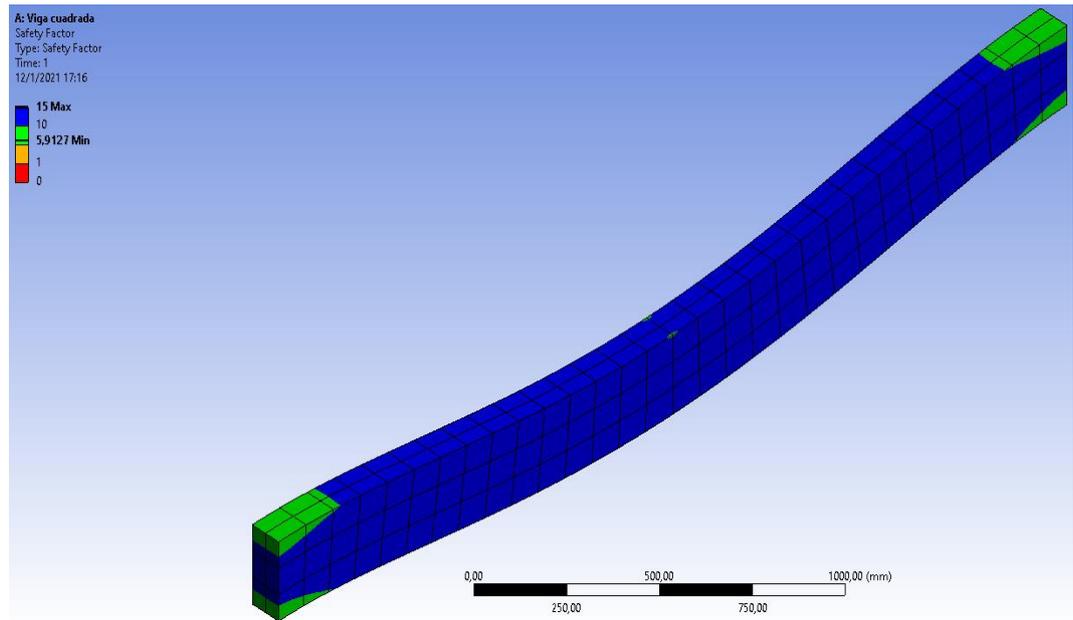
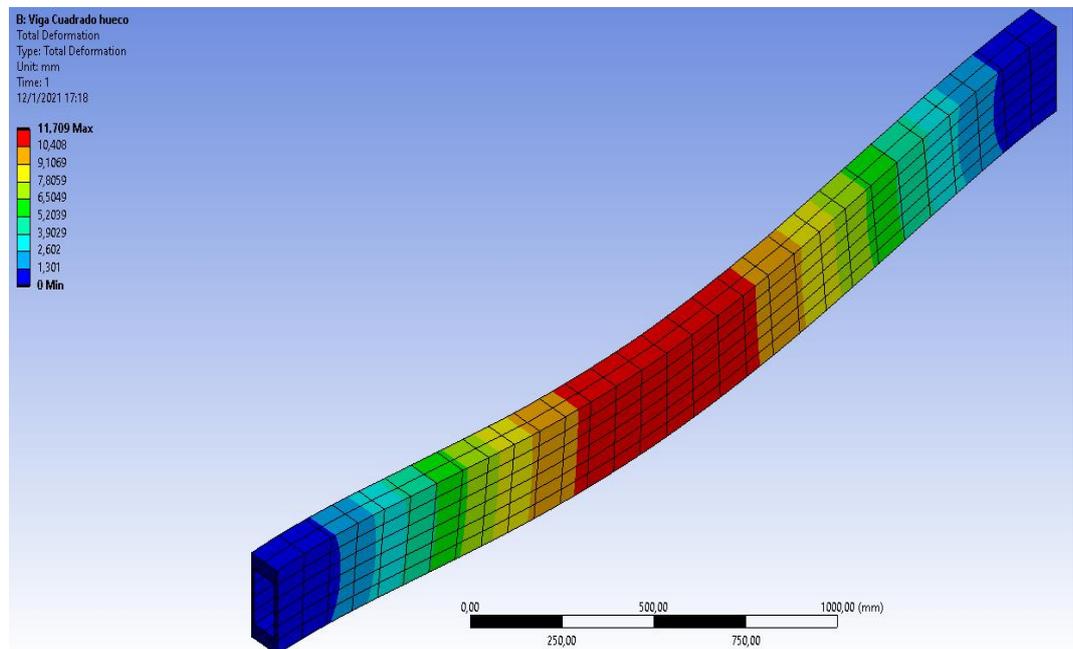


Figura 3.20 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil rectangular sólida  
Fuente: Elaboración Propia

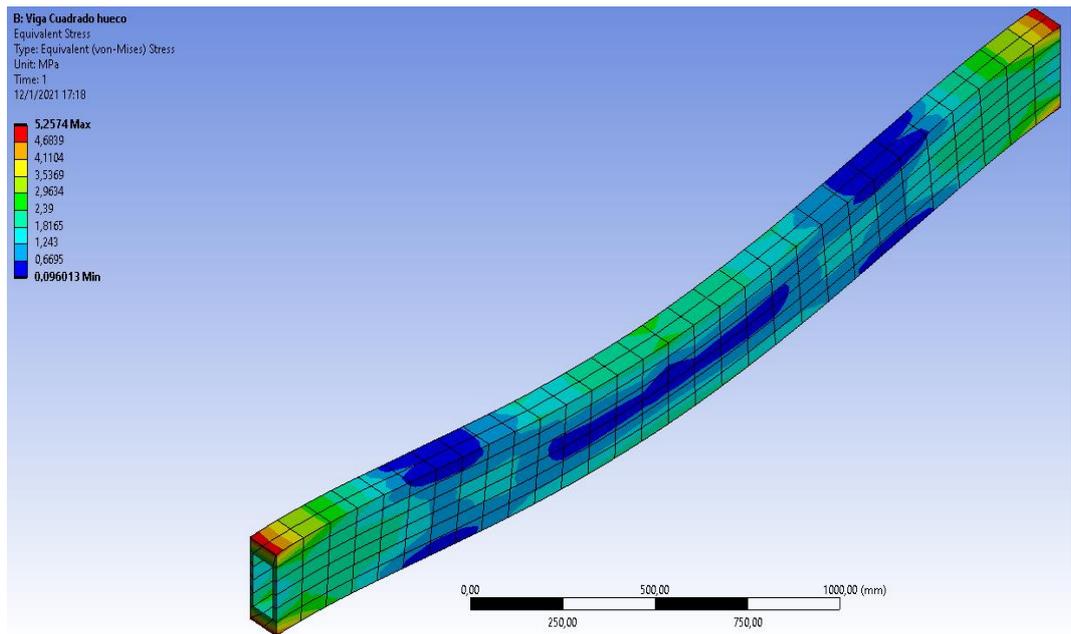


**Figura 3.21** Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil rectangular sólida  
 Fuente: Elaboración Propia

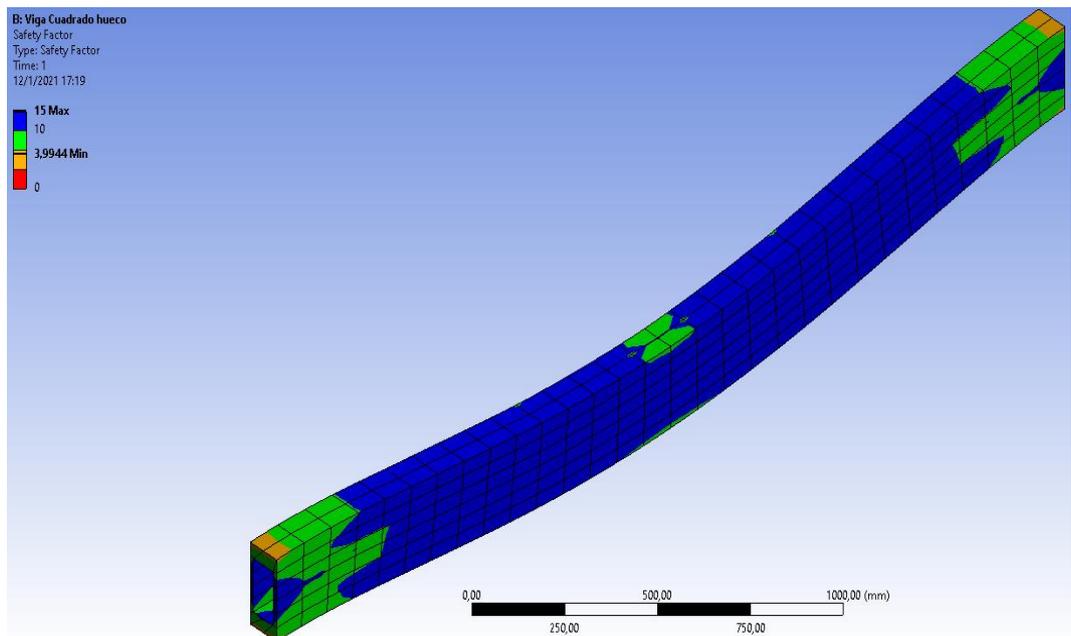
### Sección Rectangular hueca



**Figura 3.22** Análisis de la deformación total en la viga para un perfil rectangular hueca  
 Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.23** Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil rectangular hueca  
 Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.24** Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil rectangular hueca  
 Fuente: Elaboración Propia

## Sección I

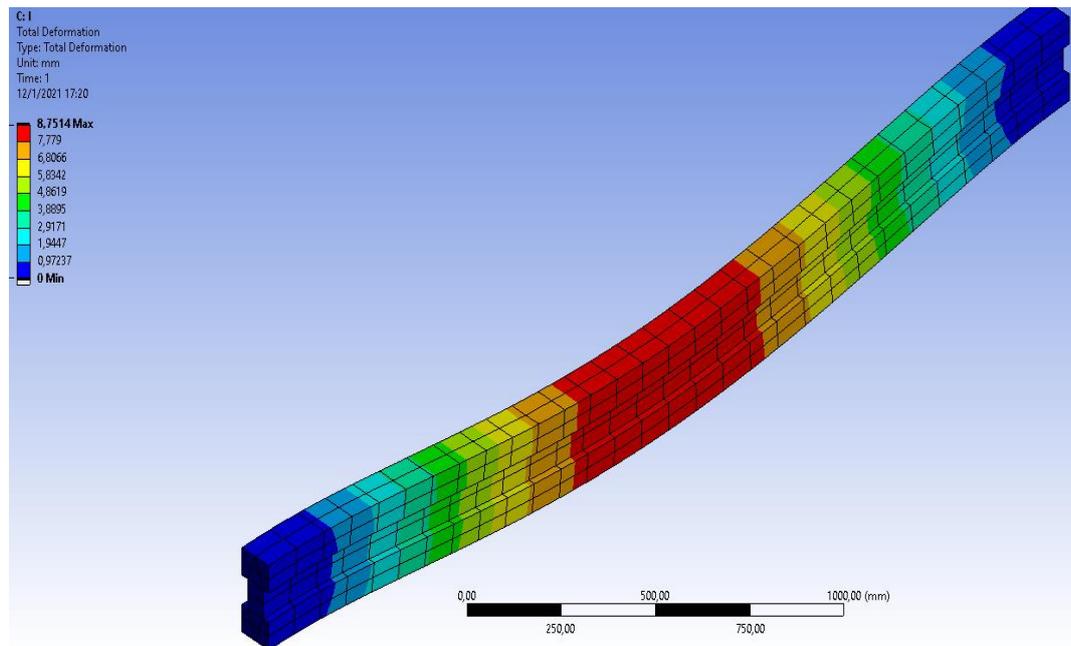


Figura 3.25 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de I  
Fuente: Elaboración Propia

