



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y**

**MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “ENDURECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA  
MEZCLA POLIETILENO – EUCALIPTO OBTENIDA POR EXTRUSIÓN EN  
EL LMM-ESPE”**

**AUTORES: ALARCÓN HERRERA, DANIEL ALEJANDRO**

**SANTAMARÍA CÁRDENAS, DANIEL SEBASTIÁN**

**DIRECTOR: MSc. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ **ENDURECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MEZCLA POLIETILENO-EUCALIPTO OBTENIDA POR EXTRUSIÓN EN EL LMM - ESPE**” fue realizado por los señores **Alarcón Herrera, Daniel Alejandro** y **Santamaría Cárdenas, Daniel Sebastián** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 5 de diciembre del 2018

Firma:

MSc. PÉREZ ROSALES, JOSÉ EMILIO

C.I:1706481957



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **Alarcón Herrera, Daniel Alejandro** y **Santamaría Cárdenas, Daniel Sebastián** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“ENDURECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MEZCLA POLIETILENO-EUCALIPTO OBTENIDA POR EXTRUSIÓN EN EL LMM - ESPE”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 5 de diciembre del 2018

-----  
**Daniel Alejandro Alarcón Herrera**

C.I. 171495523-2

-----  
**Daniel Sebastián Santamaría Cárdenas**

C.I. 171595006-7



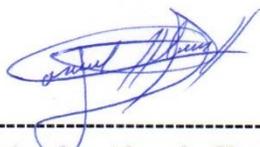
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y LA MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **Alarcón Herrera, Daniel Alejandro** y **Santamaría Cárdenas, Daniel Sebastián** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“ENDURECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MEZCLA POLIETILENO-EUCALIPTO OBTENIDA POR EXTRUSIÓN EN EL LMM - ESPE”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 5 de diciembre del 2018



-----  
**Daniel Alejandro Alarcón Herrera**

C.I. 171495523-2



-----  
**Daniel Sebastián Santamaría Cárdenas**

C.I. 171595006-7

## **DEDICATORIA**

Todo el esfuerzo y dedicación en este trabajo va dedicado a las personas más importantes en mi vida las que me han brindado su apoyo, consejo y sabiduría para saber afrontar la vida de la mejor manera, mis padres Luis Alarcón Cruz y Martha Herrera Hernández, mis hermanos Luis Alarcón y Pamela Alarcón, mi novia Alba Rojas Delgado.

**Daniel Alejandro Alarcón Herrera**

Por cada uno de los momentos brindándome su apoyo incondicional, les dedico este trabajo como fruto del mérito y abnegación que he puesto durante toda mi etapa como estudiante universitario a mis padres, Carlos Santamaría y María E. Cárdenas, mi hermano, Carlos Andrés Santamaría, y mis amigos más allegados han estado a mi lado, demostrando que no crecemos cuando las cosas son fáciles sino cuando cumplimos cada uno de los retos que enfrentamos.

**Daniel Sebastián Santamaría Cárdenas**

## AGRADECIMIENTO

Primero y ante todo a Dios por brindarme sabiduría e inteligencia “Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas” Josué 1:9.

A mis padres por enseñarme la importancia del esfuerzo y dedicación a mi hermano por brindarme sabios consejos en todo ámbito a mi hermana quien con su ejemplo me enseñó la fortaleza para siempre salir adelante a pesar de las adversidades de la vida a mi novia quien supo estar a mi lado para sobrellevar buenos y malos momentos.

Al Ingeniero José Pérez por brindarnos su apoyo y conocimientos en la realización del proyecto de titulación

**Daniel Alejandro Alarcón Herrera**

En primer lugar, le agradezco a Dios porque el declara en su palabra que si permanecemos en el podremos pedir lo que sea y serán hechas sus promesas tanto en el cielo como en la tierra. A mis padres porque a pesar de toda circunstancia nunca desfallecieron y me mostraron el valor de la constancia y del amor, a mi hermano porque siempre fue mi mejor amigo y supo entenderme, aunque estuviera en momentos difíciles, a mi tía Elizabeth y mi tía Inés porque aun en la distancia han sabido brindarme su apoyo. Por todo lo anterior les agradezco y espero que este gran paso en mi carrera profesional les demuestre que los amo y que llevo siempre en mi corazón sus consejos y sabiduría.

**Daniel Sebastián Santamaría Cárdenas**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	i
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD</b> .....	ii
<b>AUTORIZACIÓN</b> .....	iii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xiii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xvii
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	xxv
<b>RESUMEN</b> .....	xxvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xxvii
<b>CAPÍTULO I</b> .....	1
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.1. Generalidades</b> .....	1
<b>1.2. Antecedentes</b> .....	2
<b>1.3. Justificación e Importancia</b> .....	7
<b>1.4. Área de Influencia</b> .....	9

<b>1.5. Objetivos</b> .....	9
<b>1.5.1. Objetivo General</b> .....	9
<b>1.5.2. Objetivo Especifico</b> .....	9
<b>1.6. Alcance del Proyecto</b> .....	10
<b>CAPÍTULO II</b> .....	12
<b>ESTADO DEL ARTE Y TÉCNICA</b> .....	12
<b>2.1. Teoría del Comportamiento de los Plásticos</b> .....	12
<b>2.1.1. Comportamiento Mecánico</b> .....	13
<b>2.1.2. Comportamiento frente a la solubilidad</b> .....	14
<b>2.1.3. Comportamiento Térmico</b> .....	15
<b>2.2. Teoría del Comportamiento de los Plásticos</b> .....	16
<b>2.3. Interacción entre Plástico- Madera</b> .....	20
<b>2.3.1. Componentes de Interacción</b> .....	22
<b>2.3.2. Mecanismos de Acoplamiento</b> .....	23
<b>2.4. Polietileno Reciclado</b> .....	24
<b>2.5. Eucalipto</b> .....	30
<b>2.6. Material WPC</b> .....	31
<b>2.6.1. Componentes del Materia</b> .....	32
<b>2.6.2. Métodos de Conformado</b> .....	34

2.6.3.	Características Físicas.....	35
2.6.4.	Aplicación del WPC .....	36
2.7.	Diseño de Experimentos.....	36
2.7.1.	Variables, Factores y Niveles.....	37
2.7.2.	Etapas del diseño de experimentos .....	38
2.7.3.	Diseño Factoriales .....	39
2.8.	Transferencia de Calor en estado Transitorio .....	39
2.9.	Caracterización a flexión .....	43
2.9.1.	Norma ASTM D790 .....	43
2.10.	Análisis DSC .....	46
CAPÍTULO III .....		50
IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ENDURECIMIENTO.....		50
3.1.	Ajustes del equipo de extrusión .....	50
3.1.1.	Parámetros del Equipo de Extrusión .....	50
3.1.2.	Situación actual del equipo de Extrusión.....	51
3.1.3.	Sistema Alimentación.....	53
3.1.4.	Sistema de Calentamiento .....	54
3.1.5.	Sistema de Medición de Temperatura.....	55
3.1.6.	Sistema Motriz.....	55

3.1.7.	Sistema de Extrusión del Perfil .....	56
3.1.8.	Sistema de Seguridad .....	57
3.2.	Sistema de calibración.....	57
3.2.1.	Selección de alternativas para sistema de endurecimiento.....	58
3.2.2.	Especificaciones del Calibrador .....	61
3.3.	Sistema de recirculación de agua .....	64
3.4.	Pruebas de funcionamiento.....	68
3.5.	Ensamble del sistema de endurecimiento.....	71
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>73</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>		<b>73</b>
4.1.	Diseño factorial .....	73
4.2.	Material de Matriz y Refuerzo .....	83
4.2.1.	Material Plástico (Polietileno de Alta densidad reciclado) .....	83
4.2.2.	Material de Refuerzo (Madera Eucalipto).....	84
4.3.	Obtención de probetas.....	84
4.3.1.	Secado de la Madera, tamizado y medición de diámetro .....	84
4.3.2.	Mezclado y peso del producto .....	86
4.3.3.	Tiempo de enfriamiento.....	87

4.3.4.	<b>Simulación del Proceso de Enfriamiento por medio de conducción en régimen transitorio.....</b>	98
4.3.5.	<b>Fabricación de probetas.....</b>	105
<b>CAPÍTULO V .....</b>		108
<b>CARACTERIZACIÓN A FLEXIÓN.....</b>		108
5.1.	<b>Equipos de ensayo.....</b>	109
5.2.	<b>Probetas de Ensayo.....</b>	111
5.3.	<b>Condiciones de las Probetas.....</b>	113
5.4.	<b>Procedimiento de ensayo.....</b>	113
5.5.	<b>Cálculos realizados .....</b>	116
5.5.1.	<b>Carga aplicada.....</b>	116
5.5.2.	<b>Esfuerzo de flexión .....</b>	121
5.5.3.	<b>Módulo de elasticidad .....</b>	128
5.5.4.	<b>Esfuerzo límite de proporcionalidad .....</b>	135
<b>CAPÍTULO VI .....</b>		142
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>		142
6.1.	<b>Esfuerzo de Flexión Máximo .....</b>	142
6.1.1.	<b>Probetas de 100% Plásticos.....</b>	142
6.1.2.	<b>Probetas de 95% Plástico - 5% Madera.....</b>	146

6.1.3.	Probetas de 90% Plástico 10 % Madera .....	150
6.1.4.	Probetas de 85% Plástico 15 % Madera .....	154
6.2.	Esfuerzo Límite de Proporcionalidad por Flexión .....	158
6.2.1.	Probetas de 100% Plásticos .....	158
6.2.2.	Probetas de 95% Plástico 5 % Madera .....	160
6.2.3.	Probetas de 90% Plástico 10 % Madera .....	163
6.2.4.	Probetas de 85% Plástico 15 % Madera .....	166
6.3.	Módulo de Elasticidad por Flexión .....	169
6.3.1.	Probetas de 100% plástico .....	169
6.3.2.	Probetas de 95% Plástico 5 % Madera .....	172
6.3.3.	Probetas de 90% Plástico 10 % Madera .....	175
6.3.4.	Probetas de 85% Plástico 15 % Madera .....	178
6.4.	Resultados Análisis DSC .....	181
6.4.1.	Muestras 100% Plástico .....	183
6.4.2.	Muestras 95% Plástico – 5% Madera .....	186
6.4.3.	Muestras 90% Plástico – 10% Madera .....	188
6.4.4.	Muestras 85% Plástico – 15% Madera .....	190
6.5.	Distribución de las partículas en la matriz polimérica .....	192
6.5.1.	Muestras 100% Plástico .....	192

6.5.2. Muestras 95% Plástico – 5% Madera .....	193
6.5.3. Muestras 90% Plástico – 10% Madera .....	194
6.5.4. Muestras 85% Plástico – 15% Madera .....	195
<b>CAPÍTULO VII</b> .....	197
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	197
7.1. Conclusiones.....	197
7.2. Recomendaciones.....	198
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	200

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Porcentajes de Mezcla</i> .....	2
<b>Tabla 2</b> <i>Trabajos realizados DECEM</i> .....	3
<b>Tabla 3</b> <i>Normas Utilizadas en ensayos de flexión y Compresión</i> .....	4
<b>Tabla 4</b> <i>Polímeros más utilizados en materiales WPC</i> .....	5
<b>Tabla 5</b> <i>Ventajas del material WPC</i> .....	5
<b>Tabla 6</b> <i>Empresas Ecuatorianas que Fabricación y Comercialización de plásticos Extruidos</i> .....	7
<b>Tabla 7</b> <i>Estudios Previos sobre el proceso de extrusión</i> .....	9
<b>Tabla 8</b> <i>Clasificación de plásticos</i> .....	12
<b>Tabla 9</b> <i>Características Generales de los plásticos</i> .....	12
<b>Tabla 10</b> <i>Propiedades térmicas de los polímeros</i> .....	16
<b>Tabla 11</b> <i>Temperatura vítrea y de fusión</i> .....	17
<b>Tabla 12</b> <i>Propiedades y efecto de la mezcla del material madera- plástico</i> .....	22
<b>Tabla 13</b> <i>Propiedades físicas del polietileno</i> .....	22
<b>Tabla 14</b> <i>Componentes de la madera</i> .....	23
<b>Tabla 15</b> <i>Propiedades de los materiales termoplásticos</i> .....	25
<b>Tabla 16</b> <i>Propiedades principales del polietileno de alta densidad</i> .....	26
<b>Tabla 17</b> <i>Simbología de los diversos plásticos</i> .....	29
<b>Tabla 18</b> <i>Propiedades más relevantes de los polímeros termoplásticos</i> .....	33
<b>Tabla 19</b> <i>Aplicaciones más comunes del WPC</i> .....	36
<b>Tabla 20</b> <i>Matriz Ortogonal de Tratamientos para dos factores con dos niveles</i> .....	39
<b>Tabla 21</b> <i>Coeficientes usados en las soluciones aproximadas de un término de la conducción de calor</i> .....	42

<b>Tabla 22</b> <i>Utilidades del Análisis DSC</i> .....	48
<b>Tabla 23</b> <i>Interpretación de curvas DSC</i> .....	49
<b>Tabla 24</b> <i>Fases de Implementación del Diseño de Endurecimiento</i> .....	50
<b>Tabla 25</b> <i>Parámetros del Equipo de Extrusión</i> .....	51
<b>Tabla 26</b> <i>Detalle de los Sistemas del Equipo de Extrusión</i> .....	52
<b>Tabla 27</b> <i>Sistema de Alimentación</i> .....	53
<b>Tabla 28</b> <i>Sistema de Calentamiento</i> .....	55
<b>Tabla 29</b> <i>Sistema de Medición de Temperatura</i> .....	55
<b>Tabla 30</b> <i>Sistema Motriz</i> .....	56
<b>Tabla 31</b> <i>Sistema de Extrusión del Perfil</i> .....	56
<b>Tabla 32</b> <i>Sistema de Seguridad</i> .....	57
<b>Tabla 33</b> <i>Matriz Morfológica de Soluciones para enfriamiento de perfil extruido</i> .....	58
<b>Tabla 34</b> <i>Matriz de Evaluación de selección de elemento para sistema de enfriamiento</i> .....	60
<b>Tabla 35</b> <i>Funcionamiento de los elementos de la torre de Enfriamiento</i> .....	65
<b>Tabla 36</b> <i>Características Técnicas de la Bomba Paolo PKm80</i> .....	66
<b>Tabla 37</b> <i>Factores Controlables con sus correspondientes Niveles</i> .....	73
<b>Tabla 38</b> <i>Matriz Ortogonal de Diseño Factorial</i> .....	78
<b>Tabla 39</b> <i>Temperaturas Medidas en Proceso de Endurecimiento</i> .....	92
<b>Tabla 40</b> <i>Propiedades Térmicas de la Madera de acuerdo a su densidad</i> .....	95
<b>Tabla 41</b> <i>Valores de Tiempo de Enfriamiento de Probetas</i> .....	98
<b>Tabla 42</b> <i>Características de Máquina de Ensayos Universal</i> .....	109
<b>Tabla 43</b> <i>Valores de Fuerza Max en Probetas 100% Plástico tico</i> .....	117
<b>Tabla 44</b> <i>Valores de Fuerza Max en Probetas 95% plástico y 5% Madera</i> .....	118

<b>Tabla 45</b> <i>Valores Fuerza Max en Probetas 90% Plástico - 10% Madera</i> .....	119
<b>Tabla 46</b> <i>Valores de Fuerza Max en probetas 85% Plástico - 15% Madera</i> .....	120
<b>Tabla 47</b> <i>Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 100%Plástico</i> .....	122
<b>Tabla 48</b> <i>Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> ...	124
<b>Tabla 49</b> <i>Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .	126
<b>Tabla 50</b> <i>Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .	127
<b>Tabla 51</b> <i>Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 100% Plástico</i> .....	130
<b>Tabla 52</b> <i>Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> .....	132
<b>Tabla 53</b> <i>Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .....	133
<b>Tabla 54</b> <i>Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .....	135
<b>Tabla 55</b> <i>Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 100% Plástico</i> .....	136
<b>Tabla 56</b> <i>Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> .....	137
<b>Tabla 57</b> <i>Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .....	139
<b>Tabla 58</b> <i>Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .....	140
<b>Tabla 59</b> <i>Valores de Esfuerzo máximo para probetas 100% plástico</i> .....	142
<b>Tabla 60</b> <i>Valores de Esfuerzo máximo para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> .....	146
<b>Tabla 61</b> <i>Valores de Esfuerzo máximo para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .....	150

<b>Tabla 62</b> <i>Valores de Esfuerzo máximo para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .....	154
<b>Tabla 63</b> <i>Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas 100% Plástico</i> .....	158
<b>Tabla 64</b> <i>Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> .....	161
<b>Tabla 65</b> <i>Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .....	164
<b>Tabla 66</b> <i>Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .....	167
<b>Tabla 67</b> <i>Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 100% Plástico</i> .....	170
<b>Tabla 68</b> <i>Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 95% Plástico – 5% Madera</i> .....	173
<b>Tabla 69</b> <i>Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 90% Plástico – 10% Madera</i> .....	176
<b>Tabla 70</b> <i>Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 85% Plástico – 15% Madera</i> .....	179
<b>Tabla 71</b> <i>Materiales y Equipos Utilizados en Análisis DSC</i> .....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Implementación de Sistema de Endurecimiento.....	1
<b>Figura 2</b> Efecto de la temperatura sobre la curva esfuerzo-deformación para el acetato de celulosa, un termoplástico .....	18
<b>Figura 3</b> Estructura química del monómero de etileno .....	26
<b>Figura 4</b> Reciclado del polietileno de alta densidad negro .....	28
<b>Figura 5</b> Variables de un diseño de experimentos .....	37
<b>Figura 6</b> Etapas del diseño de experimentos .....	38
<b>Figura 7</b> Esquema de ensayo a flexión.....	44
<b>Figura 8</b> Termograma o curva de descomposición térmica .....	46
<b>Figura 9</b> Esquema típico para una cámara de ensayo .....	48
<b>Figura 10</b> Sistemas del Equipo de Extrusión .....	52
<b>Figura 11</b> Serpentín de Enfriamiento .....	54
<b>Figura 12</b> Limpieza del Tornillo de extrusión.....	54
<b>Figura 13</b> Perfil deseado a partir de la extrusión.....	57
<b>Figura 14</b> Dimensiones del Calibrador .....	61
<b>Figura 15</b> Esquema de la conexión de canales de enfriamiento.....	62
<b>Figura 16</b> Calibrador de Acero.....	63
<b>Figura 17</b> Esquema de la Torre de Enfriamiento .....	64
<b>Figura 18</b> Fotografía de la Torre de Enfriamiento .....	65
<b>Figura 19</b> Tabla de Caudales de acuerdo a altura manométrica de Bombeo .....	66
<b>Figura 20</b> Sistemas de Distribución .....	67
<b>Figura 21</b> Probetas Iniciales sin sistema de Endurecimiento .....	68

<b>Figura 22</b> Fotografía de la Mesa y el Calibrador .....	69
<b>Figura 23</b> Fotografía de Probetas con sección desigual .....	70
<b>Figura 24</b> Calibrador y Cañón de Extrusora ensamblados .....	70
<b>Figura 25</b> Fotografía del dado de extrusión y el calibrador .....	71
<b>Figura 26</b> Fotografía de las probetas con sección cuadrada.....	71
<b>Figura 27</b> Ensamble del sistema de endurecimiento .....	72
<b>Figura 28</b> Ensamble definitivo del sistema de endurecimiento .....	72
<b>Figura 29</b> Pantalla principal de Minitab.....	75
<b>Figura 30</b> Opciones de creación de diseño factorial .....	75
<b>Figura 31</b> Opciones de Diseños Factoriales .....	76
<b>Figura 32</b> Definición de factores de diseño factorial .....	76
<b>Figura 33</b> Tabla de resumen de Diseño Factorial.....	77
<b>Figura 34</b> Ejecución de Diseño Factorial .....	79
<b>Figura 35</b> Análisis del Diseño Factorial.....	79
<b>Figura 36</b> Diagrama de Pareto para efectos estandarizados.....	80
<b>Figura 37</b> Tabla de resumen ANOVA .....	80
<b>Figura 38</b> Tabla de resumen de Coeficientes .....	81
<b>Figura 39</b> Gráfica de Efectos Principales.....	82
<b>Figura 40</b> Gráfica de Interacción para Resistencia a flexión .....	82
<b>Figura 41</b> Fotografía de Material HDPE.....	83
<b>Figura 42</b> Fotografía de Madera de Eucalipto.....	84
<b>Figura 43</b> Fotografía secado de Madera en máquina Banco de pruebas Sistema de Bomba de Calor Mecánica.....	85

<b>Figura 44</b> Fotografía de Malla de Acero para tamizado .....	86
<b>Figura 45</b> Fotografía de Material pesado .....	86
<b>Figura 46</b> Fotografía de Material pesado mezclado .....	87
<b>Figura 47</b> Dimensiones de la Probeta.....	88
<b>Figura 48</b> Medición Temperatura del Calibrador.....	91
<b>Figura 49</b> Medición Temperatura final del material .....	91
<b>Figura 50</b> Selección de régimen transitorio en software CAD .....	99
<b>Figura 51</b> Selección de Material en Software CAD.....	99
<b>Figura 52</b> Temperatura Inicial del Material .....	100
<b>Figura 53</b> Coeficiente de convección y temperatura del medio .....	100
<b>Figura 54</b> Ejecución de Análisis .....	101
<b>Figura 55</b> Resultados Visuales del Análisis Térmico .....	101
<b>Figura 56</b> Corte del plano Lateral de Resultados .....	102
<b>Figura 57</b> Corte del plano Lateral de Resultados 5% Madera - 95% Plástico .....	103
<b>Figura 58</b> Corte del plano Lateral de Resultados 10% Madera - 90% Plástico .....	104
<b>Figura 59</b> Corte del plano Lateral de Resultados 15% Madera - 85% Plástico .....	105
<b>Figura 60</b> Fotografía de Probetas de 100% Plástico .....	106
<b>Figura 61</b> Fotografía de Probetas 5% Madera - 95% Plástico .....	106
<b>Figura 62</b> Fotografía de probetas 10% Madera - 90% Plástico .....	107
<b>Figura 63</b> Fotografía de Probetas 15% Madera - 85% Plástico .....	107
<b>Figura 64</b> Esquema de ensayo a flexión.....	108
<b>Figura 65</b> Máquina de Ensayos Universales MTS .....	110
<b>Figura 66</b> Soporte de Máquina de Ensayos Universales .....	110

<b>Figura 67</b> Dimensiones Probetas para Ensayo .....	111
<b>Figura 68</b> Probetas de acuerdo a la Proporción de Mezcla (a) Probetas 100% Plástico (b) Probetas 95% Plástico – 5% Madera (c) Probetas 90% plástico – 10% Madera (d) Probetas 85% plástico – 15% Madera.....	112
<b>Figura 69</b> Acople de la Máquina MTS para ensayos a flexión .....	114
<b>Figura 70</b> Probeta marcada en la Mitad. ....	115
<b>Figura 71</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico.....	117
<b>Figura 72</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 2: 95% Plástico - 5% Madera.....	119
<b>Figura 73</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico - 10% Madera.....	120
<b>Figura 74</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 11: 85% Plástico - 15% Madera.....	121
<b>Figura 75</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico.....	124
<b>Figura 76</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 2: 95% Plástico – 5% Madera.....	125
<b>Figura 77</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera.....	127
<b>Figura 78</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 90% Plástico – 15% Madera.....	128
<b>Figura 79</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico.....	130
<b>Figura 80</b> Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 2: 95% Plástico – 5% Madera .....	131
<b>Figura 81</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera.....	133
<b>Figura 82</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 85% Plástico – 15% Madera.....	134
<b>Figura 83</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 14: 100% Plástico.....	137
<b>Figura 84</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 95% Plástico – 5% Madera.....	138
<b>Figura 85</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera.....	139
<b>Figura 86</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 85% Plástico – 15% Madera.....	141
<b>Figura 87</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 100% Plástico .....	143

<b>Figura 88</b> Resumen estadístico Gráfico de probetas 100% Plásticos .....	144
<b>Figura 89</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 100% Plástico. ....	144
<b>Figura 90</b> Gráfico de Distribución Normal para probetas 100% Plástico.....	145
<b>Figura 91</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 95 % Plástico – 5% Madera.....	147
<b>Figura 92</b> Gráfica de Resumen estadístico para probetas 95% Plástico – 5% Madera.....	148
<b>Figura 93</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 95% Plástico – 5% Madera.....	148
<b>Figura 94</b> Gráfico de Distribución Normal para probetas 95% Plástico – 5% madera.....	149
<b>Figura 95</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 90 % Plástico – 10% Madera.....	151
<b>Figura 96</b> Gráfica de Resumen estadístico para probetas 90% Plástico – 10% Madera.....	152
<b>Figura 97</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 90% Plástico – 10% Madera.....	152
<b>Figura 98</b> Gráfico de Distribución Weibull para probetas 90% Plástico – 10% madera.....	153
<b>Figura 99</b> Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 85% Plástico – 15% Madera.....	155
<b>Figura 100</b> Gráfica de Resumen estadístico para probetas 85% Plástico – 15% Madera.....	156
<b>Figura 101</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 85% Plástico – 15% Madera.....	156
<b>Figura 102</b> Gráfico de Distribución Lognormal para probetas 85% Plástico – 15% madera. ....	157
<b>Figura 103</b> Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 100% Plástico .....	159
<b>Figura 104</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 100 % Plástico. ....	159

<b>Figura 105</b> Gráfico de Distribución normal de Límite de Proporcionalidad para probetas 100% Plástico.....	160
<b>Figura 106</b> Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera .....	162
<b>Figura 107</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 95 % Plástico – 5% Madera.....	162
<b>Figura 108</b> Gráfico de Distribución Lognormal de Límite de Proporcionalidad para probetas 95% Plástico 5% Madera.....	163
<b>Figura 109</b> Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera .....	165
<b>Figura 110</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 90 % Plástico – 10% Madera.....	165
<b>Figura 111</b> Gráfico de Distribución Weibull de Límite de Proporcionalidad para probetas 90% Plástico - 10% Madera. ....	166
<b>Figura 112</b> Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera .....	168
<b>Figura 113</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 85 % Plástico – 15% Madera.....	168
<b>Figura 114</b> Gráfico de Distribución Weibull de Límite de Proporcionalidad para probetas 85% Plástico 15% Madera. ....	169
<b>Figura 115</b> Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 100% Plástico .....	171