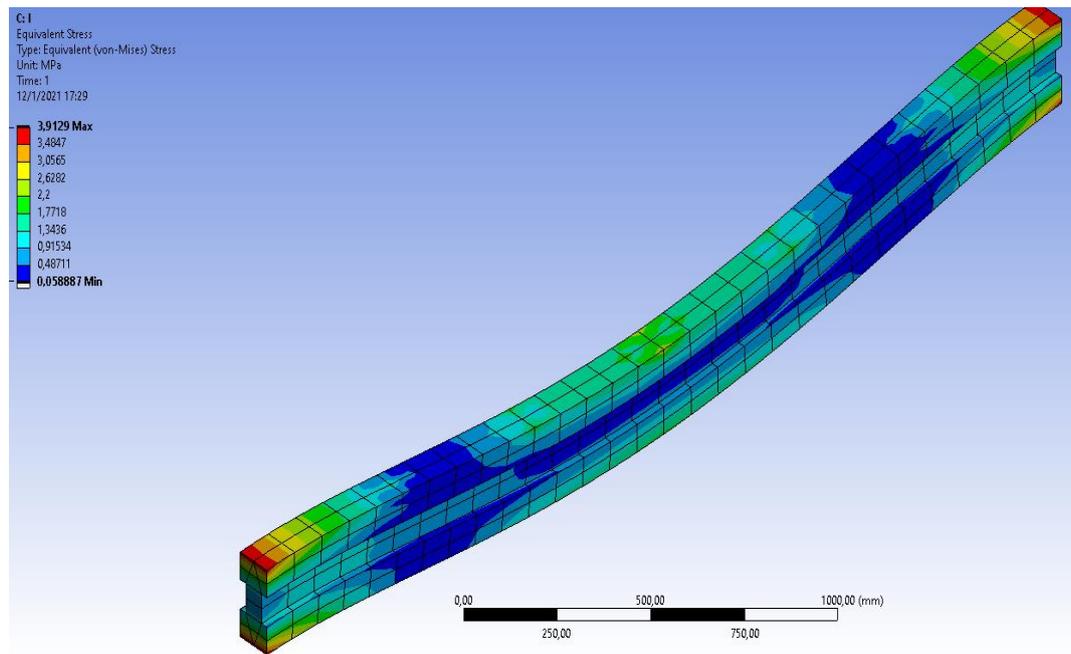
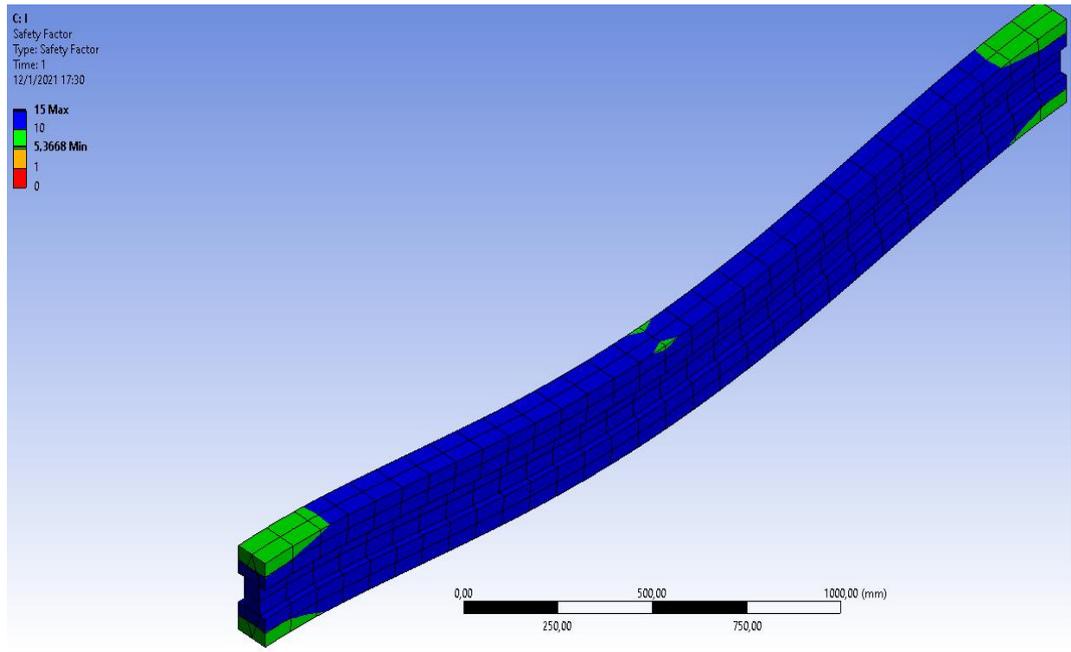
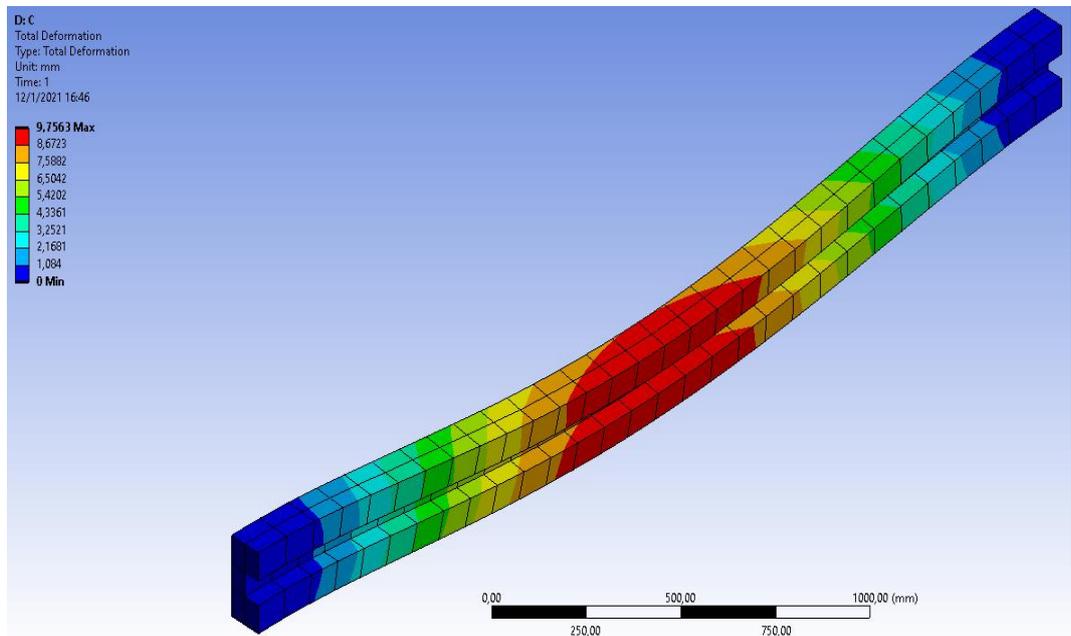


Figura 3. 26 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de I  
Fuente: Elaboración Propia

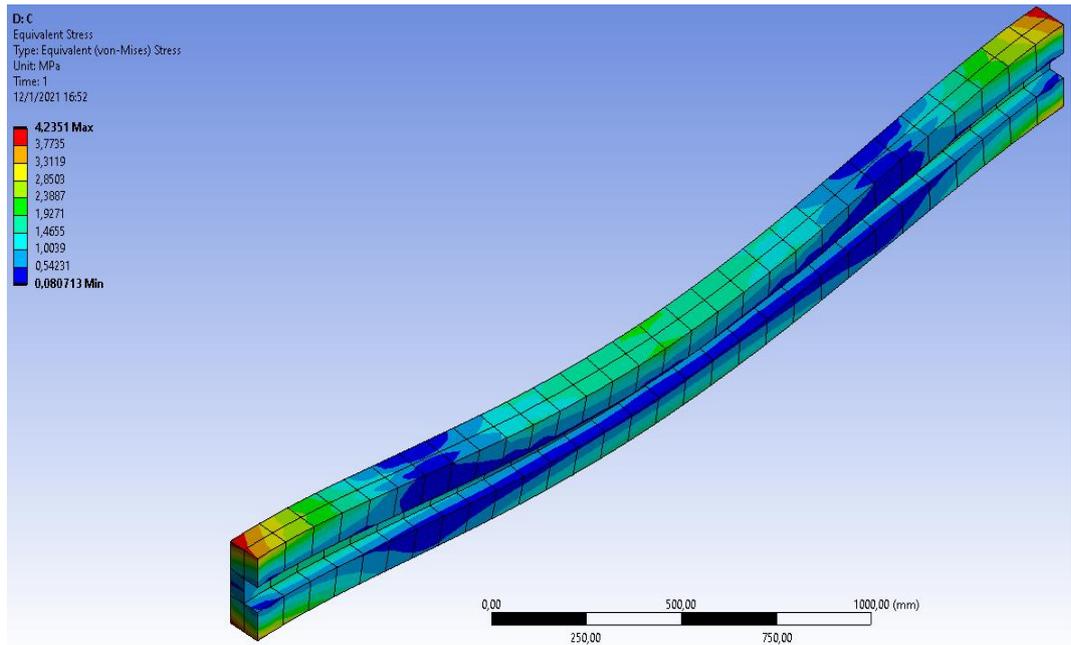


**Figura 3.27** Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de I  
 Fuente: Elaboración Propia

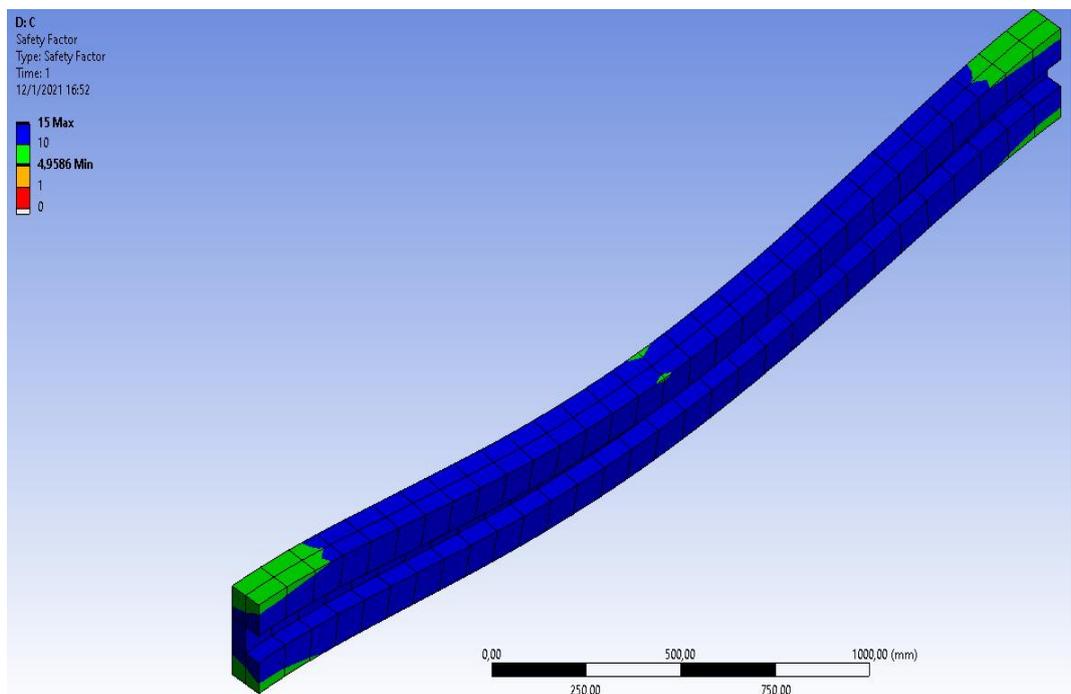
### Sección C



**Figura 3.28** Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de C  
 Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.29** Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de C  
 Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.30** Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de C  
 Fuente: Elaboración Propia

## Sección T

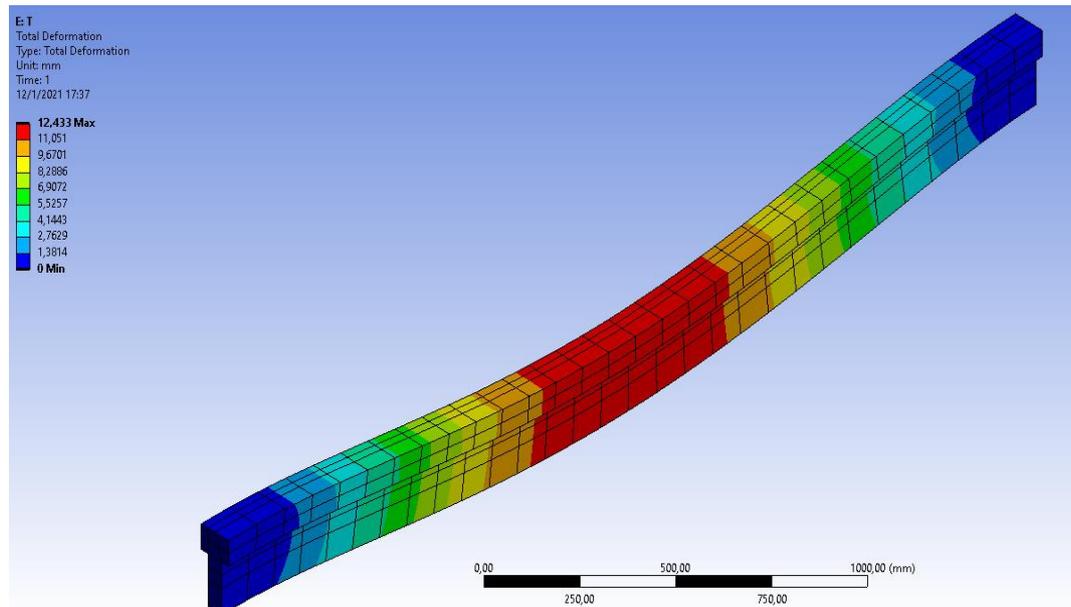


Figura 3.31 Análisis de la deformación total en la viga para un perfil de T  
Fuente: Elaboración Propia

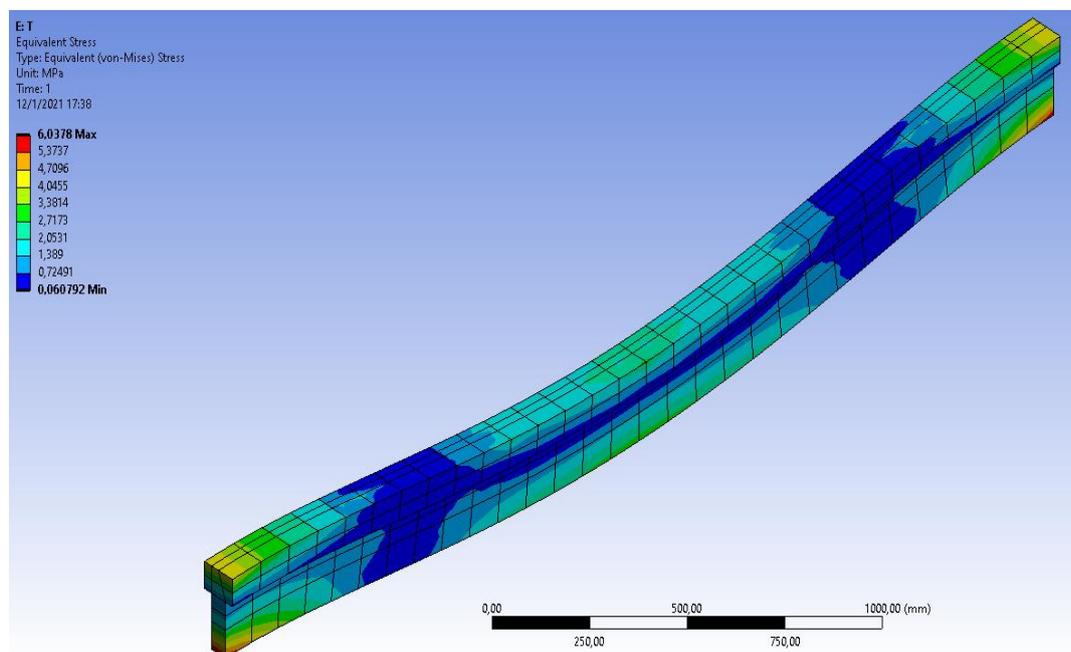
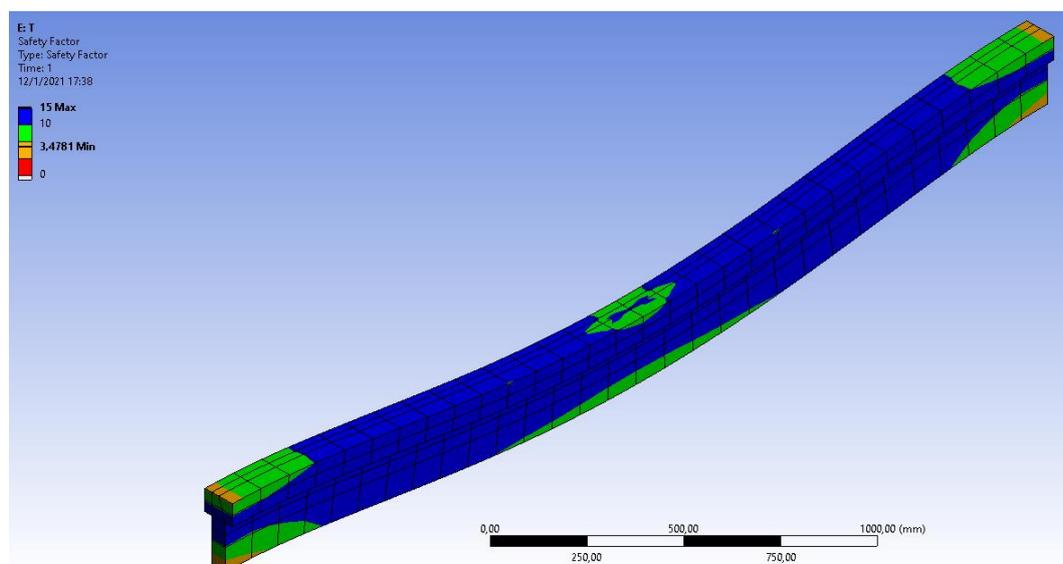


Figura 3.32 Análisis de esfuerzos Von-Mises en la viga para un perfil de T  
Fuente: Elaboración Propia



**Figura 3.33** Análisis del factor de seguridad en la viga para un perfil de T  
Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.11** Resultados tabulados de los análisis realizados mediante la simulación en ANSYS

Sección	Deformación máxima [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Factor de seguridad mínimo
Rectangular sólida	8.4	3.636	5.91
Rectangular hueca	11.71	5.3715	3.99
I	8.75	3.9129	5.37
C	9.76	4.2351	4.96
T	12.43	6.0378	3.48

Fuente: Elaboración Propia

En las simulaciones de las vigas con diferentes secciones transversales se realizó el análisis de la deformación, esfuerzos y factores de seguridad para determinar la sección que presente mejores resultados, considerando como criterio no solo a los basados en diseño mecánico y de manufactura sino también a los aspectos económicos.