<b>Figura 116</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 100% Plástico. ....	171
<b>Figura 117</b> Gráfico de Distribución Weibull de Módulo de Elasticidad para probetas 100% Plástico. ....	172
<b>Figura 118</b> Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera.....	174
<b>Figura 119</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera.....	174
<b>Figura 120</b> Gráfico de Distribución Normal de Módulo de Elasticidad para probetas 95% Plástico - 5% Madera. ....	175
<b>Figura 121</b> Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera.....	177
<b>Figura 122</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera.....	177
<b>Figura 123</b> Gráfico de Distribución Log Logística de Módulo de Elasticidad para probetas 90% Plástico - 10% Madera. ....	178
<b>Figura 124</b> Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera.....	180
<b>Figura 125</b> Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera.....	180
<b>Figura 126</b> Gráfico de Distribución Normal de Módulo de Elasticidad para probetas 85% Plástico - 15% Madera. ....	181
<b>Figura 127</b> Resultados Análisis DSC para Muestras 100% Plástico .....	185

<b>Figura 128</b> Resultados Análisis DSC para Muestras 95% Plástico – 5% Madera.....	187
<b>Figura 129</b> Resultados Análisis DSC para Muestras 90% Plástico – 10% Madera.....	189
<b>Figura 130</b> Resultados Análisis DSC para Muestras 85% Plástico – 15% Madera.....	191
<b>Figura 131</b> Fotografía de la sección de la probeta 100% Plástico .....	192
<b>Figura 132</b> Fotografía de la sección de la probeta 100% Plástico .....	193
<b>Figura 133</b> Fotografía de la sección de la probeta 95% Plástico – 5% Madera.....	194
<b>Figura 134</b> Fotografía de la sección de la probeta 90% Plástico – 10% Madera.....	195
<b>Figura 135</b> Fotografía de la sección de la probeta 85% Plástico – 15% Madera.....	196

## ÍNDICE DE ANEXOS

- **Anexo 1:** Planos del Calibrador
- **Anexo 2:** Datos generados en los ensayos de flexión en probetas con mayor resistencia
- **Anexo 3:** Cálculos del diseño de experimentos
- **Anexo 4:** Graficas de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm]
- **Anexo 5:** Graficas de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm]
- **Anexo 6:** Pendiente utilizada en el cálculo del módulo de elasticidad
- **Anexo 7:** Límite de proporcionalidad

## **RESUMEN**

El presente trabajo consiste en el endurecimiento y caracterización mecánica a flexión de la mezcla polietileno de alta densidad y eucalipto obtenida por extrusión. En primer lugar, se realizó ajustes necesarios para que el equipo de extrusión del laboratorio de mecánica de materiales ESPE tenga un funcionamiento óptimo y nos permite continuar con la siguiente etapa que es el ensamble del sistema de endurecimiento, el cual tiene por objetivo obtener probetas con una sección geométrica definida y permita endurecer el material que se obtiene por extrusión. Una vez logrado el objetivo de obtener probetas de una misma sección geométrica se procedió a realizar un diseño de experimental a fin de poder controlar los principales factores que intervienen en el proceso de extrusión y así evitar variabilidad en los resultados que se desea analizar. Posteriormente se realizó la mezcla del polietileno de alta densidad con partículas de eucalipto a fin de obtener un material compuesto variando los porcentajes en peso de la mezcla. Se obtuvo probetas que posteriormente fueron ensayadas para determinar el esfuerzo a flexión, su módulo de elasticidad y el límite de proporcionalidad. Finalmente se realizó un análisis DSC que permite determinar el porcentaje de cristalización del material compuesto y verificar de este modo su endurecimiento.

### **PALABRAS CLAVE**

- **EXTRUSIÓN**
- **ENDURECIMIENTO**
- **MATERIAL COMPUESTO**
- **DSC**
- **CRISTALIZACIÓN**

## **ABSTRACT**

The following Project consists in the hardening and flexure mechanical characterization of the combination between polyethylene and Eucalyptus obtained by extrusion. In first place it was done some necessary adjustments for the extrusion equipment of ESPE mechanic of materials Laboratory so it can have an optimum development to continue with the next stage consisting in the assembly of the hardening system which principal objective is to harden and produce specimens with a defined geometrical section after the extrusion. After this objective was approached we proceed in doing an experimental design by controlling all the possible factors that are representative and that can affect in the process of extrusion with the purpose of avoid variability in the analyzed results. After this it was done the combination of the high density polyethylene with Eucalyptus particles varying the percentage in weight to obtain the composed material. The obtained specimens were rehearsed to determine their flexural stress, their elasticity module and the proportionality limit with the purpose of determine if the composed material had a better mechanical development. Finally we determined the crystallization percentage in each sample by a DSC analysis so we can determine if the material was hardened.

## **KEY WORDS**

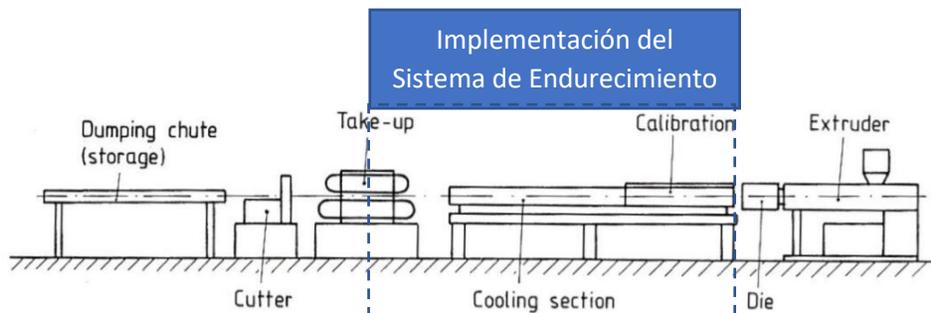
- **EXTRUSION**
- **HARDENING**
- **COMPOSED MATERIAL**
- **DSC**
- **CRYSTALLIZATION**

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Generalidades

El proyecto se fundamenta en la experimentación e implementación de un sistema de endurecimiento para el proceso de extrusión que realiza la máquina extrusora mono cilíndrica del Laboratorio de Mecánica de Materiales – ESPE, previamente se realizará el estudio del funcionamiento y operatividad del equipo. Ver figura 1.



**Figura 1** Implementación de Sistema de Endurecimiento

Fuente: (Michaeli, 2003)

Posteriormente se realizará un diseño de experimental para obtener parámetros óptimos en el proceso de extrusión del WPC cuyas siglas significa Wood Plastic Composite, a fin de obtener resultados y conclusiones válidas, para esto se utilizará un diseño factorial.

Los factores que se deben tomar en cuenta para el proyecto son: el flujo de caudal de agua que pasa por el sistema de calibración para el endurecimiento del material compuesto WPC (Wood Plastic Composite), la temperatura de extrusión del material y además la variación de los porcentajes del material compuesto entre la matriz y el refuerzo que se establece en la tabla 1.

**Tabla 1**  
*Porcentajes de Mezcla*

<b>No</b>	<b>Porcentaje de Mezcla</b>	
	<b>Madera</b>	<b>Plástico</b>
<b>1</b>	0	100 %
<b>2</b>	5 %	95 %
<b>3</b>	10 %	90 %
<b>4</b>	15 %	85 %

De esta manera poder analizar cuál es la proporción más adecuada para obtener las mejores propiedades mecánicas, de tal manera que se pueda aumentar la plasticidad y disminuir la elasticidad y obtener una mayor tenacidad al reducir la fragilidad del material compuesto. Para esto se realizará un análisis de las fluctuaciones de los valores de la caracterización mecánica de las probetas ensayadas a flexión.

Con el objetivo de haber promovido la cristalización del polímero, se realizará el análisis DSC (Calorimetría diferencial de Barrido), que permite verificar el porcentaje de aumento de cristalización del material.

El proyecto tendrá incidencia en el desarrollo del conocimiento sobre el proceso de extrusión de materiales poliméricos reciclados simples y compuestos tanto a nivel del Laboratorio de Mecánica de Materiales – ESPE y con sus posibles aplicaciones futuras en la Industria.

## **1.2. Antecedentes**

Actualmente en el mercado nacional e internacional son muchas las empresas que utilizan el proceso de extrusión de plásticos para la conformación de productos de consumo máximo en el sector económico como son perfiles y tuberías de diferentes plásticos como son PVC, Polietileno de alta y baja densidad, Polipropileno, entre otros.

Sobre todo, por su versatilidad en el sistema de alimentación de la materia prima y su conformado en materiales de alto rango. (Ministerio de Industrias y Productividad , 2015)

La extrusión de materiales plásticos es el proceso de moldeo que permite mediante flujo continuo del material plástico en estado de fusión en el cual es empujado a presión para obtener por medio de una salida específica denominada dado una forma requerida del material. (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, Tecnología de Polímeros, 2018)

El proceso de extrusión de materiales termoplásticos reciclados en la industria representa un gran apoyo para el medio ambiente del planeta y su utilización en gran forma para la conformación del material de reciclaje en artículos comerciales como son tubos, láminas, películas, recubrimientos de material eléctricos, perfiles estructurales, etc. (Calisto Zurita & Suárez Bastidas, 2009)

Los perfiles plásticos que son productos obtenidos mediante el proceso de extrusión se obtienen utilizando en la salida de la máquina extrusora una boquilla que reproduce la forma apropiada del perfil solicitado, posteriormente el perfil para finalmente ser enfriados mediante un baño de agua. (Espert Bernia, 2011) En la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se realizaron los trabajos Ver tabla 2.

**Tabla 2**  
*Trabajos realizados DECEM*

<b>Tema</b>	<b>Alcance del Proyecto</b>	<b>Aporte agregado al proyecto</b>
Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 kg/h, diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del pet. (Medina Cajas & Maldonado Castro, 2008)	Se diseñó un proceso mecánico que permite obtener un PET reciclado de mejores propiedades mecánicas.	Diseño y Construcción del sistema de endurecimiento de la extrusora del laboratorio de Mecánica de Materiales – ESPE

***CONTINÚA***

Estudio experimental del comportamiento mecánico a la flexión de materiales compuestos en base de fibra de PET reciclado y fibra de vidrio. (Calisto Zurita & Suárez Bastidas, 2009)	Se determinó el comportamiento mecánico a la flexión de vigas de material compuesto por resina y fibras de RPET.	Determinar los parámetros óptimos de funcionamiento de la extrusora para la producción de material compuesto plástico – madera.
--	--	---

Las técnicas utilizadas actualmente para la caracterización mecánica de los materiales extruidos permiten conocer la mayoría de las propiedades mecánicas y físicas. Los ensayos de flexión y compresión permiten determinar la capacidad de un material sometido a esfuerzos obteniendo valores de esfuerzo y deformación en los puntos máximos de falla. (AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico, 2006)

Las normas utilizadas para ensayos de resistencia a la flexión y compresión de plásticos y materiales compuestos WPC son. Ver tabla 3.

**Tabla 3**

*Normas Utilizadas en ensayos de flexión y Compresión*

<b>Ensayo</b>	<b>ISO</b>	<b>ASTM</b>
<b>Resistencia a la flexión</b>	178	D-790
<b>Resistencia a la compresión</b>	604	D-695
<b>Material WPC</b>	-	D-7031

### **Wood Plastic Composite (WPC)**

Se la conoce comúnmente como la madera plástica, madera técnica o madera tecnológica el WPC se utiliza para construir principalmente pisos de exteriores de terrazas, entradas de casas y alrededores de piscinas, aunque hoy en día también se utilizan para fabricar paredes, techos, muebles, fachadas entre otros más dado que las posibilidades creativas de este material son infinitas dadas que tiene la apariencia de madera y la facilidad de moldeo de un plástico.

El WPC es una mezcla de residuos de madera en muchos casos de diversas maderas en conjunto, pero en el caso de análisis se tratará con residuos de madera de eucalipto con polímeros plásticos reciclados o vírgenes para obtener un compuesto con excelentes propiedades estructurales. (Timberplan, 2018). Los polímeros más comúnmente utilizados en la fabricación de WPC son. Ver tabla 4.

**Tabla 4**

*Polímeros más utilizados en materiales WPC*

<b>Plástico</b>	<b>Característica</b>
<b>Polietileno (PE)</b>	Es más barato, Mas flexible Fácilmente accesible a través del reciclaje
<b>Polipropileno (PP)</b>	Es el más utilizado en el WPC Mejores propiedades mecánicas

Las dimensiones de los residuos de la madera utilizada pueden ser aserrín o polvo y esto depende de la capacidad de la extrusora, se ha evidenciado que va en un rango entre el 0% - 50% del producto final y permite una textura más natural y una mayor rigidez las ventajas que tiene el material WPC Ver tabla

**Tabla 5**

*Ventajas del material WPC*

<b>Numero</b>	<b>Características</b>
<b>1</b>	Mantenimiento sencillo
<b>2</b>	Mayor resistencia y durabilidad
<b>3</b>	Menor absorción de humedad
<b>4</b>	Mejor resistencia a la lluvia
<b>5</b>	Ideales para exteriores
<b>6</b>	Estabilidad al variar la temperatura
<b>7</b>	No sufre la acción destructiva de plagas
<b>8</b>	Producto reciclable

La madera con las que se trabajará en el proyecto de titulación es producida en el Ecuador como una especie nativa de la región, tiene un porcentaje de desperdicio alto, tiempo de rotación es considerablemente bajo y su costo comercial es bajo.