Con respecto a los resultados de análisis de deformación, las secciones rectangulares hueca y T sobrepasaron el límite de deformación establecido por el manual de JUNAC para vigas de madera, el cual en este caso es de 10 mm máximo. Si bien nuestro material es un polímero compuesto, este proyecto tiene la finalidad de utilizar este material como materia prima alternativa a la madera para el diseño de vigas. Por lo tanto, a pesar de que desde un punto de vista económico los 2 perfiles mencionados resultaron tentadores puesto que consumen menos material, no cumplen con los requisitos que las normas de diseño de elementos estructurales demanda.

Con respecto a los resultados de análisis de esfuerzos y factores de seguridad en las vigas, todas las alternativas presentaron los esfuerzos máximos en sus extremos, lo cual es evidente debido al momento máximo que estos experimentan por la aplicación de las cargas de las viguetas más la de las reacciones producidas por el empotramiento. Esto se corroboró con los diagramas de fuerza cortante y momento flector obtenidos en la sección 3.7.1. Ahora bien, todas estas observaciones se relacionan también con el factor de seguridad, el cual es inversamente proporcional al esfuerzo, tal como se presentó en la ecuación 2.15 de la sección 2.4.5. Es así que, la viga con sección transversal T, la cual presenta mayor esfuerzo en sus extremos, posee el factor de seguridad mínimo en los mismos, y, la viga con sección transversal rectangular, la cual presenta menor esfuerzo en sus extremos, posee el factor de seguridad máximo en los mismos. No obstante, los resultados en general de los factores de seguridad obtenidos indican que ninguna de las vigas analizadas fallará estáticamente, pues el mínimo obtenido es de 3.48 en el extremo empotrado de la viga con sección transversal T.

Avanzados en nuestro análisis, se descartó indiscutiblemente las vigas cuyas secciones transversales son rectangular hueca y T, debido a que presentaron los factores de seguridad mínimos y, lo más importante, sobrepasaron la deformación máxima permitida. Dicho lo anterior, se tiene

que las vigas que cumplen con todos los criterios basado en su diseño y manufactura son las de sección transversal rectangular, I y C. Consideremos ahora el aspecto económico para la selección de la mejor viga entre estos 3 restantes, donde las vigas más económicas serán las que utilicen menos material para su fabricación. Teniendo en cuenta esto, la viga con sección rectangular sería la más costosa por lo cual quedó descartada. Finalmente, entre la viga de sección I y C, se escogió la primera puesto que presentó mejores resultados al poseer un factor de seguridad mayor al segundo.

### 3.7 Análisis de Costos

Una viga de rHDPE+CA+LOTADER con las dimensiones especificadas anteriormente y con sección transversal I requiere de 16 kg del material compuesto.

**Tabla 3.12 Obtención de la masa total por viga**

Parámetros	Valor
Volumen total de una viga	0,0594 m <sup>3</sup>
Densidad del material compuesto	267.5 kg/ m <sup>3</sup>
Masa total de una viga	15.89 kg

Fuente: Elaboración Propia

Con los resultados obtenidos en la sección 3.1 se supo que la capacidad de producción de una extrusora marca Costruzioni GDL para una mezcla de 92%rHDPE+3%CA+5%LOTADER es de 6.62 kg/h, por lo tanto, la fabricación de 1 viga tendría una duración de 2 horas y media. Ahora bien, teniendo en cuenta que la extrusora que se debería utilizar para la fabricación de la viga no debe tener dado alguno en la salida, sino que conectarse directamente a un molde con las dimensiones y sección transversal respectiva de la viga, la capacidad de producción aumentaría notablemente. Una extrusora de tornillo simple marca Nanjing Kerke posee una capacidad de 80 kg/h, por lo que permitiría la fabricación de 5 vigas por hora. Considerando una jornada de trabajo de 18h diarias, se fabricarían 90 vigas por día, y 2700 vigas al mes.

Para empezar, se tuvo el costo de la materia prima requerida:

**Tabla 3.13 Materia prima requerida para producción mensual de las vigas**

<b>Número de vigas mensual</b>		2700
<b>Masa total mensual</b>		43200 kg
<b>Materia prima</b>	<b>Porcentaje [%]</b>	<b>Masa total [kg]</b>
rHDPE	92	39744
CA	3	1296
LOTADER	5	2160

Fuente: Elaboración Propia

Se tuvo en cuenta que la cascarilla de arroz debe pasar previamente por un proceso de tamizado donde solo se obtiene un 7,2% de material aprovechado según la tabla 2.6.

**Tabla 3.14 Masa total requerida para la cascarilla de arroz**

Descripción	Valor
<b>Masa de CA requerido [kg]</b>	1296
<b>Porcentaje de CA aprovechado [%]</b>	7.2
<b>Masa total de CA requerida [kg]</b>	18000

Fuente: Elaboración Propia

Se consideró también que el rHDPE se vende por tonelada y la cascarilla de arroz y aditivo LOTADER se vende por sacos de 25 y 10 kg respectivamente.

**Tabla 3.15 Costo de materia prima requerida para producción mensual de las vigas**

Materia Prima	Cantidad [Kg]	Costo Unitario [\$/Kg]	Costo total [\$]
rHDPE [1000 kg]	39740	0.2	7948.8
CA [25 kg]	720	5	3600
LOTADER [10 kg]	216	30.53	6594.48
<b>Total</b>			<b>18143.48</b>

Fuente: Elaboración Propia

Posterior al análisis de costo de la materia prima, se tuvo los costos de consumo de energía por equipo

**Tabla 3.16 Costo de la energía consumida por equipo**

Equipo	KW	KWH	Costo \$/KWH	Costo total [\$]
Extrusora	1.21	653.4	0.08	52.27
Chiller	3	1620	0.08	129.6
			<b>Total</b>	181.87

Fuente: Elaboración Propia

Otro punto importante considerado para el análisis de costos fue el de los equipos de protección personal requeridos para el operario de la extrusora.

**Tabla 3.17 Costos de los equipos de seguridad necesarios**

Equipo	Cantidad	Costo Unitario [\$]	Costo total [\$]
Gafas de protección Industrial Dragger X-PECT 8110	1	4.76	9,52
Tapones Auditivos reutilizables 3M 1270	1	1	2
Guantes para soldar	1	6.09	12.18
			<b>Total</b>
			23.7

Fuente: Elaboración Propia

Se obtuvo así el costo total de producción donde se consideró también el sueldo del operario de la extrusora.

**Tabla 3.18 Costo total de producción mensual**

Descripción	Total
Materia Prima	\$ 18143.28
Consumo de energía	\$ 181.87
Equipos de seguridad	\$ 23.7
Mano de obra	\$ 400
<b>Costo total de producción</b>	<b>\$ 18748.85</b>

Fuente: Elaboración Propia

Para el establecimiento del precio de venta unitario de la viga se requirió una utilidad de 100% costo total de producción:

$$Utilidad = Ingresos - Costo total \quad (3.1)$$

$$Ingresos = 2 * Costo total \quad (3.2)$$

$$Ingresos = P_{venta} * N_{unidades} \quad (3.3)$$

Donde  $P_{venta}$  es el precio de venta unitaria del producto y  $N_{unidades}$  el número de unidades de producción mensual. De modo que:

$$P_{venta} = \frac{2 * Costo total}{N_{unidades}} = \frac{2 * 18748.85}{2700}$$

$$P_{venta} = \$14$$

Este precio es bastante accesible considerando que una viga de madera de 3m de longitud y 100x230 mm de sección en el mercado ecuatoriano tiene un costo neto unitario de \$12.04. El valor agregado es mínimo si se tiene en cuenta las ventajas que el polímero ofrece frente a la madera al ser resistente a factores ambientales como la lluvia y de fácil mantenimiento, además de ser innovador al promover la iniciativa de la economía circular.

Para finalizar, cabe mencionar que el porcentaje de cascarilla de arroz en el material puede aumentar un 10 y hasta un 20% utilizando una extrusora que posea una zona específica para la mezcla de rHDPE y CA. Esto aumentaría la rigidez del material y permitiría el diseño de vigas con otras secciones transversales como el rectangular hueco y la T, que disminuyen la cantidad de materia prima en su fabricación y en consecuencia su costo unitario.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- La temperatura de salida del material indica el grado de viscosidad que esta posee y se corrobora con los resultados del ensayo de índice de fluidez, el cual es inversamente proporcional a la viscosidad. Sirva de ejemplo la mezcla C que, si bien posee la menor temperatura de salida según lo captado mediante la cámara infrarroja, tiene el mayor índice de fluidez según los resultados obtenidos del MFI.
- La mezcla de rHDPE puro si bien presenta mejores resultados con respecto a la energía total requerida para su procesamiento, posee menos flujo volumétrico que el resto por lo cual, el consumo de energía por kilogramo es el menor. En contraste, la mezcla de rHDPE+CA+RETAIN es la que mayor cantidad de energía demanda; sin embargo, muestra una reducción de más del 50% en los valores de consumo de energía específico frente a los obtenidos para la mezcla de rHDPE puro al obtener mayor cantidad de material bajo los mismos parámetros de operación.
- El refuerzo de la cascarilla de arroz aumenta la viscosidad del rHDPE, mientras que los aditivos la disminuyen. Es por esto que el flujo volumétrico de la mezcla con rHDPE aumenta con el aditivo y, en consecuencia, disminuye el consumo de energía específica en su procesamiento.
- Los aditivos utilizados para las mezclas de rHDPE+CA influyen de maneras diferentes en las propiedades mecánicas del material comparado al uso de rHDPE puro. El aditivo RETAIN contribuye a la mezcla con mayor ductilidad, mientras que el aditivo LOTADER aumenta la resistencia a la tracción y rigidez del material.
- La mezcla de rHDPE+CA+LOTADER es la óptima como materia prima para el diseño de la viga pues comprueba ser el más rígido al poseer el

mayor módulo de elasticidad; además, requiere menos energía durante su procesamiento comparado al que la mezcla de rHDPE puro demanda.

- Los esfuerzos predominantes en el diseño de la viga son de flexión debido a los momentos flectores que las cargas puntuales ejercen sobre la misma. Es por esto que, en los resultados obtenidos mediante la simulación en ANSYS, los esfuerzos principales son muy cercanos a los de Von Mises, aunque este último considere esfuerzos cortantes.
- El refuerzo de la cascarilla de arroz en el rHDPE sin aditivo presenta problemas de obstrucción en el dado de la extrusora debido a la falta de coalescencia o incompatibilidad entre la cascarilla de arroz y la matriz polimérica, lo cual se ve solucionado mediante el empleo del aditivo compatibilizador.
- Las vigas con sección rectangular hueca y T se descartan como alternativa al uso de vigas de madera ya que no cumplen con el criterio de deformación máxima permitida según el manual de JUNAC para el diseño de estructuras de madera. Por otra parte, la viga con sección rectangular sólida presenta los mejores resultados en cuanto a diseño; sin embargo, desde un punto de vista comercial, la viga con sección I es mejor puesto que, aparte de poseer resultados similares al rectangular sólido, requiere de menos material para su fabricación.
- El costo de una viga con las dimensiones y sección transversal propuesta tiene un costo total unitario de \$14, el cual, comparado con el precio de una viga de madera con dimensiones aproximadas en el mercado ecuatoriano de \$12, nos da un excedente de \$2 más en costo. Sin embargo, es preciso acotar que la producción de estas vigas se sustenta en la economía circular al ser un producto 95% a base de reciclado, por lo que el valor agregado queda justificado.

## 4.2 Recomendaciones

- Revisar de antemano el correcto funcionamiento de las resistencias eléctricas y sensores de la extrusora, sobre todo los sensores de temperatura para prevenir que estos sobrepasen la temperatura de

degradación de la fibra natural o, en su contraparte, no alcancen la temperatura de fusión del polímero a emplear.