Lo que le hace una especie muy ocupada en la manufacturación de diversos elementos de maderas y es ideal para aprovechar sus desperdicios generados, el Eucalipto tiene como características una copa poco frondosa, la corteza interior más lisa, hojas sésiles y de un color verde azulado, flores blancas y solitarias, fruto cápsula y semillas pequeñas.

En el Ecuador el Eucalipto se encuentra plantado en la provincia de Esmeraldas en una superficie inicial de 1000 hectáreas en la zona de Muisne, Ton chigüé y Sua. El Eucalipto tiene un ciclo de corte por cada 6 años para tener condiciones aceptables para su manufacturación en diferentes campos de la industria ecuatoriana. (Ecuador Forestal , 2012).

El gobierno mediante decretos e incentivos económicos trata de general conciencia para tener una mejor conservación de los bosques del país, de esta manera disminuir el índice de deforestación de bosques, pero de igual manera es muy importante centrarse en la reforestación y el uso de la madera.

Dentro de los árboles de los bosques del país se incluye el eucalipto en el programa de incentivos denominado Socio-Bosque, hay registrados 42 mil hectáreas de plantación forestal, se espera llegar a un millón en no menos de 30 años. (El Telegrafo , 2015)

C. Ospina Restrepo en el 2014 realizó la evaluación de las propiedades mecánicas de los perfiles extruidos a partir de mezclas de polímeros reciclados para la fabricación de estibas de maderas plásticas con el objetivo de caracterizar mecánicamente los diferentes productos obtenidos y se comprueba la dosificación adecuada en las mezclas entre el PP y el PE para obtener un mejor comportamiento del material ante esfuerzos. (Ospina Restrepo, 2014)

M.D. Salvador en el 2013 realizo la caracterización mecánica de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas y su posterior utilización para diferentes aplicaciones en sectores tales como la construcción. (Amigo, Salvador, Nuez, Sahuquillo, & Martin, 2008)

R. Bouza en el 2008 realizó el diseño y caracterización de nuevos materiales compuestos por polipropileno y madera, el objetivo del estudio se basó en el análisis del viniltrimetoxisilano como agente de acoplamiento entre la matriz polimérica y el serrín obteniendo en los resultados mejores propiedades mecánicas y térmicas. (Bouza, 2008)

### 1.3. Justificación e Importancia

Una de las principales importancias que tiene el proceso de conformado por extrusión es la fabricación de perfiles y tuberías entre otras para el sector Industrial. A nivel mundial, en Europa y Asia se han desarrollado en los últimos años investigaciones sobre el tema del material WPC (Wood Plastic Composite), debido a su uso en todo ámbito.

Hoy en día el nivel de investigación acerca de la resistencia mecánica del material WPC en el país es escaso por lo cual no se tiene valores referentes al comportamiento mecánico de este material. En el Ecuador las empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de productos plásticos mediante el proceso de extrusión se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Empresas Ecuatorianas que Fabricación y Comercialización de plásticos Extruidos*

<b>Empresa</b>	<b>Productos Fabricados</b>
<b>PERFILPLAST DEL ECUADOR</b>	Mangueras, Perfiles para ventanas y Laterales Automotrices
<b>BAIN &amp; COMPANY</b>	Filmes, Tubos y Fibras
<b>PLÁSTICOS TANG</b>	Envases PET, Preformas y Tapas
<b>KEVÓ</b>	Pisos de exteriores y Barrederas

***CONTINÚA***

<b>ACIMCO</b>	Exteriores de Piscinas, Porches y Senderos
<b>NOVADECK</b>	Piso de Terrazas y Piso decorativo
<b>WINTech</b>	Perfiles para puertas y Pérgolas

Las propiedades mecánicas del WPC obtenido por extrusión son afectadas por un procesamiento posterior o intermedio durante el endurecimiento del plástico, mejorando sus propiedades y su estructura cristalina.

La cristalinidad de los poliméricos tiene un rango de variación desde una estructura amorfa a una estructura parcialmente cristalina con una aproximación del 95%. La densidad de un polímero cristalino es mayor que la de un polímero amorfo del mismo material y peso molecular, ya que las cadenas de la estructura cristalina están más empaquetadas.

La determinación de la proporción del sólido que es cristalino tiene, a menudo, una considerable importancia práctica, ya que una cristalinidad creciente tiene el efecto útil de mejorar propiedades tales como la resistencia y la rigidez, la resistencia a la disolución y la estabilidad dimensional. (Blanco, 2008)

Por lo expuesto anteriormente, en el presente proyecto se pretende realizar un estudio de los efectos del endurecimiento mediante caracterización mecánica a flexión del Polietileno y el polímero compuesto WPC variando los parámetros de obtención del producto extruido, fomentando adicionalmente al reciclado de plásticos y una conservación adecuada de la madera, tomando como base de estudio previo proyectos descritos en la tabla 7.

**Tabla 7***Estudios Previos sobre el proceso de extrusión*

<b>Título de Proyecto</b>	<b>Estudio Realizado</b>
Desarrollo y Caracterización de “Wood Plastic Composites (WPC)” con fibras de plumero de la pampa.	Evaluar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos mediante ensayos estandarizados de flexión y tracción.
Caracterización mecánica y morfológica de termoplásticos reciclados espumados reforzados con subproductos de madera.	Observar la morfología y caracterizar las propiedades mecánicas de materiales compuestos de madera y plásticos reciclados espumados, mezclando polietileno de alta densidad reciclado con fibra de madera de Pino.

#### **1.4. Área de Influencia**

El proyecto tendrá incidencia en el desarrollo del conocimiento sobre el proceso de extrusión de materiales poliméricos reciclados simples y compuestos tanto a nivel del Laboratorio de Mecánica de Materiales – ESPE y con sus posibles aplicaciones futuras en la Industria.

#### **1.5. Objetivos**

##### **1.5.1. Objetivo General**

Efectuar el endurecimiento y caracterización mecánica de la mezcla polietileno - eucalipto obtenido por extrusión.

##### **1.5.2. Objetivo Especifico**

- Realizar un estudio técnico del comportamiento del plástico con el calor, modos de enfriamiento del plástico y elementos utilizados para el sistema de endurecimiento.
- Implementar un sistema de endurecimiento del plástico extruido.
- Establecer las diferentes mezclas porcentuales del serrín de la madera y el plástico.
- Establecer las diferentes variaciones en los parámetros del proceso de extrusión.

- Obtener diferentes probetas mediante la técnica de extrusión.
- Ejecutar la caracterización mecánica a flexión de las probetas WPC
- Establecer el porcentaje de cristalinidad de las probetas endurecidas.
- Discutir los resultados obtenidos

### **1.6. Alcance del Proyecto**

El alcance del proyecto de investigación contempla el estudio del comportamiento del material WPC y el Polietileno al ser sometido a endurecimiento mediante un sistema de calibración que utiliza agua como agente de enfriamiento luego del proceso de conformado por extrusión.

Se procederá con los ajustes necesarios en el equipo de extrusión que se encuentra en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y la implementación del sistema de endurecimiento adaptable a la máquina extrusora, además de la mejora en el funcionamiento de la máquina mediante la variación de caudales y adecuación de elementos hidráulicos utilizando materiales y elementos disponibles a nivel local.

La experimentación del proyecto realizado contendrá varios ensayos mecánicos a flexión del material extruido en probetas de sección cuadrada, variando los porcentajes de composición del plástico-madera, las condiciones del caudal de enfriamiento y temperatura de extrusión.

Los parámetros de variación descritos en el proceso de obtención de las probetas serán ingresados como datos de entrada en el diseño experimental factorial para determinar la configuración óptima de los factores de control para el proceso.

El material utilizado como materia prima para la fabricación de las probetas será pellets reciclados de polietileno de alta densidad y partículas de madera de Eucalipto.

Se analizará los resultados de los ensayos a flexión y del estudio DSC para concluir sobre las propiedades obtenidas en el WPC.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE Y TÉCNICA

#### 2.1. Teoría del Comportamiento de los Plásticos

Los polímeros son sustancias de carácter orgánico que se han formado mediante una transformación de elementos químicos: C, H, O, N, F, Cl y Si.

Han sido clasificados en diferentes familias, pero principalmente se los distingue a nivel jerárquico en los siguientes niveles mostrados en la tabla 8. (Castro Zuluaga, 2010)

**Tabla 8**

*Clasificación de plásticos*

<b>CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS</b>		
<b>Nivel Jerárquico</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Tipos</b>
<b>Primer Nivel</b>	Según como se han sintetizado	Reticulados
		No Reticulados
<b>Segundo Nivel</b>	Según su estructura Molecular	Termoplásticos
		Termoestables
		Elastómeros
<b>Tercer Nivel</b>	Según su Familia Química	Parcialmente Cristalinos Como: PP, PE
		Amorfos como: PS, PVC

Generalmente los polímeros presentan diferentes características que permiten determinar su comportamiento de acuerdo a la aplicación en la cual van a ser utilizados, estas características son descritas en en la tabla 9:

**Tabla 9**

*Características Generales de los plásticos*

<b>Característica</b>	<b>Nivel o Rango</b>
<b>Dureza</b>	Baja Dureza
<b>Conformado</b>	Alta Facilidad de conformado
<b>Resistencia Mecánica</b>	Moderada en comparación a los metales

El comportamiento de los plásticos es algo muy importante para su aplicación en diferentes ámbitos dado que de eso depende que tipo de polímero se debe utilizar y se dividen según:

- Su Comportamiento Mecánico
- Su comportamiento frente a la Solubilidad
- Su comportamiento Térmico

### **2.1.1. Comportamiento Mecánico**

El comportamiento mecánico de los plásticos es muy diferente al de los metales, teniendo valores cuantitativamente inferiores respecto a su resistencia por lo que su estudio requiere ser analizado por diferentes factores

La temperatura es un factor principal para describir su comportamiento, a menor temperatura el plástico tendrá un comportamiento más frágil que un plástico que se encuentra a mayor temperatura y que tiene mayor ductilidad, estos valores depende del tipo de plástico que se analice. (Universidad de la Laguna, 2014)

Para la caracterización de un plástico se realiza diferentes ensayos con valores de carga que aumentan gradualmente en el tiempo afectada la fluencia y la resistencia mecánica del material.

La fluencia es un comportamiento que está presente en todos los materiales que varía dependiendo de la estructura molecular del mismo, si una fuerza se mantiene aplicada durante mayor cantidad de tiempo la deformación del material aumentará.

La velocidad en el comportamiento del plástico también es importante a considerar sus efectos son similares a la temperatura, es decir cuando la velocidad de aplicación de carga es menor el material se vuelve más dúctil a cuando se realiza un ensayo a velocidades más altas.

### **2.1.2. Comportamiento frente a la solubilidad**

Los polímeros son más o menos solubles dependiendo de la estructura química de cada tipo de polímero y de su peso molecular. Es mucho más soluble aquel polímero que presenta un peso molecular bajo, es por esto que al diluirse un polímero las fracciones de peso molecular más bajo se disuelven con mayor facilidad.

El polímero dependiendo de la fase a la que se desea mantenerlo puede quedar inalterado o permanecer en estado maleable, existen distintas formas para disolver un polímero, uno de ellos es la adición de calor que permite que el polímero atraviese por distintas fases de transformación. (Universidad de la Laguna, 2014)

La solubilidad de un polímero es un proceso que ocurre entre dos fases en las que actúan las moléculas disolventes del polímero, en la primera fase de disolución las moléculas de disolvente se difunden en el polímero debido a los fuertes enlaces de hidrógenos y los enlaces reticulados, en la segunda fase si las fuerzas de los enlaces de la primera fase son superadas se produce una interacción polímero disolvente y el polímero se empieza a transformar en un estado netamente líquido en función gradual.

### 2.1.3. Comportamiento Térmico

Los polímeros se comportan de diferente manera dependiendo del tipo de polímero utilizado en los distintos procesos de conformado por lo que su análisis comprende los termoplásticos, termoestable y elastómeros.

- **Termoplásticos**

Los termoplásticos a nivel molecular están formados por largas cadenas poliméricas, su comportamiento ante un aumento de temperatura les permite ser moldeables y pueden ser reutilizados a pesar de haber tenido varias interacciones con el calor.

Su comportamiento se debe a que sus macromoléculas al ser alteradas por un aumento de calor generan cadenas que pueden movilizarse, lo que les permite calentarse y ser conformados varias veces sin perder sus propiedades más significativas.

- **Termoestables**

Las cadenas poliméricas de este tipo de plástico son reticuladas, por lo que al aplicarse un aumento de calor el proceso de polimerización se acelera y forma estructuras tipo armazón con enlaces primarios covalentes.

Este tipo de polímeros pueden ser moldeados una sola vez ya que si vuelven a pasar por un proceso de aumento de temperatura los enlaces primarios se rompen y el material sufre fracturas.

- **Elastómero**

Este tipo de polímeros pueden ser sometidos a grandes deformaciones ya que cuentan con largas cadenas poliméricas de enlaces primarios covalentes, pueden ser sometidos a altas temperaturas y ser modificados dimensionalmente. (Universidad de la Laguna, 2014)

Las principales propiedades térmicas de los termoestables, termoplásticos y elastómeros se describen en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Propiedades térmicas de los polímeros*

<b>Propiedades</b>	<b>Característica</b>
<b>Conductividad Térmica</b>	Baja conductividad ya que no poseen electrones libres
<b>Transferencia de Calor</b>	Elevada capacidad de transferencia de calor si es una estructura cristalina
<b>Resistencia a altas temperaturas</b>	Poco resistentes con punto de fusión bajo

## 2.2. Teoría del Comportamiento de los Plásticos

La materia prima en los polímeros por lo general se encuentra en estado sólido y dependiendo del tipo de conformado debe sufrir un tratamiento especial que en la mayoría de casos es la adición de calor para lograr llevar al plástico a su temperatura de fusión.

Mediante métodos de calentamiento de plásticos se adiciona calor mediante resistencias electricas dando el calor necesario para que se dé el cambio de estado, el calor necesario es muy elevado dependiendo de las características mecánicas y térmicas de material con cual se trabaje.

Para los polímeros amorfos no tienen un punto de fusión específico por lo cual sufren un cambio evidente en su comportamiento mecánico y físico, en un intervalo de temperatura reducido lo que nos puede decir que a bajas temperaturas son duros, rígidos, frágiles y vítreos y en presencia de altas temperaturas se ponen en un estado gomoso. (S. Kalpakjian, 2008)

Se tiene los casos de diferentes polímeros en los cuales su temperatura de transición vítrea y de fusión tomando en cuenta los polímeros amorfos parcialmente cristalinos que tiene un punto de fusión definido como por ejemplo en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Temperatura vítrea y de fusión*

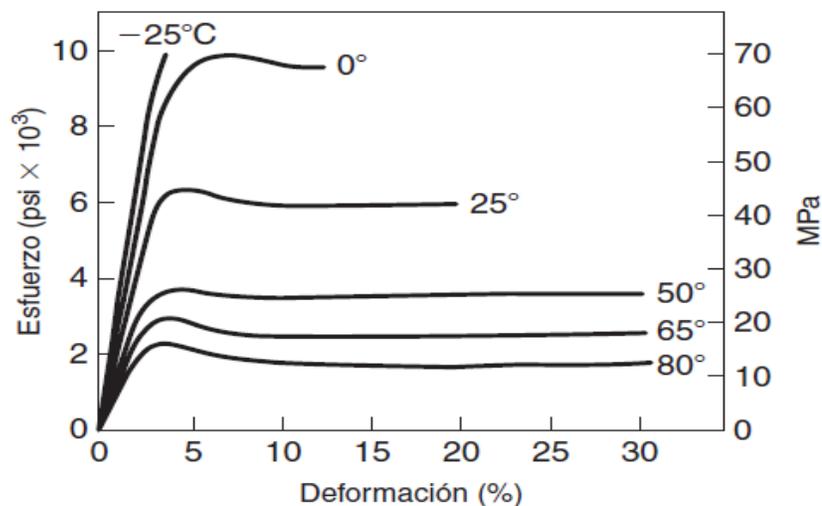
<b>Temperaturas de transición vítrea y de fusión de algunos polímeros</b>		
<b>Material</b>	<b>T<sub>g</sub> (C)</b>	<b>T<sub>m</sub> (C)</b>
<b>Nailon 6.6</b>	57	265
<b>Policarbonato</b>	150	265
<b>Poliéster</b>	73	265
<b>Polietileno alta densidad</b>	-90	137
<b>Polietileno baja densidad</b>	-110	115
<b>Polimetilmetacrilato</b>	105	---
<b>Polipropileno</b>	-14	176
<b>Poliestireno</b>	100	239
<b>Politetrafluoroetileno</b>	90	327
<b>Cloruro de polivinilo</b>	87	212
<b>Hule</b>	-73	---

Fuente: (S. Kalpakjian, 2008)

Cuando la temperatura dentro del proceso de conformado se acerca a la temperatura de transición vítrea o también al punto de fusión del polímero con el cual se trabaje se tiene la gran virtud de los polímeros que se pueden dar forma o moldear a formas simples o complejas.

Debido a que internamente la elevación de la temperatura debilita los enlaces secundarios mediante vibraciones térmicas de las moléculas largas y de sus cadenas adyacentes tienen la facilidad de moverse cuando son sometidas a fuerzas externas de deformación o cuando el polímero se enfría regresa a su dureza y resistencia original en otras palabras el proceso es reversible

El efecto de la temperatura sobre la resistencia y el módulo elástico de los termoplásticos es muy semejante al de los metales a aumentar la temperatura disminuye la resistencia y el módulo de elasticidad y a su vez aumenta la tenacidad cómo se muestra en la figura 2 se evidencia el efecto de la temperatura en la resistencia al impacto.



**Figura 2** Efecto de la temperatura sobre la curva esfuerzo vs deformación para el acetato de celulosa, un termoplástico  
Fuente: (S. Kalpakjian, 2008)

Como se da en cualquier materia cuando es afectado por una temperatura muy alta que se da el caso de que destruye los enlaces covalentes entre los átomos dentro de cada línea y se llega en el caso de los polímeros a quemarse o carbonizarse para estos casos se usan estabilizadores térmicos como son la piedra caliza, talco y la alúmina entre otros.

Cuando se lleva a los polímeros a un estado líquido es decir a temperatura de fusión sufren la descomposición y la exposición a otras formas de productos químicos o energías como por ejemplo oxígeno, radiación ultravioleta y ataques por bacterias también hacen que el polímero se degrade y envejezca lentamente incluso a bajas temperaturas. (S. Kalpakjian, 2008)

Cuando el polímero se encuentra en la temperatura de fusión el movimiento de las cadenas tiene tanta energía que es capaz de romper gran número de enlaces secundarios y generar una estructura molecular altamente desordenada el valor de temperatura de fusión de un polímero cristalino o semi-cristalino depende de los elementos estructurales que modifiquen la capacidad de las cadenas para formar enlaces de van der waals y/o hidrógeno.

Señalamos los efectos de la contracción en procesos de fabricación de productos de plástico uno de ellos es la temperatura, puesto que cuanto más elevada sea esta, mayor será la contracción del producto al solidificarse lo que conlleva generadores de esfuerzos dentro del material lo que depende su utilización final y ver cuanto afecta

También es importante la presión, ya que esta aumenta cuando se lleva a cabo el proceso de conformado y por consiguiente se da que al mismo tiempo se reduce el volumen de la materia que puede entrar en el proceso de conformado y general problemas en su acabado final. (S. Kalpakjian, 2008)zLa contracción no está solo relacionada con la dilatación térmica la contracción final de la pieza es menor que la derivada de su dilatación térmica otros mecanismos intervienen en la contracción como:

- Solidificación/Cristalización del polímero
- Velocidad de enfriamiento

- Temperatura del molde
- Tensiones internas
- Restricciones del molde
- Termodinámica del proceso

Es importante el fenómeno tanto de conducción como de convección para la eliminación del calor que provocó la fusión del material en el proceso de moldeo, el material únicamente debe llegar a una temperatura a la que ya no sufra deformaciones ya sea por dilatación o contracción. (Beltrán Rico & Marcilla Gomis, Tecnología de Polimeros, 2010)

### **2.3. Interacción entre Plástico- Madera**

En materiales compuestos la interacción comprende el análisis de los agentes de acoplamiento, los mecanismos de su unión y los efectos que se generan al combinar tanto la matriz y el refuerzo.

Los termoplásticos son uno de los agentes presentes en los WPC entre sus principales ventajas están su fácil conformado y su bajo costo en el mercado por lo que son adecuados al momento de incorporar madera como material de refuerzo a fin de mejorar características y propiedades. (Roca Girón , 2005)

Cuando la madera interactúa con la matriz polimérica se toman en cuenta ciertos aspectos que se detallan a continuación:

- Compatibilidad entre la madera y la matriz de polímero a utilizar.
- Material compuesto formado, tamaño de partículas inmersas en el proceso, su distribución y propiedades que adquiere el material.

En la industria cuando se logra combinar tanto la madera como el polímero con métodos como la extrusión, la inyección o la compresión se busca productos con propiedades similares a los termoplásticos y un aspecto similar a la madera.

Actualmente a nivel mundial hay una creciente búsqueda de nuevos materiales a bajo costo pero que sus propiedades mecánicas y físicas supere a los materiales originales y se ha creado la visión de materiales compuestos llamados mixtos y para este caso se analiza la mezcla entre madera y plástico se ha realizado muchos estudios, pero hasta el momento ha tenido grandes avances en el sentido del compuesto plástico madera.

Lo ideal de esta mezcla es que los dos productos a base de la madera y el plástico se pueden realizar mediante productos reciclados y de esta manera realizar una ayuda al ecosistema del planeta por qué el desperdicio de estos materiales es muy elevado a base de desechos como aserrín, harina de madera, astillas y polietileno reciclado.

A nivel nacional no existen antecedentes de investigación y en el campo industrial no se da la producción de este tipo de material dado que todas las pequeñas o grandes empresas que venden estos artículos los importan desde Colombia o Asia. (Vicuña Vicuña, 2016)

En la tabla 12 se muestran resultados con diferentes proporciones entre la matriz polimérica de polipropileno y refuerzo de madera en la cual se obtiene resultados de resistencia a la tracción, flexión e impacto en la cual se puede observar la variación de los resultados.

**Tabla 12***Propiedades y efecto de la mezcla del material madera- plástico*

Ítem	Peso Matri- z (%)	Peso Refuerz o (%)	Aditivo (MAPP)	Tamaño de partícula (mm)	Resistencia a Tracción (MPa)	Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia al impacto (KJ/m <sup>2</sup> )
1	100	0	--	--	24.62	40.24	220.6
2	70	30	--	0.45	29.10	53.13	85.8
3	73	25	2	0.18	27.68	56.02	104.1
4	73	25	2	0.30	24.91	46.02	93.0
5	73	25	2	0.45	25.17	44.8	87.2
6	58	40	2	0.45	27.62	50.71	74.5
7	65	33	2	0.45	28.46	50.9	75.0

*Fuente: (Vicuña Vicuña, 2016)*

### 2.3.1. Componentes de Interacción

- Polietileno

Es un tipo de polímero que se obtiene cuando el etileno ha sido polimerizado, existen dos distintos tipos de polietileno dependiendo de su densidad, se evalúa las diferentes estructuras que presentan los dos tipos. (Roca Girón , 2005)

- (LDPE) Polietileno de baja densidad
- (HDPE) Polietileno de alta densidad

En la tabla 13 se muestra las principales propiedades físicas del polietileno.

**Tabla 13***Propiedades físicas del polietileno*

Propiedades	Unidades	Valores
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0.941-0.965
Absorción de Agua	Mg	<0.5
Contracción	%	1.5 – 3
Resistencia a la tensión	N/mm <sup>2</sup>	18-35
Máxima Elongación	%	1000
Resistencia dieléctrica	KV/cm	>600

*Fuente: (Roca Girón , 2005)*

- Madera

La madera al ser un recurso natural tiene en su estructura tres tipos de componentes estructurales que se acoplan a la matriz polimérica durante el conformado. Estos componentes son la celulosa, hemicelulosa y lignias, las tres sustancias juntas forman la pared celular de la madera. Adicionalmente la madera también está compuesta de sustancias y minerales no estructurales.

En la tabla 14 se describen los componentes más comunes de la madera:

**Tabla 14**

*Componentes de la madera*

<b>Componente</b>	<b>Función</b>
<b>Celulosa</b>	La celulosa es un componente polimérico estructural con cadenas moleculares lineales, se considera como un polímero natural por lo que su uso a nivel industrial es adecuado al ser un recurso renovable. Es el componente esencial de la madera.
<b>Hemicelulosa</b>	A diferencia de la celulosa, la Hemicelulosa como un componente de la madera presenta distintos tipos de azúcares en su estructura y cadenas ramificadas.
<b>Lignia</b>	Son un tipo de polímero aromático presente en la madera, brinda el aroma distintivo de cada tipo de madera. Está presente en la madera libre donde existen cadenas de benceno.
<b>Componentes no estructurales</b>	Existen distintos componentes de baja masa molecular que constituyen parte de la estructura de la pared celular de la madera entre ellos se encuentran: Alcoholes, cetonas, ácidos, ceras, compuesto de nitrógeno, fenoles y aromáticos.