- Mantener en todo momento la presión a la salida de la extrusora por debajo de los 300 bares mediante el control de las revoluciones del tornillo, con la finalidad de evitar la expulsión del dado a alta presión.
- Extraer toda la humedad de los pellets obtenidos posterior al proceso de extrusión de todas las muestras, dejándolas secar por lo menos 24 horas dentro de la estufa para determinar el valor real de su peso y evitar la propagación de errores en los resultados del consumo de energía específico.
- Elaborar las probetas para cada mezcla mediante la técnica de prensado, con el objetivo de analizar la influencia de esta técnica en las propiedades mecánicas del material.
- Para utilizar cascarilla de arroz como fibra natural de refuerzo dentro de una matriz polimérica es recomendable utilizar un aditivo que mejore la coalescencia entre estos para evitar problemas en su procesamiento o, utilizar una extrusora de doble tornillo que mejore el mezclado entre la cascarilla y el polímero.
- Se recomienda utilizar una extrusora que posea una zona específica de mezclado para aumentar el porcentaje de cascarilla de arroz en el rHDPE, lo cual incrementaría la rigidez del material y permitiría el diseño de vigas con otras secciones transversales como el rectangular hueco y la T, que disminuyen la cantidad de materia prima en su fabricación y en consecuencia su costo unitario.
- Utilizar los equipos de protección personal adecuados para cada proceso llevado a cabo como los guantes térmicos para la manipulación de la extrusora y, las gafas y orejeras para la operación de la trituradora.
- Verificar que los tamices necesarios no posean orificios que no correspondan al mallado del mismo para evitar el pase de partículas con tamaños mayores al filtro de la extrusora.

# BIBLIOGRAFÍA

- (MIDUVI), M. D. (2016). *PROGRAMA CASA PARA TODOS (Lineamientos mínimos para registro y validación de tipologías de vivienda)*. ECUADOR : MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y DE VIVIENDA (MIDUVI).
- Alvarado, V. H. (2014). *Vivienda con estructura de madera en la ciudad de Guayaquil*. Samborondón-Ecuador: Universidad de Especialidades Espíritu Santo (UESS).
- Carlos Córdoba, J. M. (Diciembre de 2010). APROVECHAMIENTO DE POLIPROPILENO Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RECICLADOS, REFORZADOS CON FIBRA VEGETAL, TETERA (Stromanthe Stromathoides). *Revista Iberoamericana de Polímeros*.
- Censos, I. N. (Julio de 2018). *Estadística de Información Ambiental Económica en Gobierno Autónomos Descentralizados Municipales*. Quito: INEC. Obtenido de Estadística de Información Ambiental Económica en Gobierno Autónomos Descentralizados Municipales.
- Chamil Abeykoon, J. V.-S.-J. (2013). *Correlations between Process Thermal Stability and Energy Demand in Polymer Extrusion*. Manchester : The University of Manchester.
- CNEL. (2020). *PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN* . Ecuador : AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD .
- Ecuador, M. (Miércoles 6 de Mayo de 2020). Los desechos plásticos se han incrementado debido al coronavirus. *Metro Ecuador*.
- Ferninand L. Singer, A. P. (1994). *Resistencia de materiales - Introducción a la mecánica de sólidos (Cuarta edición)*. México: HARLA-México.
- Fiallos, E. A. (2015). *DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE POLIURETANO RÍGIDO REFORZADO CON FIBRA DE CABUYA Y RAQUIS DE PALMA AFRICANA*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- García, D. I. (2003). *ESTUDIOS DE PROCESABILIDAD PARA POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD REFORZADO CON CISCO DE CAFÉ*. BOGOTA, D.C.: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES .

- García, J. M. (2008). *Estudio Comparativo de las propiedades mecánicas y reológicas de compuestos de polietileno de alta densidad con cascarilla de arroz y bagazo de caña*. Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- J. Vargas, P. A.-B. (2013). *Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala .
- Julia Desirée Herrera Lossa, M. C. (2017). *Diseño de paneles para techo a partir de mezclas de reciclado de Polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de alta densidad (HDPE) para un programa de vivienda urbana*. Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Julio Gaona, J. D. (2019). *ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD REICLADO REFORZADO CON CASCARILLA DEO ARROZ*. Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- JUNAC. (2000). *MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO* . Cartagena : JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA (JUNAC).
- Medina, O. F. (2003). Extrusión de Perfiles Espumados de Madera Plástica. *Revista de Ingeniería N°18*, 200.
- Mendes, L. C. (2013). Properties of recycled high density polyethylene and coffee dregs composites. vol.23 no.6. Centro de Tecnologia, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano-IMA, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- MIDUVI. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción para cargas no sísmicas ( Código NEC-SE-CG)*. Ecuador: Ministerio de desarrollo Urbano y de Vivienda.
- MIDUVI, S. P. (2016). *Guía práctica para el diseño de estructuras de madera de conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC 2015*. Quito-Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda y Secretaría de Gestión de Riesgos.
- Morán, S. (23 de Junio de 2020). *PLAN V*. Obtenido de Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030: <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/ecuador-ahogado-basura-esta-lejos-cumplir-metas-ods-al-2030>
- Omar Estrada, J. C. (2020). *Experimental study of energy performance of grooved feed and grooved plasticating single screw extrusion processes in terms of SEC*,

*theoretical maximum energy efficiency and relative energy efficiency.* Colombia: ELSEVIER .

- Restrepo, C. A. (2014). *EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS PERFILES EXTRUIDOS A PARTIR DE MEZCLAS DE POLIMEROS RECICLADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ESTIBAS DE MADERAS PLÁSTICAS EN MADERPOL S.A.S.* Medellín: UNIVERSIDAD EAFIT (Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Producción).
- Rommel Humberto Salas Arévalo, L. A. (2018). *Efecto del Procesamiento de Polietileno de Alta densidad reciclado en la demanda de energía en el proceso de extrusión.* Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL).
- Suquillo, D. L. (2013). *Reutilización de Polímeros reciclados en la fabricación de elementos estructurales.* Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Universo, E. (4 de Noviembre de 2020). Asamblea Nacional aprueba proyecto de Ley que regula la utilización y comercialización de productos plásticos de un solo uso. *El Universo*.
- V. Amigó, M. S. (2008). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD RECICLADO REFORZADO CON FIBRAS NATURALES.* Cali-Colombia: Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Instituto Tecnológico del Plástico-AIMPLAS.
- Valencia, E. D. (2014). *Norma Ecuatoriana de la construcción para Estructuras de Madera (Código NEC-SE-MD).* Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Vanessa Prieto-Sandoval, C. J. (2017). *Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación.* San Sebastian, España: Universidad de Navarra, TECNUN. .

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

Tabla A. 1 Ficha técnica de la Tamizadora

Equipo	Tamizador Vibratorio
Marca	BIOBASE
Modelo	BK-TS200
Serie	190819103
Fuente de Alimentación	AC 220 V 60 HZ

Tabla A. 2 Ficha técnica de la Estufa

Equipo	Estufa
Marca	SECAGEM
Modelo	Q317M-33
Serie	09014138
Fuente de Alimentación	110/220 V

Tabla A. 3 Ficha técnica de la Balanza

Equipo	Balanza
Marca	BOECO Germany
Modelo	BWL 61
Serie	592624/18
Peso máximo/mínimo	6 kg/5g
Incertidumbre	+ - 0.1 g

**Tabla A. 4 Ficha técnica de la Extrusora**

<b>Equipo</b>	<b>Extrusora Industrial</b>
<b>Marca</b>	Costruzioni GDL
<b>Modelo</b>	LET 70
<b>Serie</b>	96231
<b>Fuente de Alimentación</b>	220 V 60 Hz

**Tabla A. 5 Ficha técnica de la Inyectora**

<b>Equipo</b>	<b>Inyectora</b>
<b>Marca</b>	LIEN YU MACHINERY
<b>Modelo</b>	D.75
<b>Serie</b>	075255
<b>Capacidad calorífica</b>	5 KW
<b>Motor</b>	10 HP

**Tabla A. 6 Ficha técnica de la Máquina Universal de Ensayos 10 KN**

<b>Equipo</b>	<b>Máquina Universal de Ensayos 10 KN</b>
<b>Marca</b>	Shimadzu
<b>Modelo</b>	AG-IS-10 KN
<b>Código</b>	A-EM-010-00
<b>Serie</b>	346-51961-01

**Tabla A. 7 Ficha técnica del Chiller**

<b>Equipo</b>	<b>Chiller</b>
<b>Marca</b>	Costruzioni GDL
<b>Modelo</b>	Y1-1308
<b>Serie</b>	97594
<b>Fuente de alimentación</b>	220 V
<b>Potencia</b>	3 KW

**Tabla A. 8 Ficha técnica del Analizador Térmico DSC**

<b>Equipo</b>	Analizador Térmico DSC
<b>Marca</b>	TA
<b>Modelo</b>	Q200
<b>Código</b>	EM-003-00
<b>Serie</b>	NNN