### 2.3.2. Mecanismos de Acoplamiento

La interacción y acoplamiento de la matriz polimérica con la madera se genera cuando las moléculas del silano que actúan como agente de acoplamiento generan a través de la energía recibida una conexión entre el polímero y la celulosa de la madera. Esta reacción causa que se formen enlaces covalentes que facilitan la continuidad molecular en la interface de los enlaces polímero - madera. (Bouza, 2008)

- Aditivos

Los aditivos no generan modificaciones en la estructura a nivel molecular del material compuesto. Los aditivos entre sus principales características permiten que el material:

- Mejore condiciones de conformado
- Mejore y modifique propiedades mecánicas
- Mejore características superficiales del material

Es indispensable que un aditivo utilizado durante el conformado del material WPC sea estable al momento de la formación del material y sobre todo que no afecte a las propiedades del material compuesto, su función es mejorarlas.

- Estabilizantes

El uso de estabilizantes cuando se desea conformar algún material compuesto es primordial en los efectos superficiales que presente el material pues permiten mantener el brillo y el color del material evitando la degradación del material durante el proceso de extrusión o inyección. Los absorbentes ultravioleta son estabilizadores más utilizados a nivel industrial. (Bouza, 2008)

## **2.4. Polietileno Reciclado**

Los termoplásticos se derivan de los monómeros ligeramente ramificados y forman un patrón de una cadena que se repiten y son los más utilizados en la actualidad como el polietileno, polipropileno, policarbonato y los acrílicos.

Dentro de los termoplásticos cada uno de ellos varia la organización cristalina-amorfa y por ende su densidad es diferente entre sí en la tabla 15 se especifica características de ciertos termoplásticos.

**Tabla 15**

*Propiedades de los materiales termoplásticos*

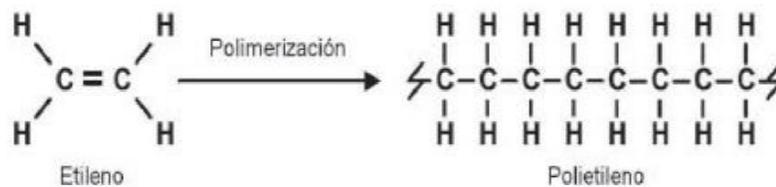
<b>Polímero</b>	<b>Densidad (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia a la Tracción (MPa)</b>	<b>Termoformado (C)</b>
<b>Polietileno Tereftalato</b>	1.30	47	120-170
<b>Polietileno de Alta densidad</b>	0.95	28	130-205
<b>Cloruro de polivinilo</b>	1.35	58	100-180
<b>Polipropileno</b>	0.90	30	150-195
<b>Poliestireno</b>	1.05	55	130-155

*Fuente: (Vicuña Vicuña, 2016)*

En su formación dentro de las cadenas se da en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas largas cadenas de polietileno esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad, o LDPE. Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal o de alta densidad, o HDPE.

El polietileno lineal es mucho más fuerte que el polietileno ramificado, pero el polietileno ramificado es más barato y más fácil de fabricar.

El polietileno de alta densidad es una macromolécula que está conformada por la unión de monómeros de etileno que tiene los átomos de carbono insaturados lo que nos dice que están unidos por un doble enlace es decir que es una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono y cuando ellos se rompen se generan sitios químicos activos con los cuales se generan la reacción con otros monómeros de etileno como se muestra en la figura 3 (Vicuña Vicuña, 2016)



**Figura 3** Estructura química del monómero de etileno

Fuente: (Jara Salme, 2015)

Está compuesto por moléculas no ramificadas y con pocos defectos dado por ello contiene un alto grado de cristalinidad, pero no es totalmente cristalino dado que tiene zonas amorfas, la relación entre las zonas amorfas y las cristalinas a mayor grado de cristalinidad mayor será la densidad en la tabla 16 se presentará propiedades de polietileno de alta densidad.

**Tabla 16**

*Propiedades principales del polietileno de alta densidad*

Propiedades	Unidad	Valor
<b>Densidad</b>	g/cm <sup>3</sup>	0.94 – 0.96
<b>Cristalinidad</b>	%	80 – 90
<b>Alargamiento a la rotura</b>	%	100 – 200
<b>Dureza</b>	(Shore)	60 – 70 D
<b>Conductividad Térmica</b>	10 cal/s cm	11 - 12.5
<b>Temperatura de Fusión</b>	<sup>0</sup> C	130 – 140
<b>Extrusión</b>	<sup>0</sup> C	170 – 220
<b>Resistencia al Impacto</b>	Pie-lb/plg	15 – 12
<b>Resistencia a la tensión</b>	Lb/plg 2*10	31 – 55
<b>Resistencia a la flexión</b>	Lb/plg 2*10	1400

Fuente: (Vicuña Vicuña, 2016)

La producción anual es de aproximadamente 80 millones de toneladas métricas su uso principal es el de embalajes (bolsas de plástico, láminas y películas de plástico, geomembranas, contenedores incluyendo botellas, etc.)

Existen varias técnicas de reciclaje todo dependiendo del tipo de plástico que se desee reciclar y por lo cual puede ser un reciclaje físico, químico y térmico, pero para la aplicación de cada uno de los métodos depende de un estudio denominado Ecobalance (Análisis del Ciclo de Vida de un Producto) con el cual nos indica cual es el proceso más adecuado de reciclaje para cada tipo de plástico.

Para el Polietileno de alta densidad el único que no se recomienda es el reciclaje químico, ya que económicamente y medioambientalmente no es factible y es mucho mejor el Reciclaje Mecánico y Térmico.

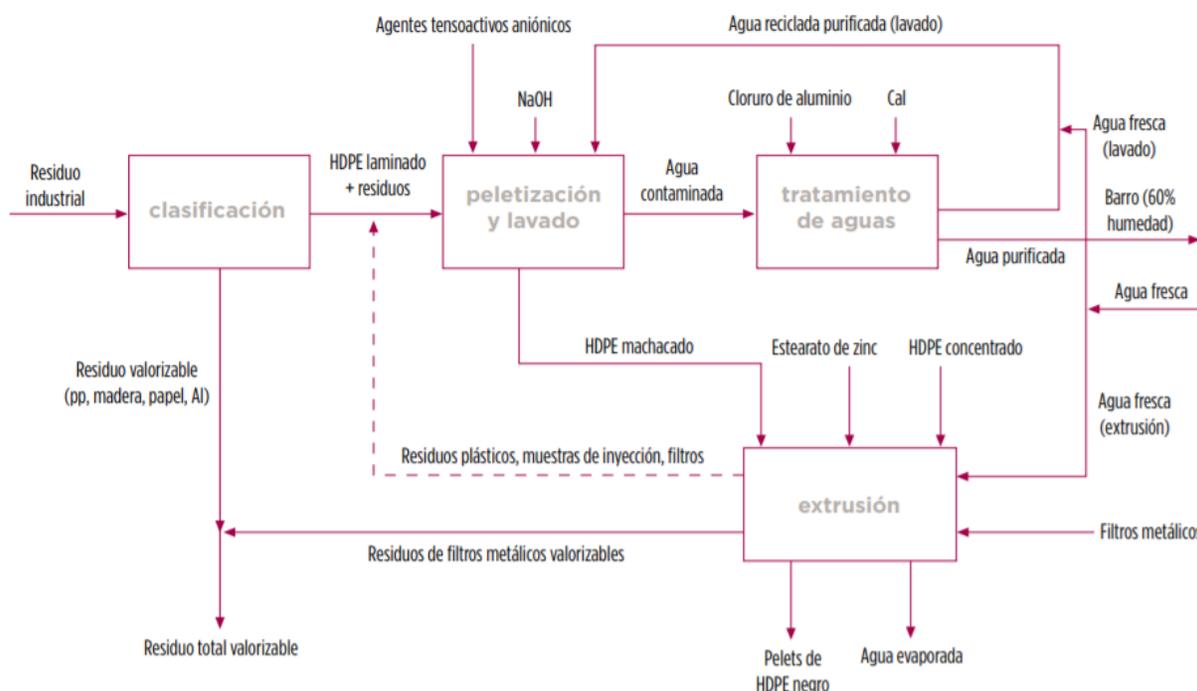
Reciclaje mecánico del polietileno de alta densidad consiste en la recepción y almacenaje de los materiales, selección del plástico, triturado del mismo a modo que el producto quede en forma de pellets.

Se recomienda un lavado del material previo a la selección del plástico con el objeto de eliminar impurezas que puedan afectar de sobremanera las propiedades del Polietileno de alta densidad reciclado.

Este tipo de reciclaje no es destructivo como el reciclaje térmico y se recomienda cuando el Polietileno de alta densidad se encuentra relativamente libre de contaminantes como se muestra en la figura 4.

Reciclaje Térmico es un método que destruye a la materia prima mediante la combustión de la mismas con el objetivo de obtener energía dado que su contenido de poder calorífico es alto

Pero antes de realizar este tipo de reciclaje se debe realizar el estudio de Ecobalance, para realizar esta técnica de recuperación de energía, es necesario tener un estricto control de la emisión de gases contaminantes. (Roymaplast, 2016)



**Figura 4** Reciclado del polietileno de alta densidad negro

Fuente: (Garrain, Vidal, & Franco, 2008)

Dentro de las ventajas del polietileno de alta densidad es ligero, resistente tanto mecánicamente como químicamente, no se corroe y todas estas características hacen que posea una larga vida, cualidad útil, cuando se usa, pero un problema cuando se desea deshacer del producto fabricado quiera desechar.

Es por ello que se deben de tener técnicas de tratamiento para este plástico. La más recomendada es la de las 3R: Reducir, Reutilizar y Reciclar.

El sistema de clasificación fue desarrollado por: The Society of the Plastics Industry (SPI) y ha sido adoptada por todo el mundo se basa en una simbología simple que permite en el

proceso de recolección y reciclamiento, identificar y separar los diferentes productos como se muestra en la tabla 17. (Roymaplast, 2015).

**Tabla 17**

*Simbología de los diversos plásticos*

<b>Símbolo</b>	<b>Tipo de Plástico</b>
 PET	PET (Polietileno tereftalato)
 HDPE	HDPE (Polietileno de alta densidad)
 PVC	PVC (Policloruro de vinilo)
 LDPE	LDPE (Polietileno de baja densidad)
 PP	PP (Polipropileno)
 PS	PS (Poliestireno)
 PS-E	PS-E (Poliestireno expandido)
 OTHER	Otros (ABS, PC)

El reciclado del plástico es de importancia crucial ya que las cantidades mundiales de estos residuos aumentan rápidamente debido a sus aplicaciones generalizadas.

- Ecología

Se ahorran recursos naturales, se reduce la contaminación. Al crear nuevos productos (papel, vidrio, plástico, aluminio) a partir de materiales reciclados se evita la contaminación del aire y

agua reciclar reduce también emisiones a la atmósfera de bióxido de carbono, el cual contribuye de manera determinante en el efecto invernadero, el peligro global, la lluvia ácida, la ruptura de la capa de ozono, la extinción de las especies y la deforestación.

- Económica

El reciclaje genera empleo, ahorra divisas en importaciones y promueve la industria nacional: importantes empresas ecuatorianas utilizan material reciclado en la fabricación de sus productos.

## **2.5. Eucalipto**

Los eucaliptos dentro del país son especímenes comunes dentro del sector interandino del Ecuador y se los puede encontrar en varios lugares como son pequeñas, medianas y grandes extensiones en valles y laderas, decoran caminos, bordes de propiedades, jardines, quebradas entre otros lugares.

Tan comunes dentro del territorio ecuatoriano que se piensa que son árboles nativos de nuestro país, pero ellos llegaron hace menos de 150 años cuando las raíces de estas plantas tuvieron su primer encuentro con tierra ecuatoriana. (Ecuador Terra Incognita, 2005)

Existen varios impactos ecológicos del eucalipto van desde reemplazar la vegetación nativa hasta poseer una particularidad de adaptación al fuego que tiene este árbol es de características biológicas, es decir, es propenso a quemarse porque las cortezas que caen del árbol se acumulan en el suelo y no se descomponen rápidamente.

Otros impactos son el crecimiento rápido del árbol y la producción de sustancias tóxicas que impiden el desarrollo de otras plantas. (El Comercio, 2017)

La ficha técnica del eucalipto:

- Familia: Myrtaceae
- Nombre científico: Eucalyptus urograndis
- Tronco: Recto y cilíndrico
- Copa: Poco frondosa
- Flores: blancas y solitarias
- Fruto: cápsula
- Semillas: pequeñas
- Originario: Australia y Tasmania
- Requerimientos climáticos:
  - Altitud 0 – 2000 msnm
  - Precipitación 800 – 1200 mm
  - Temperatura 24 C
- Crecimiento: En altura es de 3.97 m y en el diámetro de 4 cm
- Turno o rotación: La tala y producción se realiza cada sexto año de crecimiento
- Usos: Celulosa, postes, puntales de construcción, suelos de parquet, tableros de fibras entre otros usos de artesanos. (Vinueza, 2012)

## **2.6. Material WPC**

El material compuesto WPC es un producto que en términos sencillos es compuesto de la matriz y refuerzo Plástico – Madera respectivamente, contienen en su estructura dos

componentes el primero que es madera en forma de partícula o polvo de madera y el segundo una matriz polimérica virgen o reciclada que puede ser, polietileno, polipropileno, etc.

En el campo aplicativo el aspecto principal que ha motivado el uso de este tipo de materiales tiene que ver con el mejor desempeño que presenta con respecto a otros materiales y su menor impacto ambiental al ser manufacturado. (Schwarzkopf & M.D. Burnard, 2016)

Un producto elaborado de plástico es más caro que un compuesto, es por eso que el WPC es utilizado como un recurso que abarate costos de los consumidores. La madera utilizada en el compuesto proviene de aserrín recolectado en la manufactura de otros productos de madera, es además un material renovable, de fácil procesamiento, y con buenas propiedades mecánicas. (Yáñez, 2016)

### **2.6.1. Componentes del Materia**

La matriz de un material compuesto WPC es un polímero que puede presentarse de manera natural en forma de celulosa o colágeno, sin embargo, para un compuesto WPC lo más utilizado es un polímero de origen sintético como lo son el polietileno, polipropileno, etc.

A nivel Industrial un gran porcentaje de la producción de WPC utiliza polipropileno como matriz polimérica y un porcentaje menor utiliza polietileno. La preparación de la matriz polimérica consta de un 40% de material reciclado mientras que el 60% restante es recomendable que sea de un polímero virgen.

La capacidad de los polímeros de absorber agua permite proteger a la madera frente a la humedad por lo que un WPC es muy adecuado para aplicaciones de ambientes exteriores.

La madera térmicamente es estable entre las temperaturas de 180 a 200°C por lo que los termoplásticos son ideales para trabajar con madera pues pueden ser procesados a temperaturas inferiores a 200 °C, adicionalmente es muy sencillo maquinar este tipo de materiales. (Yáñez, 2016) A continuación, se presenta en la tabla 18, propiedades más relevantes de los polímeros termoplásticos más utilizados como matriz en los WPC.

**Tabla 18**

*Propiedades más relevantes de los polímeros termoplásticos*

Material	Propiedades Flexibles			Coeficientes		
	Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Límite de elasticidad (MPa)	Módulo Elástico (MPa)	Absorción de agua 24h (%)	Coefficiente expansión – contracción térmica $\times 10^{-5}$ (1/°C)	Estabilidad a Intemperie
<b>LDPE</b>	0.91-0.93	9-20	170-350	<0.01	11-22	Media
<b>HDPE</b>	0.94-0.97	18-35	1000-1400	<0.01	5-1	Media
<b>PP</b>	0.90-0.91	30-50	1100-1550	0.01	7-10	Media (Estabilizadores de UV)
<b>PVC</b>	1.32-1.44	40-110	2400-4150	0.1	5-6	Buena (Colores Claros)

*Fuente:* (Yáñez, 2016)

El refuerzo que es la madera tiene varias ventajas en su utilización entre las principales se encuentra un costo mucho más bajo, una relación resistencia – peso, alta, baja densidad y una fácil integración molecular con el plástico, puede compensar la cantidad de plástico utilizado en conformado y principalmente es un material natural renovable.

La madera que se utiliza en los compuestos WPC puede ser de diferentes fuentes de obtención como arboles vírgenes, productos ya procesados, aserrín, etc. Estos materiales posteriormente a su obtención son triturados para obtener partículas de madera, la trituración

de la madera se la realiza a partir de molienda y uso de prensas por lo que molecularmente la madera se ve afectada y sus efectos en los WPC son muy diferentes en comparación si se lo realiza con un material que no ha sido maltratado o que esté libre de defectos.

La madera seleccionada para el proceso depende de la ubicación geográfica, su disponibilidad y su costo. Según la especie de madera utilizada en los WPC puede incrementar o reducirse la compatibilidad química o las propiedades mecánicas con el polímero. (Schwarzkopf & M.D. Burnard, 2016)

### **2.6.2. Métodos de Conformado**

- **Mezclado:**

En el caso de mezclado se combina tanto la madera como la matriz polimérica en los porcentajes deseados. A fin de obtener una mezcla uniforme se dispersa el refuerzo de manera proporcional. El plástico posteriormente se solidificará produciendo un material compuesto. (Schwarzkopf & M.D. Burnard, 2016)

- **Extrusión:**

En el proceso de extrusión pellets de polietileno en combinación con partículas de madera son introducidos a través de la tolva de una máquina extrusora lo que permite que ambos elementos se combinen a una temperatura adecuada y que el material obtenido salga por un dado con la forma establecida.

- **Inyección y Moldeo:**

Este proceso es más utilizado en el caso de que se desee producir formas más complejas, el procedimiento es muy similar al de la extrusión con la diferencia de que el material en lugar de ser forzado a salir por un dado, este es inyectado en un molde con la forma requerida. (Schwarzkopf & M.D. Burnard, 2016)

### **2.6.3. Características Físicas**

- **Propiedades Mecánicas:**

Para poder caracterizar mecánicamente un WPC los parámetros que principalmente se deben tomar en cuenta para su estudio son el módulo de elasticidad, el módulo a ruptura y la resistencia del material a compresión. Se analiza también características importantes en estos parámetros como son la tenacidad del material que varía de acuerdo a los porcentajes tanto de matriz polimérica como de madera presente.

La dureza del WPC por su parte también depende de la matriz polimérica y de la cantidad presente en el compuesto.

En el caso de que el compuesto tenga en sus componentes una madera con alto contenido de porosidad y densidad relativamente baja, la cantidad de polímero debería ser de mayor cantidad para poder elevar el valor de la dureza del WPC.

Todas estas variantes dependen de la aplicación en la que se utilizara el compuesto. (Yáñez, 2016)

- **Resistencia a la Intemperie y al Deterioro:**

Uno de los beneficios del uso de los WPC es la facilidad del mantenimiento de este material, en construcciones es muy difícil utilizar madera ya que tanto la temperatura como

la presencia de agentes bióticos como son hongos disminuyen la resistencia de la madera. Cuando se ha mezclado la madera con una matriz polimérica los agentes bióticos ya no son un peligro inminente y su deterioro se disminuye pues aumenta su resistencia ante los distintos agentes climáticos.

- **Resistencia al Fuego**

El carbono y el Hidrogeno son agentes combustibles dentro de la estructura química de un WPC por lo que es fácilmente inflamable, sin embargo, existen diferentes métodos que pueden aumentar la resistencia del material ante una posible inflamación (Yáñez, 2016)

#### 2.6.4. Aplicación del WPC

La madera de WPC tiene ventajas a comparación con la madera principalmente con la resistencia a la humedad y sus aplicaciones son similares como se muestra en la tabla 19:

**Tabla 19**

*Aplicaciones más comunes del WPC*

<b>Aplicaciones del WPC</b>	
<b>Exterior</b>	Verjas, Cubiertas, Porches, Barrederas
<b>Interior</b>	Marcos de Puerta, Marcos de Ventanas.
<b>Consumo</b>	Lápices, Juguetes, Marcos, Instrumentos Musicales

*Fuente: (Yáñez, 2016)*

#### 2.7. Diseño de Experimentos

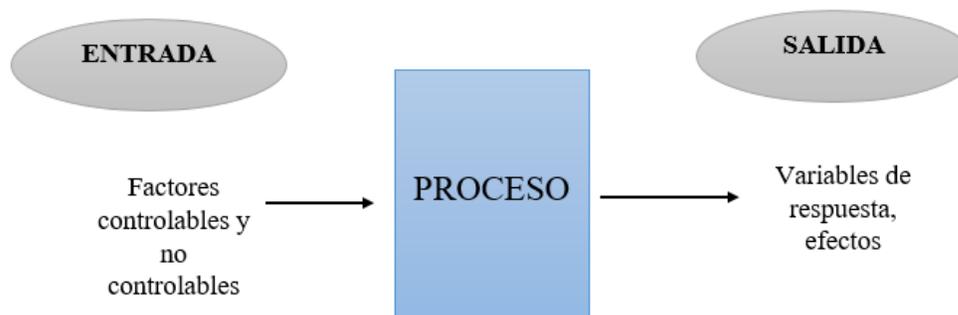
Un diseño de experimentos es una aplicación utilizada en la investigación científica que permite a través un conjunto de tratamientos a distintos niveles determinar las relaciones causa – efecto que se producen como consecuencia de la combinación de cada uno de los niveles de los factores más relevantes en un proceso.

Los elementos más importantes en un diseño de experimentos son el experimento y la unidad experimental. El experimento tiene como objetivo la variación de diferentes condiciones en un proceso a fin de poder analizar los resultados o efectos y de esta manera poder conocer de mejor manera el problema que tiene el proceso. La unidad experimental por su parte son las muestras que se obtienen como resultado de los experimentos con el objetivo de obtener un valor cualitativo o cuantitativo que represente a la respuesta del experimento. (Gutiérrez Pulido & Vara Salazar, 2008)

### 2.7.1. Variables, Factores y Niveles

Cuando se analiza un proceso a través de un diseño de experimentos nos podemos dar cuenta que existen diferentes factores que dependiendo de las variaciones que puedan tener causan diferentes respuestas en el proceso. Las variables o respuestas son los efectos que se producen en el proceso, principalmente son las características que se desean obtener o que se asemejan a lo que se busca en un experimento.

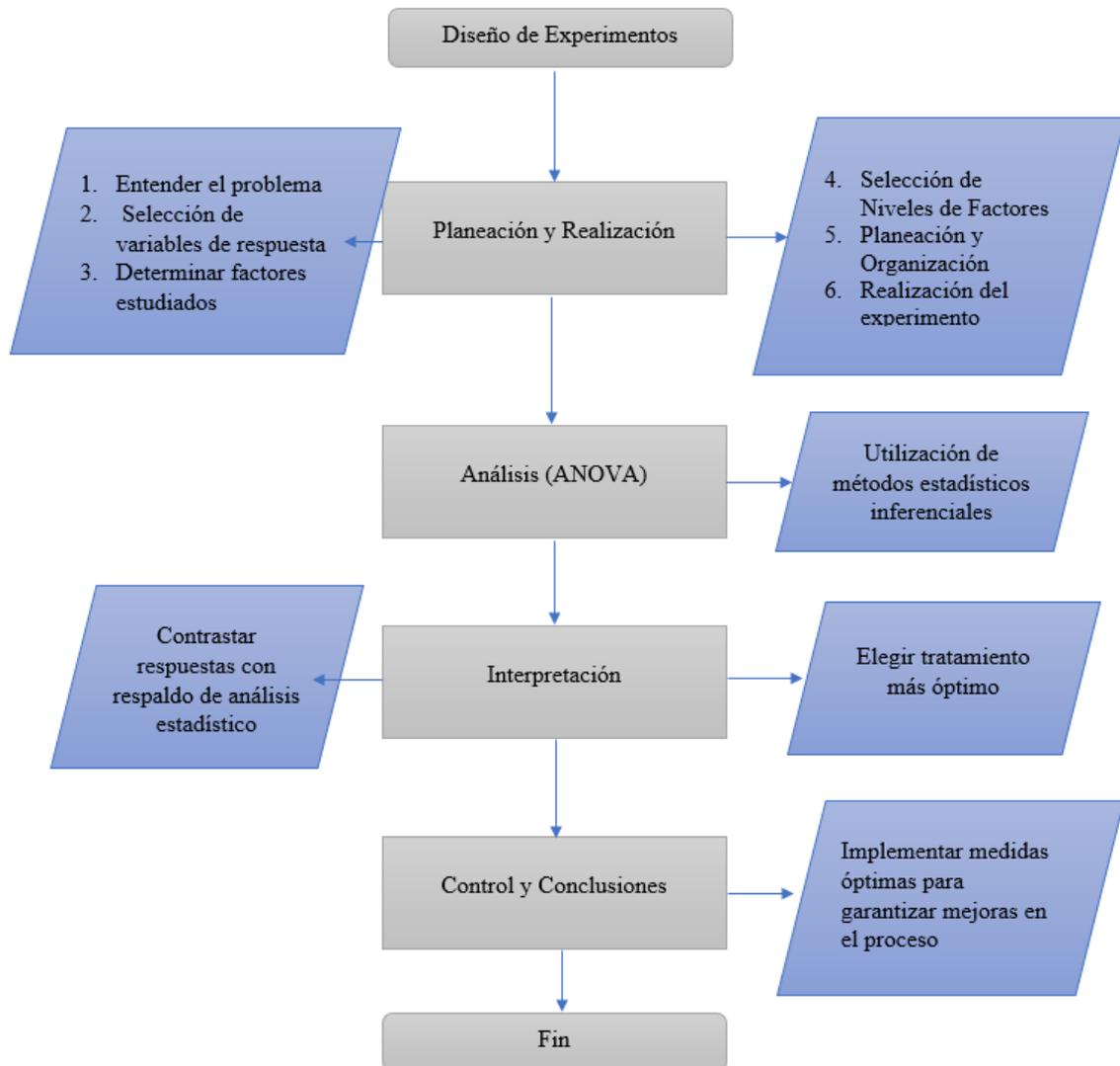
En la figura 5 se esquematiza las variables presentes en un diseño de experimentos.