# APENDICE B

## RESULTADOS DE LAS IMÁGENES TÉRMICAS

### MUESTRA A

5 min

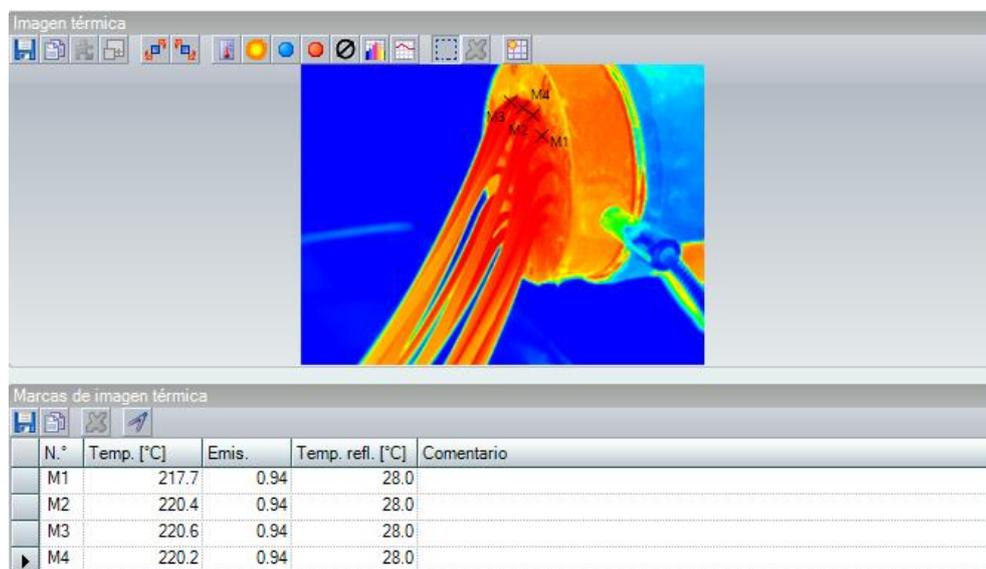


Figura B.1 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra A

10 min

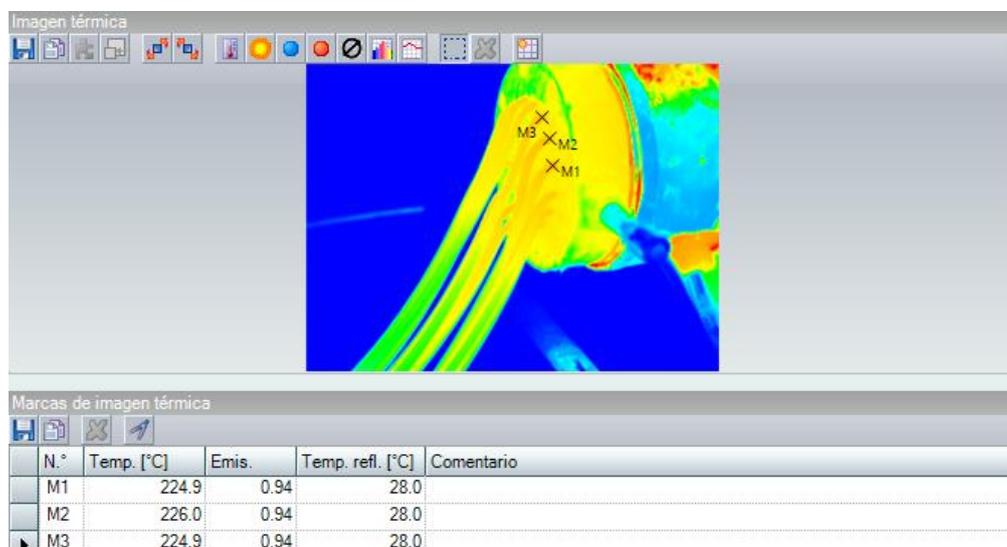


Figura B.2 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra A

15 min

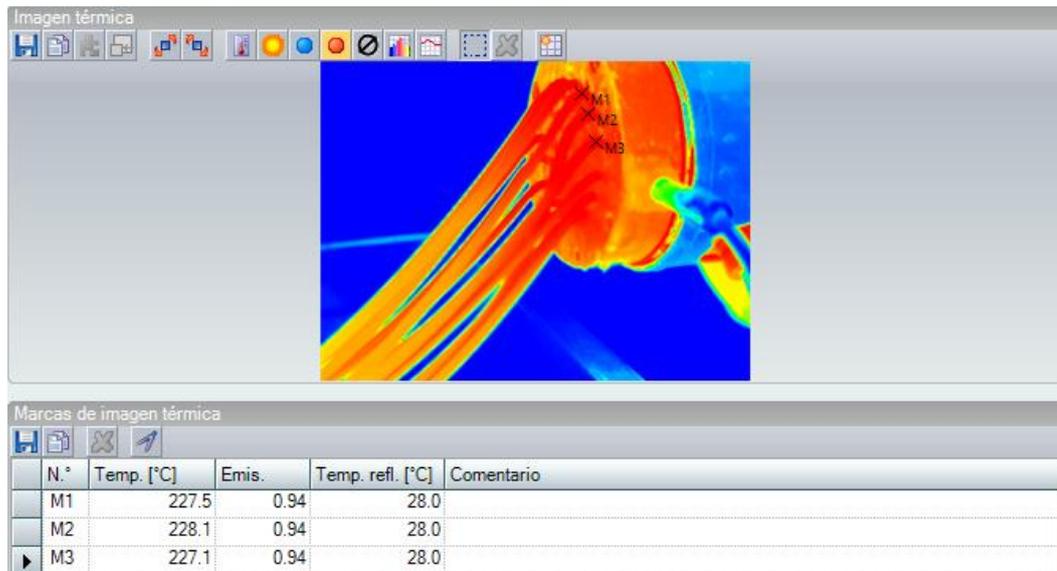


Figura B.3 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra A

20 min

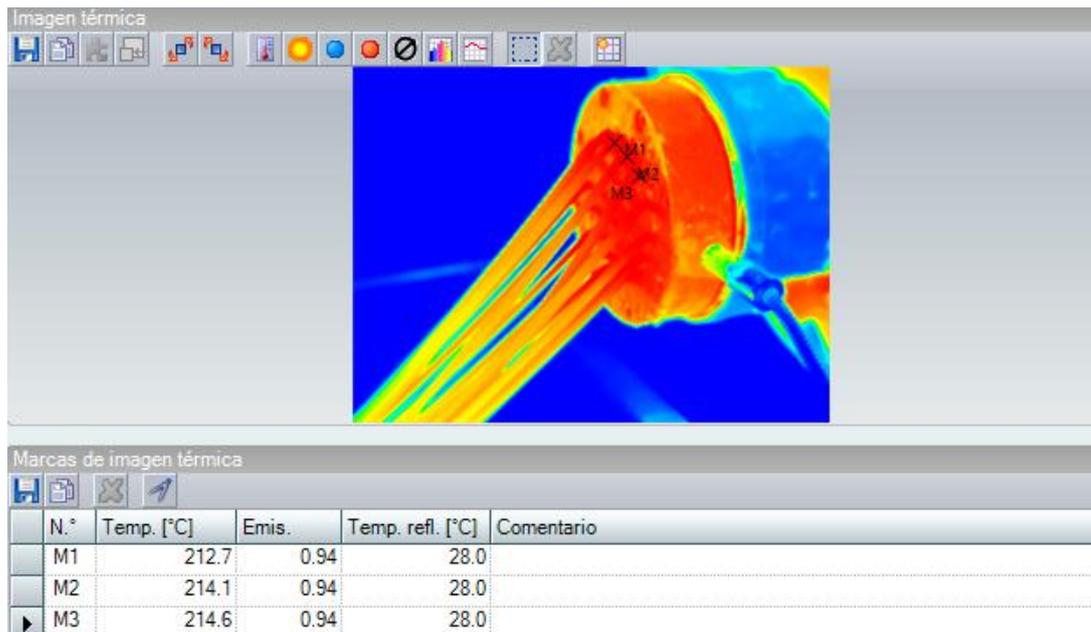


Figura B. 4 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra A

## MUESTRA C

5 min

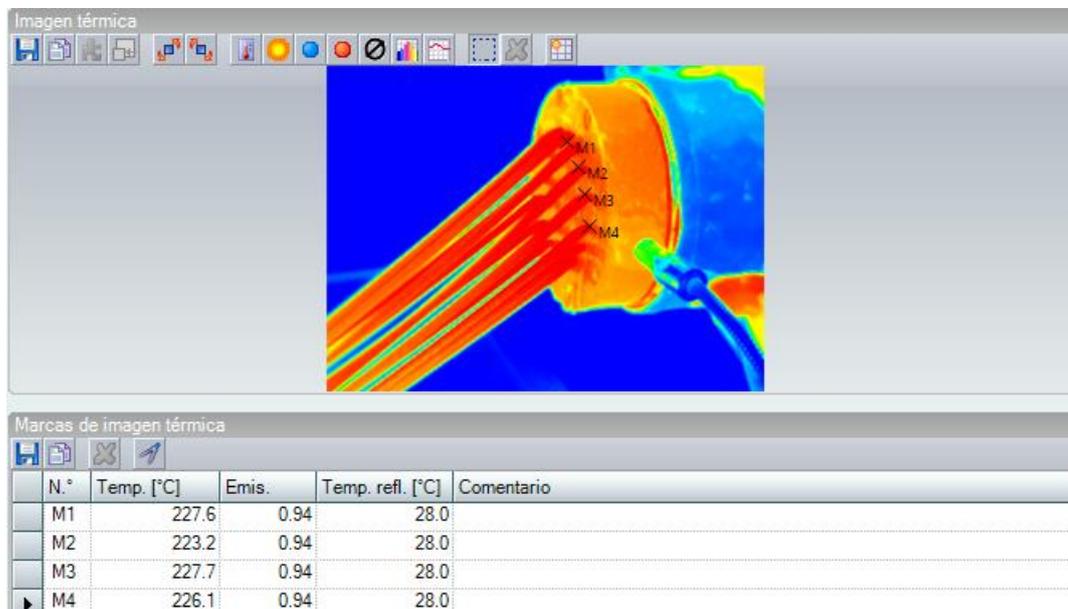


Figura B.5 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra C

10 min

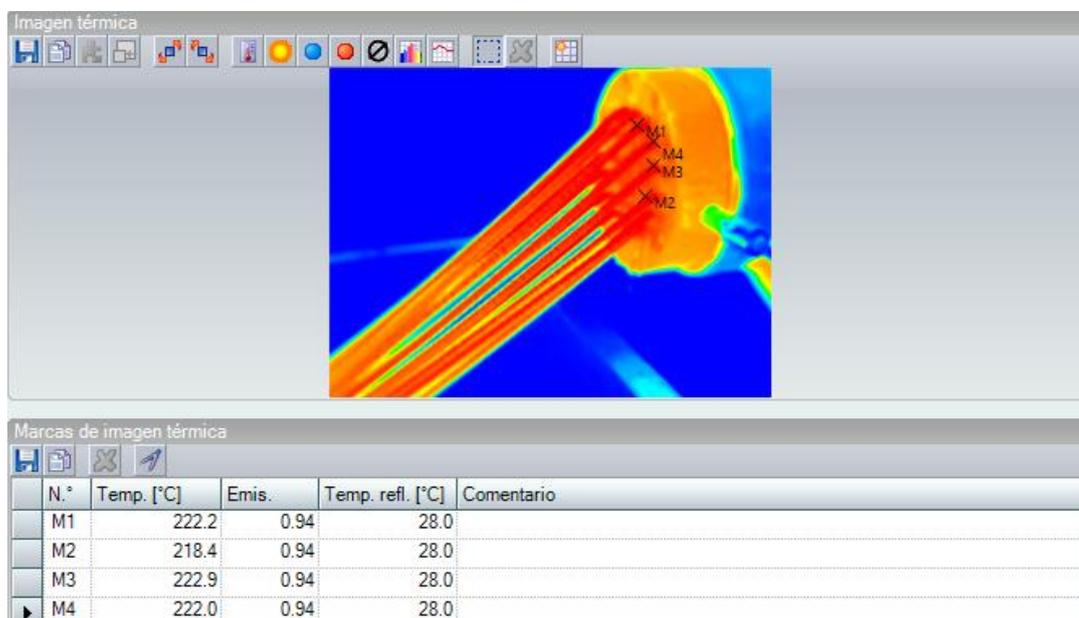


Figura B. 6 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra B

15 min

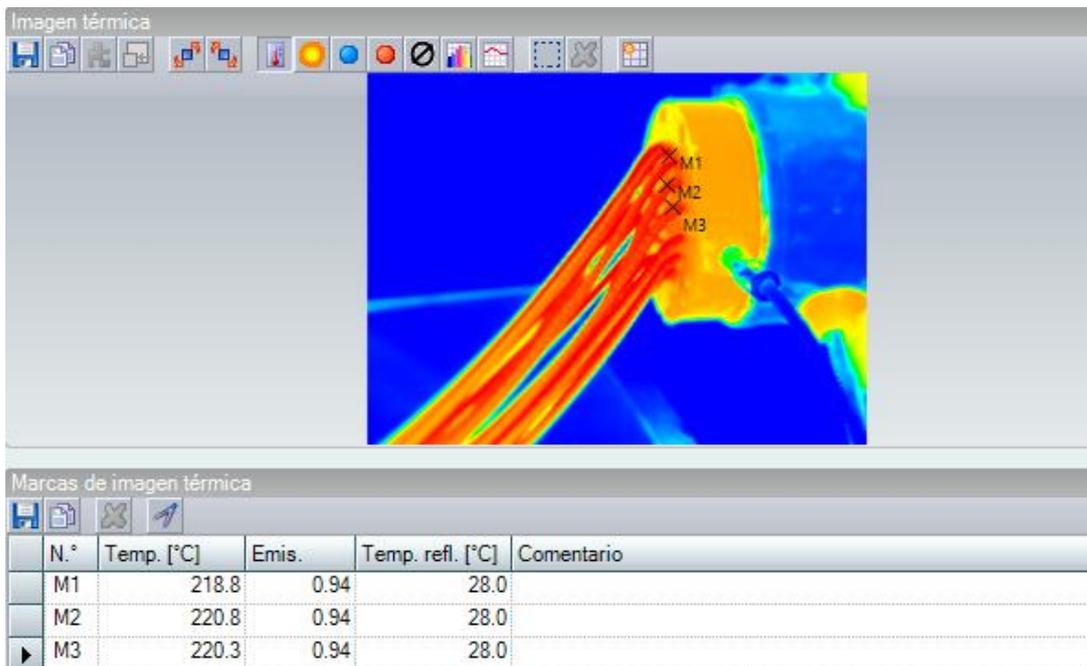


Figura B.7 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra B

20 min

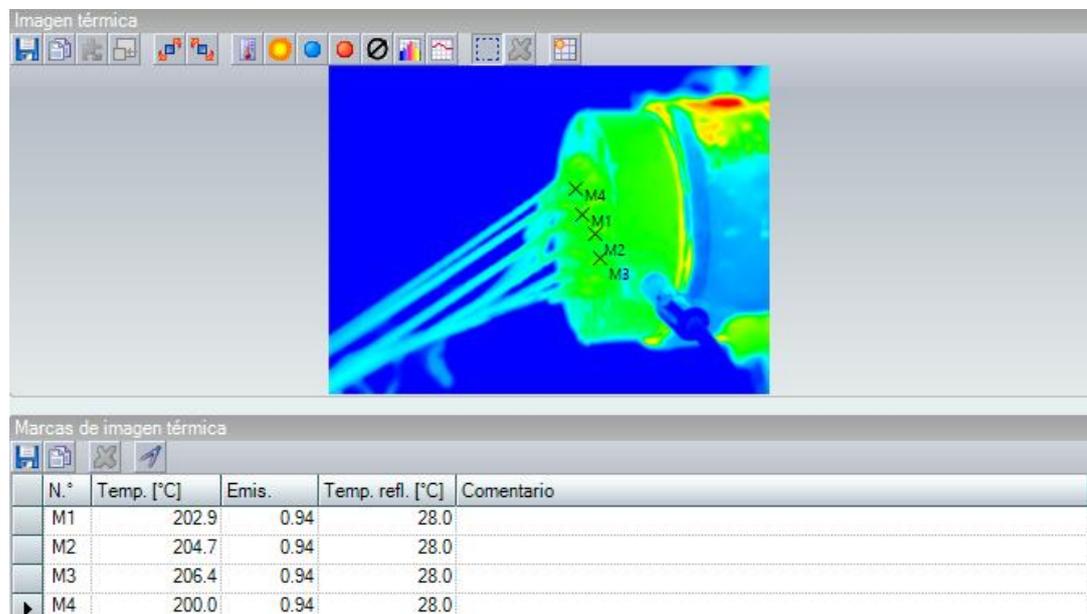


Figura B.8 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra B

## MUESTRA D

5 min

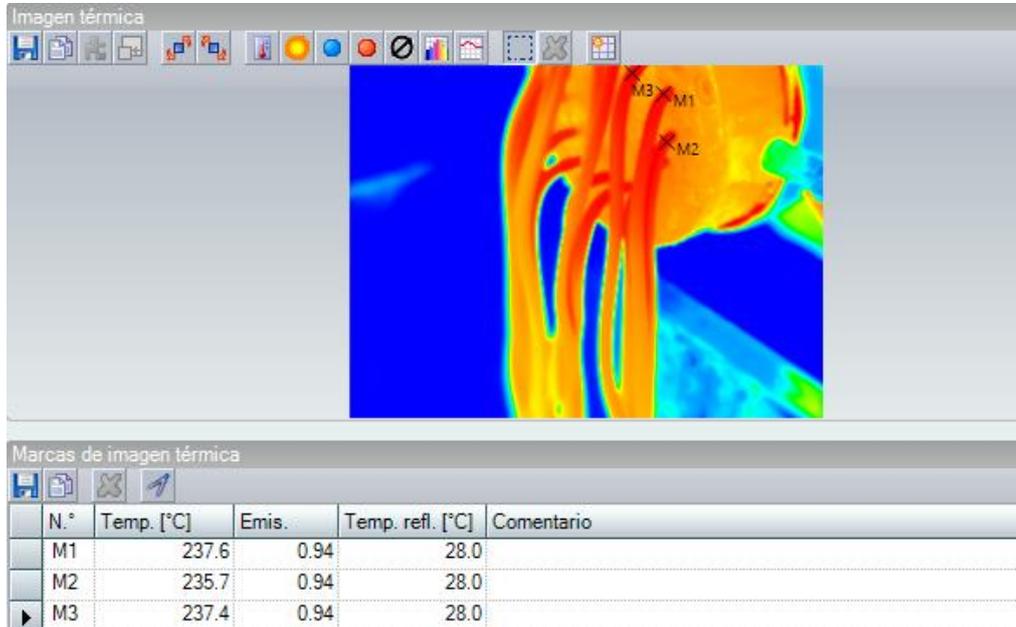


Figura B.9 Imagen térmica del material extruido a los 5 minutos de la muestra D

10 min

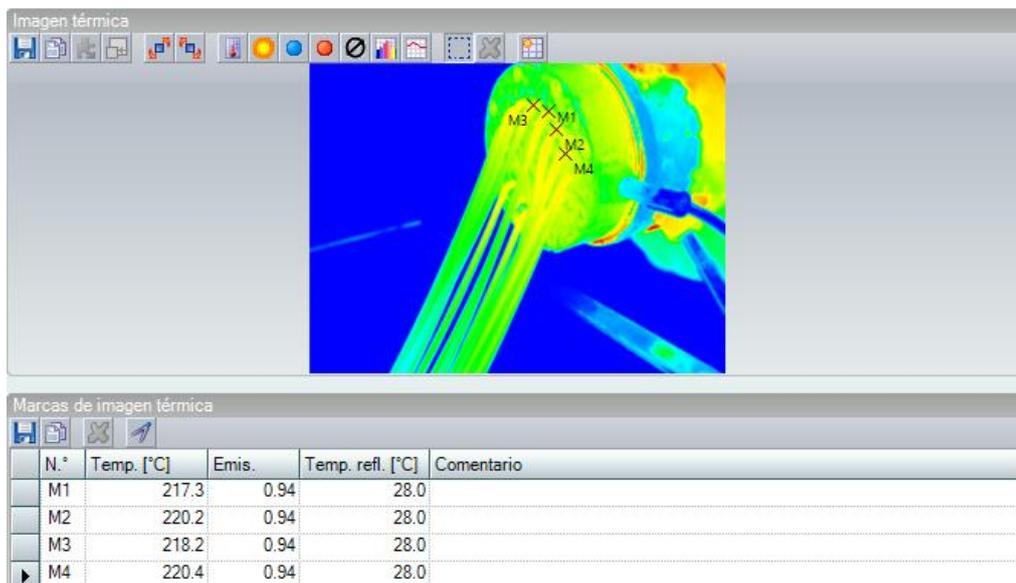


Figura B.10 Imagen térmica del material extruido a los 10 minutos de la muestra D

15 min

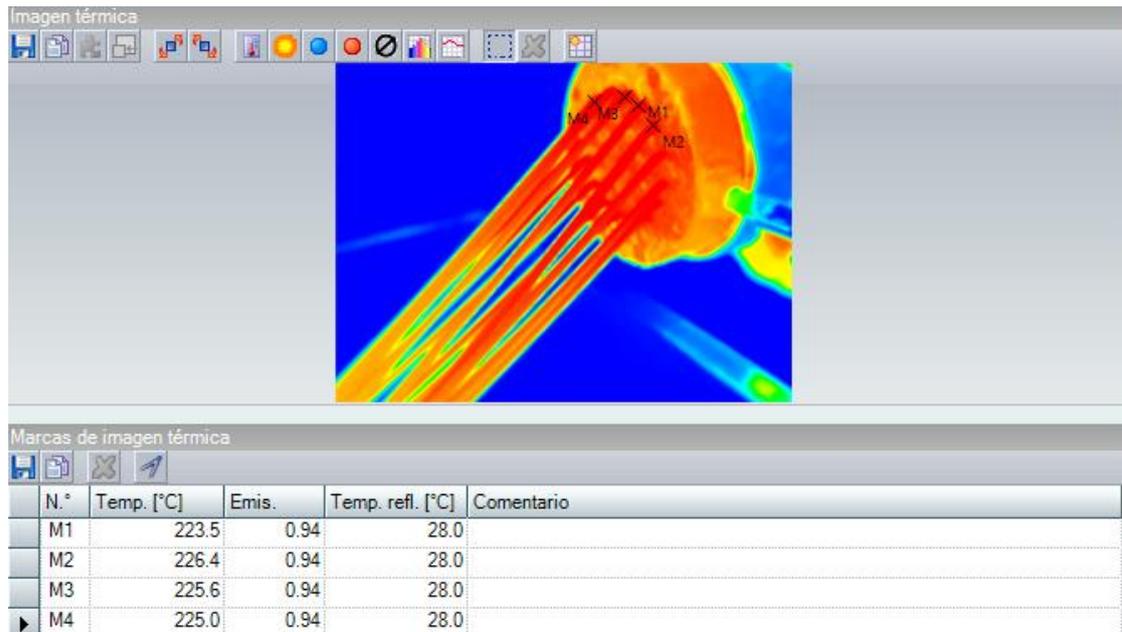


Figura B.11 Imagen térmica del material extruido a los 15 minutos de la muestra D

20 min

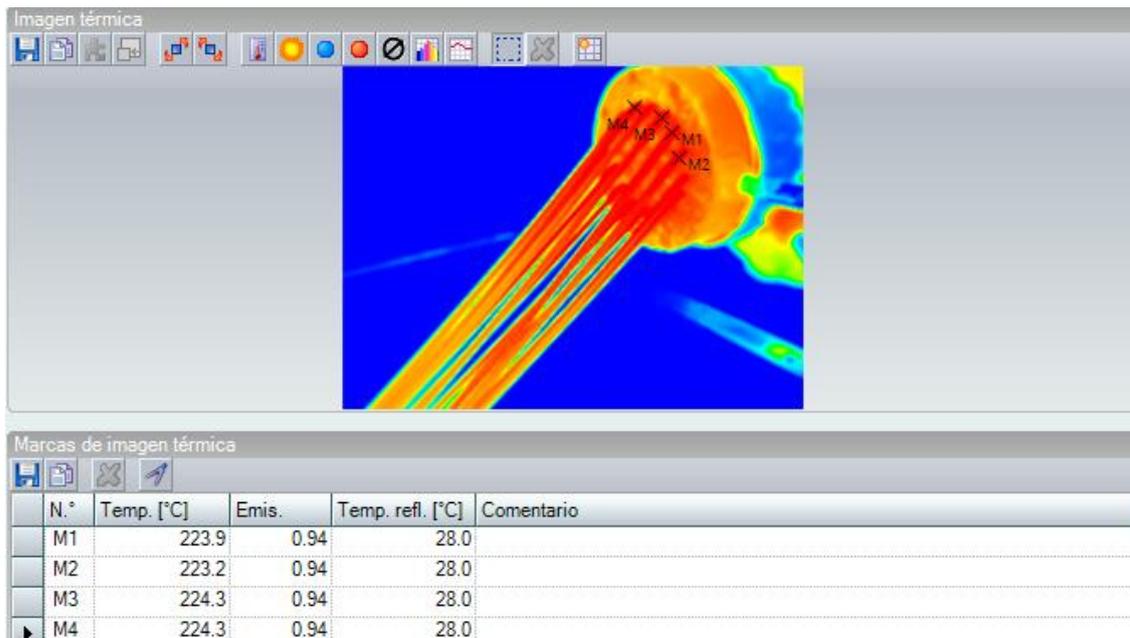


Figura B.12 Imagen térmica del material extruido a los 20 minutos de la muestra D

## APÉNDICE C

### MEDICIONES DEL CONSUMO DE ENERGÍA PARA LAS DIFERENTES MEZCLAS

**Tabla C.1 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra A  
(100% rHDPE)**

Muestra:	A	Densidad:			0.000321619	
Intervalos de tiempo	5 min	10 min	15 min	20 min	Promedio	
Masa [kg]	0.615	0.511	0.370	0.390	0.47	
Temperatura de salida [°C]	219.73	225.27	227.10	213.80	221.48	
Consumo de energía [kW]	0.40	0.94	1.01	3.77	1.53	
Consumo de energía [kWh]	0.03	0.08	0.08	0.31	0.13	
Consumo de energía [J]	120000.00	283200.00	303600.00	1130400.00	459300.00	
Consumo de energía específica [J/g]	195.25	554.64	820.76	2896.23	1116.72	
Presión [Pa]	158	169	214	214	214	
Caudal [cm <sup>3</sup> /s]	203	233	222	205	215.75	

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla C.2 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra C  
(92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN)**

Muestra:	C	Densidad:			0.000242358	
Intervalos de tiempo	5 min	10 min	15 min	20 min	Promedio	
Masa [kg]	1.115	1.450	1.165	0.855	1.15	
Temperatura de salida [°C]	227.95	221.38	219.96	203.50	218.20	
Consumo de energía [kW]	2.04	2.03	0.98	2.21	1.81	
Consumo de energía [kWh]	0.17	0.17	0.08	0.18	0.15	
Consumo de energía [J]	612900.00	609450.00	292500.00	662400.00	544312.50	
Consumo de energía específica [J/g]	549.69	420.31	251.07	774.74	498.95	
Presión [Pa]	230	230	200	200	200	
Caudal [cm <sup>3</sup> /s]	228	209	200	210	211.75	

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla C.3 Tabla de resultados para la medición del consumo de energía de la Muestra D  
(92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER) [Elaboración Propia]**

<b>Muestra:</b>	<b>D</b>	<b>Densidad:</b>			0.0002675
<b>Intervalos de tiempo</b>	<b>5 min</b>	<b>10 min</b>	<b>15 min</b>	<b>20 min</b>	<b>Promedio</b>
<b>Masa [kg]</b>	0.750	0.525	0.295	0.635	0.55
<b>Temperatura de salida [°C]</b>	236.90	219.03	225.13	223.93	226.24
<b>Consumo de energía [kW]</b>	2.33	1.88	0.41	0.22	1.21
<b>Consumo de energía [kWh]</b>	0.19	0.16	0.03	0.02	0.10
<b>Consumo de energía [J]</b>	697800.00	563100.00	123900.00	65400.00	362550.00
<b>Consumo de energía específica [J/g]</b>	930.40	1072.57	420.00	102.99	657.69
<b>Presión [Pa]</b>	257	257	105	105	206.3333333
<b>Caudal [cm<sup>3</sup>/s]</b>	231	217	210	209	216.75

Fuente: Elaboración Propia

## APÉNDICE D

### RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN

Tabla D.1 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla A (100% rHDPE)

Mezcla A	Espesor	Anchura	Longitud Calibrada
Unidades	mm	mm	mm
20-5799-1	3.020	13.110	100.000
20-5799-2	3.010	13.100	100.000
20-5799-3	3.020	12.990	100.000
20-5799-6	3.020	13.090	100.000

Tabla D.2 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla A (100%rHDPE)

Nombre	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [%]	$\sigma_r$ [MPa]	$E$ [MPa]
Unidades	MPa	%	MPa	MPa
20-5799-1	36.3550	18.0740	27.1518	5.1776
20-5799-2	36.1985	12.5970	21.3625	5.2576
20-5799-3	36.7387	12.7980	23.0095	5.3207
20-5799-6	36.3595	15.1310	23.9478	5.1387
Promedio	36.4129	14.9000	23.8679	5.2237
Desviación Estándar	0.2297	2.3556	2.4361	0.0815

Tabla D.3 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN)

Mezcla C	Espesor	Anchura	Longitud Calibrada
Unidades	mm	mm	mm
20-5797-3	2.980	13.050	100.000
20-5797-4	3.050	13.000	100.000
20-5797-5	3.020	13.020	100.000

**Tabla D.4 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN)**

Nombre	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [%]	$\sigma_r$ [MPa]	$E$ [MPa]
Unidades	MPa	%	MPa	MPa
20-5797-3	25.5374	60.0380	10.2495	3.59463
20-5797-4	26.4187	56.8880	15.1324	3.5977
20-5797-5	25.3963	48.3810	14.1188	3.4317
Promedio	25.7841	55.1023	13.1669	3.5413
Desviación Estándar	0.5541	6.0302	2.5769	0.0950

**Tabla D.5 Dimensiones iniciales de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER)**

Mezcla A	Espesor	Anchura	Longitud Calibrada
Unidades	mm	mm	mm
20-5798-2	2.980	13.090	100.000
20-5798-3	2.980	12.990	100.000
20-5798-4	3.010	13.030	100.000
20-5798-6	3.020	13.070	100.000

**Tabla D.6 Resultados del ensayo de tracción para cada una de las probetas de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER)**

Nombre	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [%]	$\sigma_r$ [MPa]	$E$ [MPa]
Unidades	MPa	%	MPa	MPa
20-5798-2	42.8836	14.5130	41.7580	5.75053
20-5798-3	42.4791	13.9960	39.9160	5.7488
20-5798-4	41.3928	12.7570	39.8630	5.3134
20-5798-6	41.2245	15.5890	38.5722	5.2712
Promedio	41.9950	14.2138	40.0273	5.5210
Desviación Estándar	0.8125	1.1762	1.3105	0.2646

## APÉNDICE E

### RESULTADOS DEL ENSAYO DE IMPACTO ASTM 256

**Tabla E.1 Resultados del ensayo de impacto para cada una de las probetas de la mezcla A (100%rHDPE)**

Código de submuestras	Longitud (mm)	Ancho debajo de la muesca (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto (J)	Resistencia al impacto (J/m)
100% rHDPE	63.5	11.54	3.021	2.74	236.70
				2.49	215.90
				2.30	199.50
<b>Promedio</b>				2.51	217.37
<b>Desviación Estándar</b>				0.22	18.64

**Tabla E.2 Resultados del ensayo de impacto para cada una de las probetas de la mezcla C (92% rHDPE+3%CA+5% RETAIN)**

Código de submuestras	Longitud (mm)	Ancho debajo de la muesca (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto (J)	Resistencia al impacto (J/m)
92% rHDPE+ 3% CA+ 5% RETAIN	63.5	11.54	3.021	2.18	189.10
				2.30	199.50
				2.28	197.70
<b>Promedio</b>				2.25	195.43
<b>Desviación Estándar</b>				0.06	5.56

**Tabla E.3 Resultados del ensayo de impacto para cada una de las probetas de la mezcla D (92% rHDPE+3%CA+5% LOTADER)**

Código de submuestras	Longitud (mm)	Ancho debajo de la muesca (mm)	Espesor (mm)	Resistencia al impacto (J)	Resistencia al impacto (J/m)
92% rHDPE+ 3% CA+ 5% LOTADER	63.5	11.54	3.021	2.25	195.10
				2.49	215.90
				2.34	202.90
<b>Promedio</b>				2.36	204.63
<b>Desviación Estándar</b>				0.12	10.51

# APÉNDICE F

## RESULTADOS DEL ENSAYO DE MFI

Tabla F.1 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE puro

rHDPE (190°C/21.6 kg) – ASTM A		
0.4209	<b>10</b>	4.21
0.4006		4.01
0.386		3.86
0.3963		3.96
0.3611		3.61
0.411		4.11
<b>Promedio</b>		<b>3.96</b>
Desviación	0.2	

rHDPE (190°C/ 5 kg) – ASTM A		
0.0797	<b>1.67</b>	0.13
0.0778		0.13
0.0762		0.13
0.0735		0.12
0.0749		0.13
0.0779		
<b>Promedio</b>		<b>0.13</b>
Desviación	0.00	

Tabla F.2 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE + CA + RETAIN

92%+3%+5% RETAIN (190°C/21.6 kg) – ASTM A		
0.869	<b>10</b>	8.69
0.9368		9.37
0.9425		9.43
0.8957		8.96
0.8597		8.60
0.932		9.32
<b>Promedio</b>		<b>9.06</b>
Desviación	0.36	

92%+3%+5% RETAIN (190°C/21.6 kg) – ASTM A		
0.2344	<b>1.67</b>	0.39
0.2296		0.38
0.2361		0.39
0.2345		0.39
0.2289		0.38
0.2341		0.39
<b>Promedio</b>		<b>0.39</b>
Desviación	0.00	

**Tabla F.3 Resultados del ensayo de MFI para rHDPE + CA + LOTADER**

<b>92%+3%+5% LOTADER (190°C/21.6 kg) – ASTM A</b>		
0.2808	<b>10</b>	2.81
0.2737		2.74
0.3089		3.09
0.3182		3.18
0.2959		2.96
0.2834		2.83
<b>Promedio</b>		<b>2.93</b>
Desviación	0.17	

<b>92%+3%+5% LOTADER (190°C/ 5 kg) – ASTM A</b>		
0.0543	<b>1.67</b>	0.09
0.0529		0.09
0.0527		0.09
0.0554		0.09
0.0559		0.09
0.0567		0.09
<b>Promedio</b>		<b>0.09</b>
Desviación	0.00	

# APÉNDICE G

## SIMULACIÓN ANSYS

### Sección Rectangular Sólido

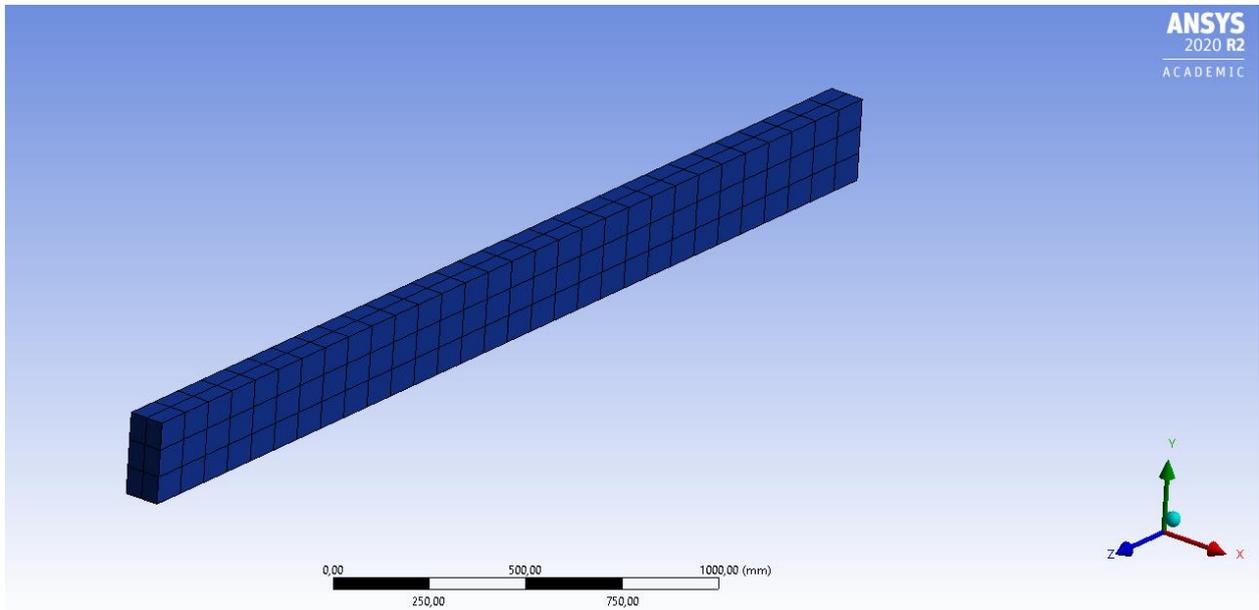


Figura G.1 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil rectangular sólido  
Fuente: Elaboración Propia

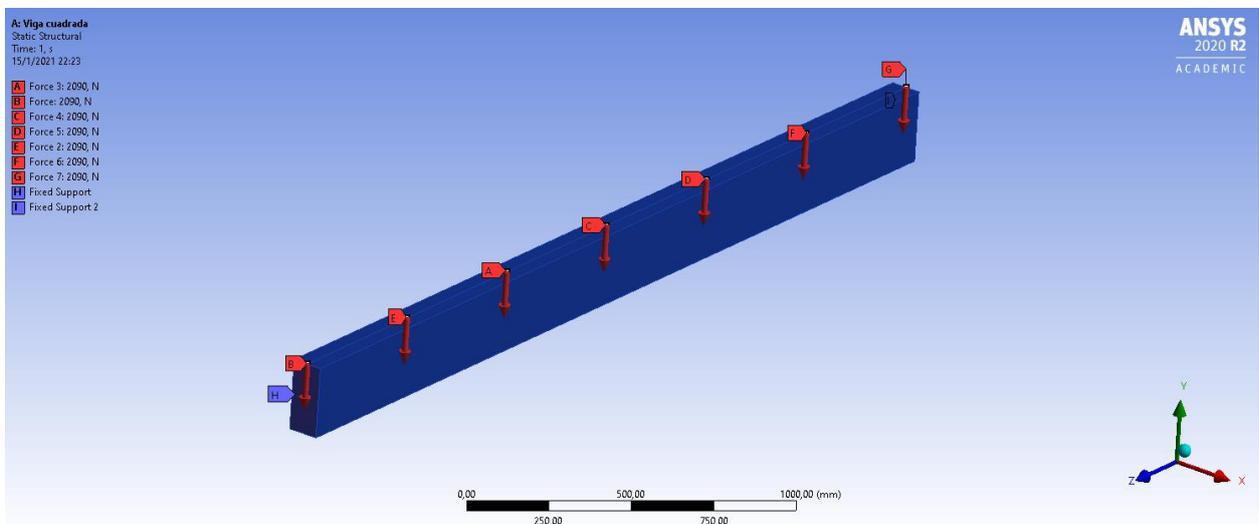


Figura G. 2 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil rectangular sólido  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección Rectangular hueco

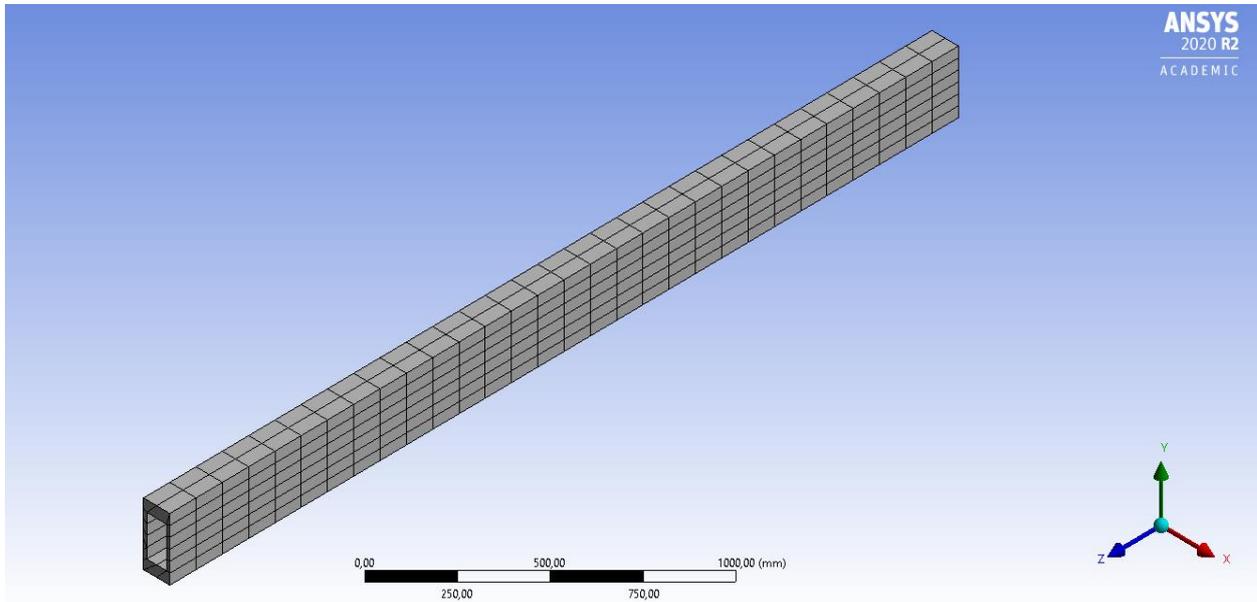


Figura G.3 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil rectangular hueco  
Fuente: Elaboración Propia

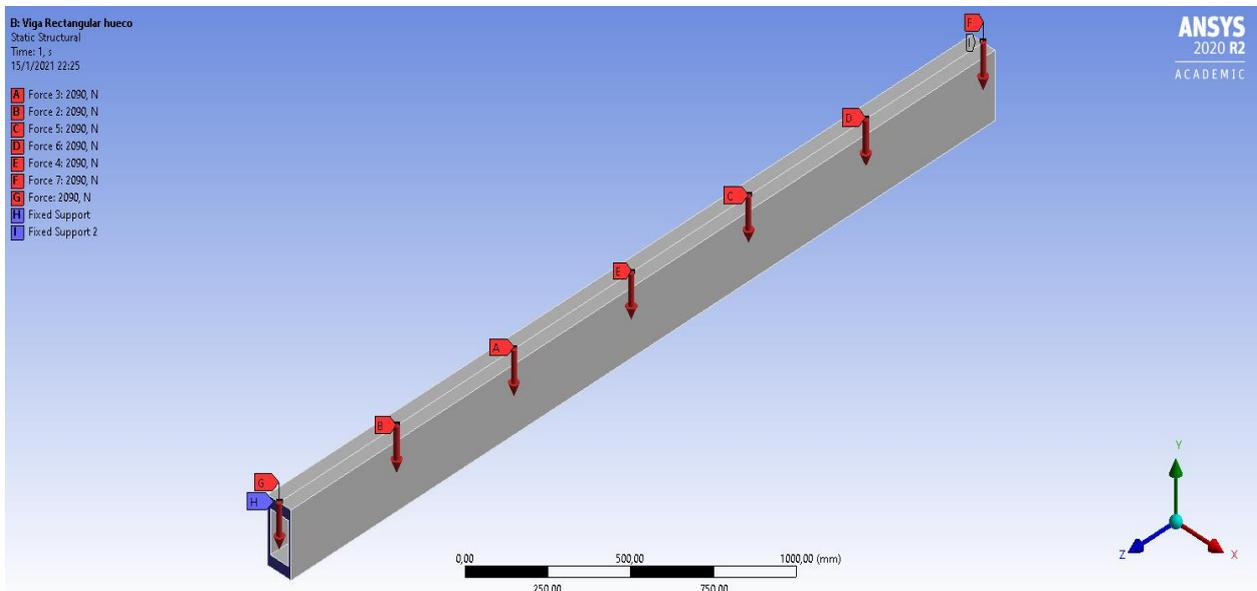


Figura G.4 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil rectangular hueco  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección C

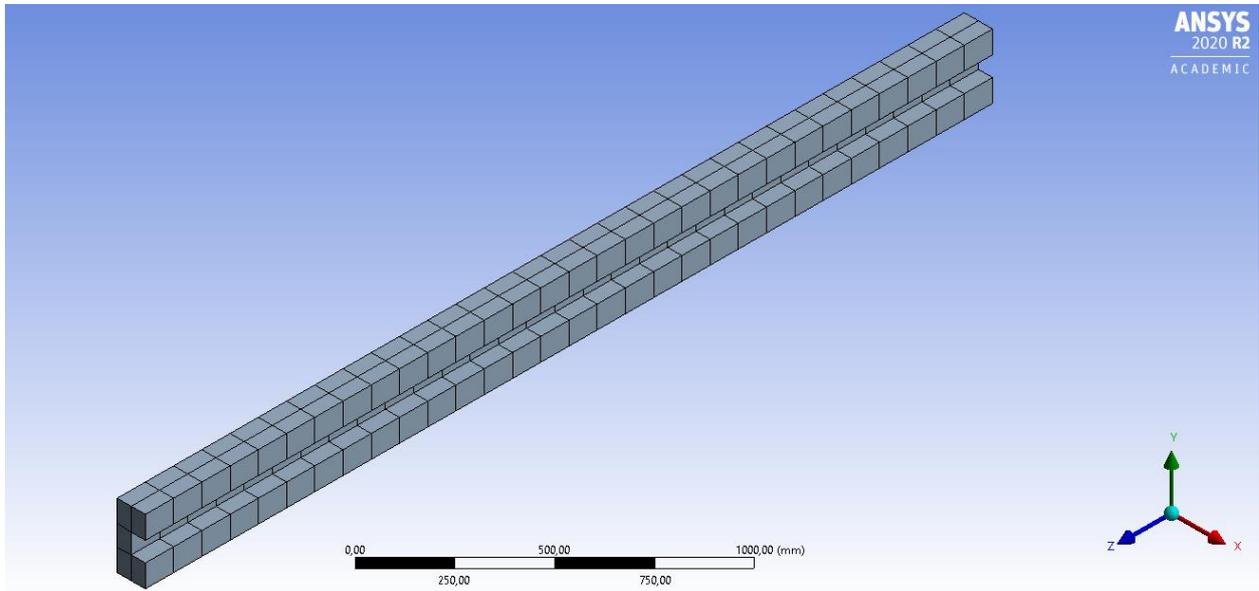


Figura G. 5 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de C  
Fuente: Elaboración Propia

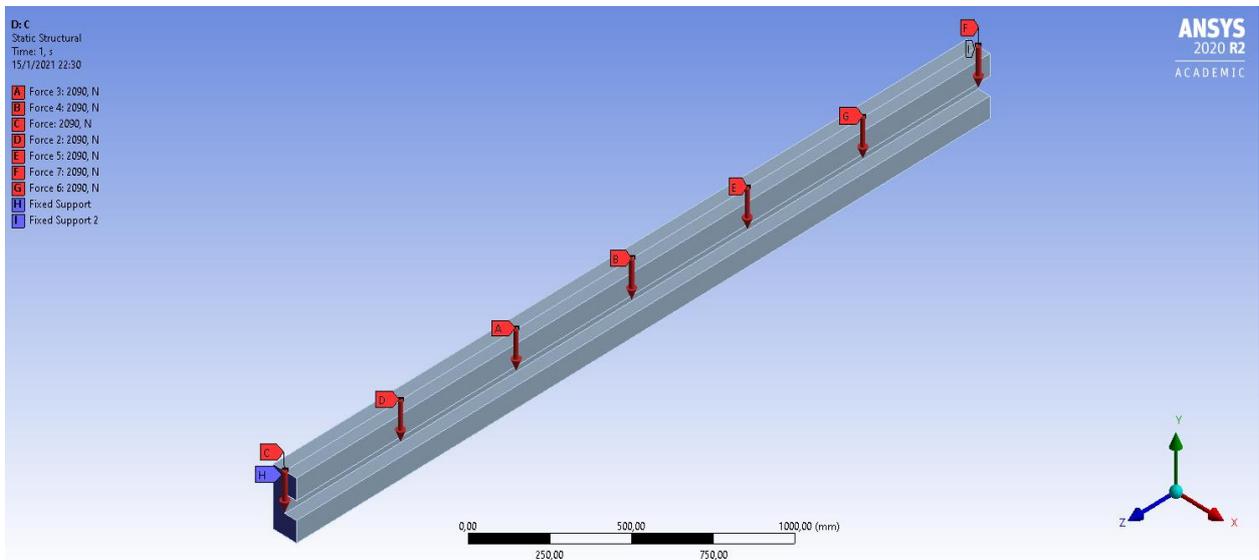


Figura G.6 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de C  
Fuente: Elaboración Propia

## Sección T

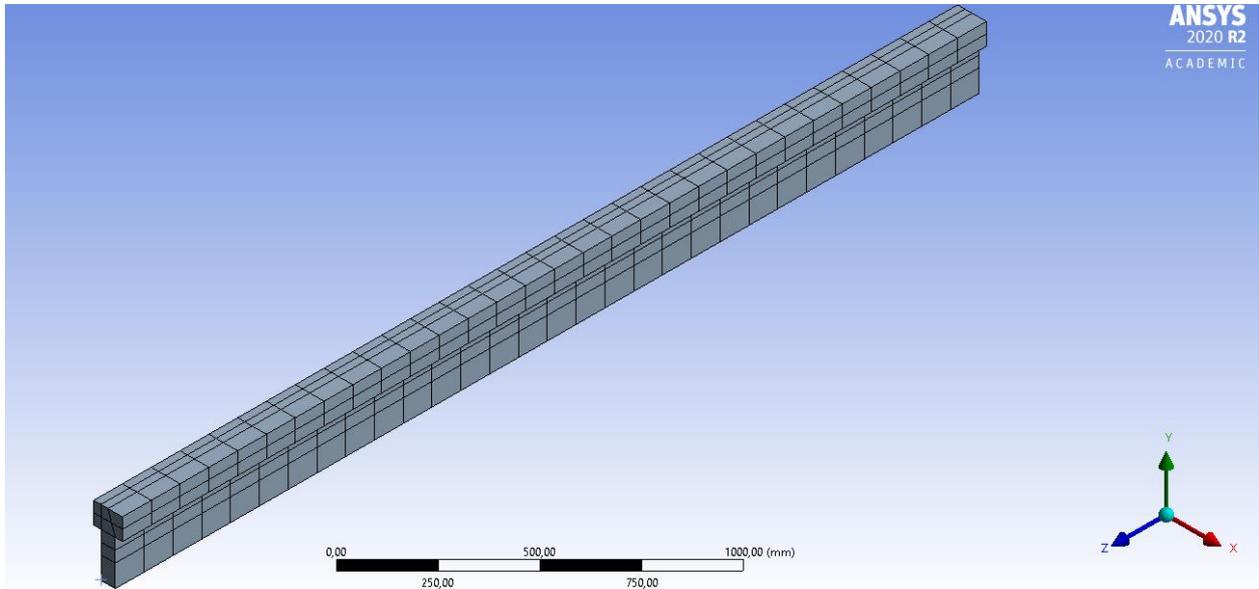


Figura G.7 Mallado de 100 mm para el sólido de la viga con perfil de T  
Fuente: Elaboración Propia

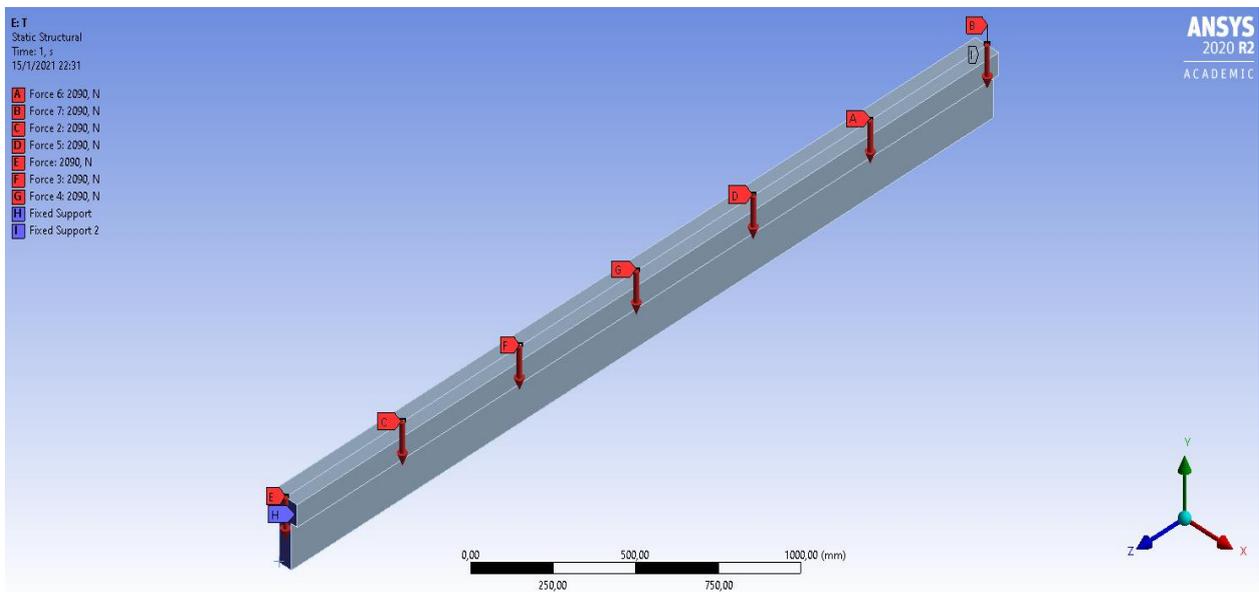


Figura G.8 Establecimiento de las cargas y restricciones sobre la viga con perfil de T  
Fuente: Elaboración Propia

# APÉNDICE H

## FICHAS TÉCNICAS

# LOTADER® AX8840

## Ethylene - Glycidyl Methacrylate copolymer

### DESCRIPTION

LOTADER® AX8840 is a random copolymer of ethylene and glycidyl methacrylate, polymerized by high-pressure autoclave process.

- Glycidyl methacrylate gives reactivity (versus OH, COOH and NH<sub>2</sub> groups), leading to optimal dispersion during melt mixing with engineering thermoplastics.
- As an ethylene copolymer, LOTADER® AX8840 is compatible with LDPE in all proportions, and with almost all other ethylene copolymers.
- LOTADER® AX8840 exhibits good adhesion on PET, PBT, PPS, metal, paper, glass.

### TYPICAL PROPERTIES

Characteristics	Value	Unit	Test Method
Glycidyl Methacrylate content	8	% Wt	FTIR (internal method)
Melt Index (190°C / 2.16 kg)	5	g/10min	ISO 1133 / ASTM D1238
Melting point	106	°C	ISO 11357-3
Density	0.94	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183 / ASTM D1505
Vicat softening temperature (10N) <sup>(1)</sup>	87	°C	ISO 306 / ASTM D1525
Flexural modulus <sup>(1)</sup>	85	MPa	ISO 178 / ASTM D790
Elongation at break <sup>(1)</sup>	400	%	ISO 527-2 / ASTM D638
Tensile strength at break <sup>(1)</sup>	8	MPa	ISO 527-2 / ASTM D638
Hardness Shore D (at 1s) <sup>(1)</sup>	50		ISO 868 / ASTM D2240

<sup>(1)</sup> On compression molded samples.

### APPLICATIONS

Due to its reactivity induced by the glycidyl methacrylate, LOTADER® AX8840 can be use as a compatibilizer for polyesters/polyolefins blends and as an adhesive for some laminate structures (polyolefins/polyesters, polyolefins/PPS etc.).

For more detailed information and recommendations regarding your specific application, please contact your local ARKEMA technical representative.

# LOTADER® AX8840

## PROCESSING

Heat stability of acrylate comonomers allows processing temperatures as high as for polyesters (PBT, PET) and PPS, which is the main material using LOTADER® AX8840 as impact modifier or compatibilizer.

**CAUTION:** LOTADER® AX8840 reacts with polymers containing maleic anhydride and acid. This reaction may generate gels or can block an extruder if not controlled. Extruders must be thoroughly purged before and after extruding LOTADER® AX8840.

## STORAGE, HANDLING AND SAFETY

LOTADER® AX8840 should be stored in dry conditions and be kept out of moisture in an aerated building. Improper storage conditions may cause degradation and could have consequences on physical properties of the product.

Safety data sheet as well as information on handling and storage of the LOTADER® AX8840 is available upon request to your ARKEMA representative or on the web site lotader.com.

## SHELF LIFE

Two years from the date of delivery, in unopened packaging. For any use above this limit, please refer to our technical services.

April 2014

The products described in the brochure are not Medical grades designated for Medical Device applications. Arkema has implemented an internal Medical Policy regarding the use of Arkema products in Medical Devices applications that are in contact with the body or circulating bodily fluids. Arkema has designated Medical grades to be used for such Medical Device applications. Products that have not been designated as Medical grades are not authorized by Arkema for use in Medical Device applications that are in contact with the body or circulating bodily fluids. In addition, except for limited cases as determined by the Medical Device Policy, Arkema strictly prohibits the use of any Arkema products in Medical Device applications that are implanted in the body or in contact with bodily fluids or tissues for greater than 30 days.

The statements, technical information and recommendations contained herein are believed to be accurate as of the date hereof. Since the conditions and methods of use of the product and of the information referred to herein are beyond our control, ARKEMA expressly disclaims any and all liability as to any results obtained or arising from any use of the product or reliance on such information; NO WARRANTY OF FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, IS MADE CONCERNING THE GOODS DESCRIBED OR THE INFORMATION PROVIDED HEREIN. The information provided herein relates only to the specific product designated and may not be applicable when such product is used in combination with other materials or in any process. The user should thoroughly test any application before commercialization. Nothing contained herein constitutes a license to practice under any patent and it should not be construed as an inducement to infringe any patent and the user is advised to take appropriate steps to be sure that any proposed use of the product will not result in patent infringement.

See MSDS for Health & Safety Considerations.

Arkema Functional Polyolefins  
420, rue d'Estienne d'Orves  
92705 Colombes Cedex - France  
arkema.com - lotader.com

**ARKEMA**  
INNOVATIVE CHEMISTRY

## Technical Information



# RETAIN™ 3000 Functional Polymer

**Overview** RETAIN™ 3000 is a functional polymer which promotes compatibilization between polyolefins and polar polymers such as ethylene vinyl alcohol (EVOH) and polyamide (Nylon) and blends of polar polymers. RETAIN™ 3000 functions to enhance the dispersion of the polar polymers into the polyolefin matrix such that the haze of the resulting structure is minimized. The utility may be achieved where the polyolefin is either a polyethylene or polypropylene.

**Main Characteristics:**

- Good compatibilization between polyolefins and polar polymers
- Wide range of process and service temperature
- For blown and cast film
- May be used in-line or pre-compounded

**Complies with:**

- EU, No 10/2011
- US FDA 21 CFR 175.105 (c)(5)

Consult the regulations for complete details.

<b>Physical</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Density	0.870 g/cm <sup>3</sup>	0.870 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Gardner Color	< 5.00	< 5.00	ASTM D3417
MAH Graft Level <sup>1</sup>	High	High	Dow Method
<b>Thermal</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Glass Transition Temperature	-72.4 °F	-58.0 °C	Dow Method
Melting Temperature	154 °F	67.8 °C	Dow Method
<b>Fill Analysis</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Brookfield Viscosity <sup>2</sup> (350°F (177°C))	13.0 Pa·s	13.0 Pa·s	ASTM D1084

### Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

<sup>1</sup> Low: <0.25 wt%, Medium 0.25-0.5, High >0.5 wt%

<sup>2</sup> The Brookfield viscosity would correspond to a melt index of about 660 (2.16 kg @ 190C)

## Product Stewardship

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

## Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

## Medical Applications Policy

**NOTICE REGARDING MEDICAL APPLICATION RESTRICTIONS:** Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- long-term or permanent contact with internal bodily fluids or tissues. "Long-term" is contact which exceeds 72 continuous hours;
- use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved ("cardiac prosthetic devices" include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems, and ventricular bypass-assisted devices);
- use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Dow requests that customers considering use of Dow products in medical applications notify Dow so that appropriate assessments may be conducted. Dow does not endorse or claim suitability of its products for specific medical applications. It is the responsibility of the medical device or pharmaceutical manufacturer to determine that the Dow product is safe, lawful, and technically suitable for the intended use. **DOW MAKES NO WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, CONCERNING THE SUITABILITY OF ANY DOW PRODUCT FOR USE IN MEDICAL APPLICATIONS.**

## Disclaimer

**NOTICE:** No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, the Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for the Customer's use and for ensuring that the Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

**NOTICE:** If products are described as "experimental" or "developmental": (1) product specifications may not be fully determined; (2) analysis of hazards and caution in handling and use are required; (3) there is greater potential for Dow to change specifications and/or discontinue production; and (4) although Dow may from time to time provide samples of such products, Dow is not obligated to supply or otherwise commercialize such products for any use or application whatsoever.

**NOTICE:** This data is based on information Dow believes to be reliable, as demonstrated in controlled laboratory testing. They are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and method of use of Dow products are beyond Dow's control. Dow recommends that the prospective user determine the suitability of these materials and suggestions before adopting them on a commercial scale.

To the best of our knowledge, the information contained herein is accurate and reliable as of the date of publication, however we do not assume any liability for the accuracy and completeness of such information.

## Additional Information

<b>North America</b>		<b>Europe/Middle East</b>	+800-3694-6367
U.S. & Canada:	1-800-441-4369		+31-11567-2626
	1-989-832-1426	Italy:	+800-783-825
Mexico:	+1-800-441-4369		
<b>Latin America</b>		<b>South Africa</b>	+800-99-5078
Argentina:	+54-11-4319-0100		
Brazil:	+55-11-5188-9000		
Colombia:	+57-1-219-6000	<b>Asia Pacific</b>	+800-7776-7776
Mexico:	+52-55-5201-4700		+603-7965-5392

[www.dowplastics.com](http://www.dowplastics.com)

This document is intended for use within Africa & Middle East, Asia Pacific, Europe, Latin America, North America

Published: 2015-02-17

© 2019 The Dow Chemical Company