*Figura 5* Variables de un diseño de experimentos

## 2.7.2. Etapas del diseño de experimentos

En el siguiente flujo grama que se muestra en la figura 6 se esquematiza las etapas que requiere un análisis de experimentos:



**Figura 6** Etapas del diseño de experimentos

Fuente: (Gutiérrez Pulido & Vara Salazar, 2008)

### 2.7.3. Diseño Factoriales

Un diseño factorial como se ha mencionado es un diseño experimental que permite determinar las respuestas que se producen cuando intervienen diferentes factores en un proceso. Una vez seleccionados los factores se debe generar una matriz o arreglo ortogonal que facilita la organización de todos los posibles tratamientos a realizar. En general los diseños factoriales son representados por la notación:

$$N^k$$

Donde:

- N: número de niveles seleccionados
- k: número de factores seleccionados

Una matriz ortogonal que permita identificar la combinación de diferentes factores con sus correspondientes niveles se puede apreciar en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Matriz Ortogonal de Tratamientos para dos factores con dos niveles*

Factores	B		
	Niveles	B1	B2
A	A1	A1B1	A1B2
	A2	A2B1	A2B2

## 2.8. Transferencia de Calor en estado Transitorio

La transferencia de calor en régimen transitorio se considera al fenómeno físico en el cual un cuerpo que mantiene una temperatura interior constante se somete a un proceso de calentamiento o enfriamiento en un determinado tiempo hasta llegar a una temperatura estable que es el resultado de la transferencia de calor de un medio hacia el cuerpo.

En el estado transitorio la ecuación de balance energético surge a partir de la siguiente expresión:

***Ecuación 1 Equilibrio Térmico en conducción de calor en régimen transitorio***

$$h * A_s * (T_m - T)dt = mC_p dT$$

La ecuación 1 es la representación matemática resuelta de la expresión mencionada anteriormente y se expresa de la siguiente manera:

Esta expresión indica la igualdad entre la razón de transferencia de calor por convección que se produce del medio al cuerpo y la cantidad total de calor del cuerpo y el medio circundante en un rango de tiempo.

$$\left( \begin{array}{l} \text{Transferencia de calor} \\ \text{hacia el cuerpo durante } dt \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{El incremento en la energía} \\ \text{del cuerpo durante } dt \end{array} \right)$$

En el proceso de transferencia de calor en régimen transitorio el cuerpo sufre un calentamiento o enfriamiento por el fluido del medio circundante, inicialmente el calor es transferido por convección desde el medio al cuerpo y posteriormente por medio de conducción el calor se transfiere hacia el interior del cuerpo. (Cengel, 2011)

Es importante en este proceso conocer el valor del número de Biot, que es una constante que indica la razón entre la resistencia a la conducción dentro del cuerpo y la Resistencia a la convección en la superficie del cuerpo.

En el caso de que el valor de Biot (Bi) sea menor o igual a 0.1 se considera al proceso como un sistema concentrado donde la distribución de temperaturas en el cuerpo es uniforme. (Cengel, 2011)

El método de sistemas concentrados es aplicable siempre y cuando las variaciones de temperatura en un cuerpo sean despreciables, sin embargo, existen problemas en los cuales se requiere el análisis de cuerpos más grandes que pueden ser de pared plana, esferas o cilindros.

***Ecuación 2 Ecuación general de conducción de calor***

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Donde  $\alpha$  es la difusividad térmica del Material.

Cuando el número de Biot es mayor a 0.1 el problema de transferencia de calor en régimen transitorio deja de ser válido para sistemas concentrados por lo que se expresan los problemas de forma adimensional, la dificultad presente con este procedimiento es que se debe manejar soluciones con series infinitas y ecuaciones implícitas por lo que se deben resolver este tipo de problemas por métodos gráficos o tabulares.

Existen soluciones aproximadas tanto para una pared plana como para un cilindro y una esfera en la cual están inmersos los coeficientes  $(A_1, \lambda_1)$  que se obtienen mediante tablas y que dependen del valor del número de Biot calculado estas soluciones aproximadas son: (Cengel, 2011)

***Ecuación 3 Soluciones aproximadas para diferentes geometrías***

Pared Plana(*centro en :  $x = 0$* ):  $\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$

Cilindro(*centro en :  $r = 0$* ):  $\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$

Esfera(*centro en :  $r = 0$* ):  $\frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$

En las ecuaciones para soluciones aproximadas se utiliza el término  $\tau$  que es el tiempo adimensional para régimen transitorio o más conocido como número de Fourier. Los demás términos de las soluciones aproximadas convergen rápidamente conforme se incrementa el tiempo por lo que el cálculo de las aproximaciones tiene un error del 2% cuando  $\tau > 0.2$ , en la tabla 21 se muestra los valores de los coeficientes  $(A_1, \lambda_1)$  para soluciones aproximadas.

**Tabla 21**

*Coefficientes usados en las soluciones aproximadas de un término de la conducción de calor*

Bi	Pared plana		Cilindro		Esfera	
	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$	$\lambda_1$	$A_1$
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
$\infty$	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000

Fuente: (Cengel, 2011)

## **2.9. Caracterización a flexión**

Los materiales compuestos WPC dependiendo de sus componentes han sido evaluados y caracterizados a partir de normas que tienen relación a polímeros o maderas como son la ASTM D790 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials).

Los materiales WPC en los últimos años han tenido mucha acogida por sus ventajas y características por lo que en Norteamérica la ASTM (American Society for Testing and Materials), por medio del subcomité D07.02, de Madera y Productos de Ingeniería de Madera ("Lumber and Engineered Wood Products"), han desarrollado normas y estandarizaciones que facilitan el estudio de caracterización, la fabricación e incluso el diseño de los productos que son compuestos de polímeros y reforzados con madera.

### **2.9.1. Norma ASTM D790**

#### **Métodos de ensayo estándar para propiedades a flexión de materiales plásticos no reforzados, reforzados y materiales aislantes eléctricos.**

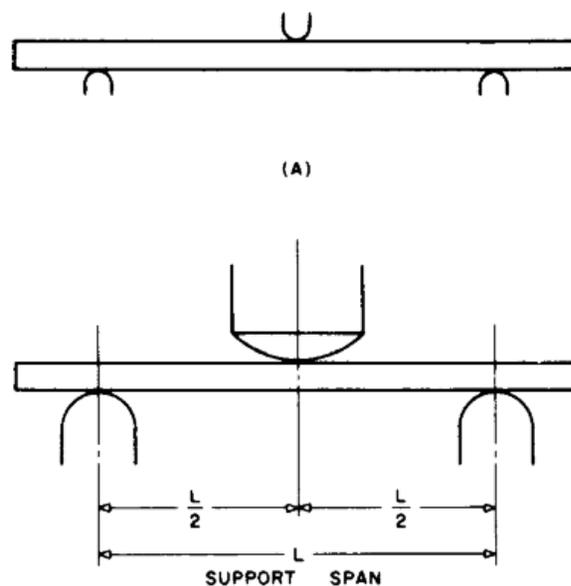
La norma ASTM D790 tiene como alcance determinar las propiedades a flexión de los materiales plásticos no reforzados y reforzados en forma de barras rectangulares moldeadas directamente o que han sido cortadas de láminas. Las pruebas que sugiere la norma realizar son aplicables tanto para materiales rígidos, así como a los semirrígidos.

- **Método de Prueba:**

La norma indica que se debe colocar el espécimen de prueba en su sección transversal simplemente apoyada en dos soportes, este espécimen de prueba debe ser cargado en la

mitad de la longitud del espécimen entre los soportes. El ensayo deberá durar mientras el espécimen es deformado hasta llegar a la ruptura en la superficie externa o hasta que una tensión máxima dada haya superado su valor en un 5%.

En la figura 7 se presenta un esquema del ensayo a flexión indicado por la norma ASTM D790. (ASTM-D790, 2003)



**Figura 7** Esquema de ensayo a flexión  
Fuente: (ASTM-D790, 2003)

- **Especímenes de Prueba**

Los especímenes de prueba según la norma ASTM D790 deben ser cortadas de láminas, piezas moldeadas o pueden ser maquinadas de acuerdo a las dimensiones finales deseadas.

- **Número de Especímenes:**

El número de ensayos a realizar es de al menos 5 probetas para cada muestra de probetas obtenidas.

- **Cálculos**

La norma indica diferentes expresiones matemáticas para la caracterización a flexión del material ensayado de las cuales las más utilizadas son:

**Esfuerzo a flexión:**

*Ecuación 4 Esfuerzo en las fibras extremas en el punto medio*

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

$\sigma$ : *esfuerzo en las fibras externas en el punto medio [MPa]*

$P$ : *Carga en un punto específico [N]; [lbf]*

$L$ : *Longitud entre soportes*

$b$ : *ancho del espécimen de prueba*

$d$ : *profundidad del espécimen de prueba*

**Módulo de Elasticidad**

*Ecuación 5 Modulo de elasticidad*

$$E_B = \frac{L^3m}{4bd^3}$$

Donde:

$E_B$ : *Modulo de elasticidad [MPa], [PSI]*

$L$ : *Longitud entre soportes*

*b*: ancho del espécimen de prueba

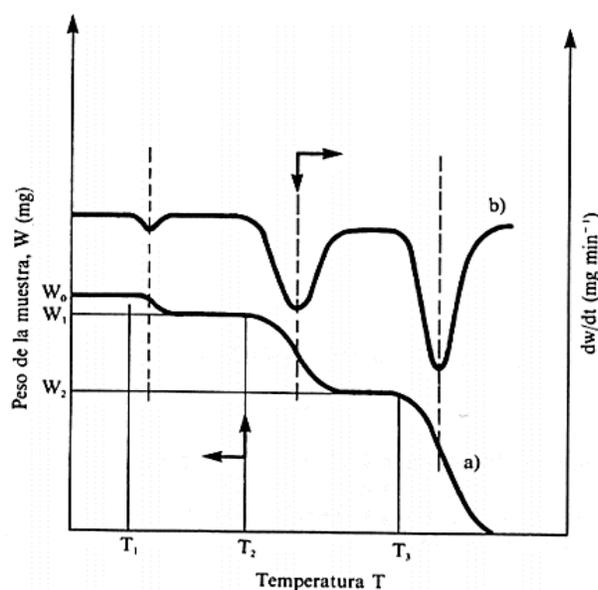
*d*: profundidad del espécimen de prueba

*m*: pendiente de la curva carga – deformación

## 2.10. Análisis DSC

El análisis DSC (Differential Scanning Calorimetry) cuyas siglas significan calorimetría diferencial de barrido es una técnica de análisis térmico que permite la medición de las propiedades físicas de un producto mientras se somete a un procedimiento de variación controlada de temperaturas.

En este tipo de análisis se obtiene como resultado una gráfica denominada curva de descomposición térmica o Termograma del producto analizado en función del tiempo o de la temperatura como se observa en la figura 8. (Granados, 2015)



**Figura 8** Termograma o curva de descomposición térmica

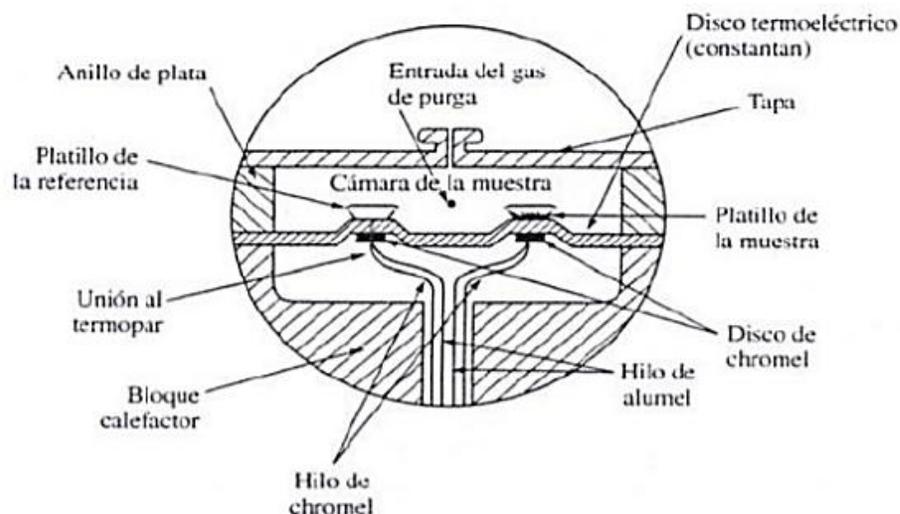
Fuente: (Skoog, Holler, & Crouch, 2001)

El análisis DSC durante su procedimiento permite determinar la capacidad que tiene un cierto material o una sustancia de absorber o liberar energía calórica. El proceso puede ser realizado de distintas formas, una de ellas es mantener la temperatura constante en un intervalo determinado de tiempo durante el procedimiento y la otra forma es afectar térmicamente a la muestra ya sea calentándola o enfriándola en un determinado intervalo de tiempo.

Este análisis es favorable en distintas situaciones ya que el rango de temperaturas en las cuales se puede ensayar a la muestra va desde  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . (Granados, 2015)

En el procedimiento del análisis DSC se dispone en la mayoría de máquinas para ensayos dos compartimientos en los cuales en uno se coloca la muestra a ensayar y el otro compartimiento se mantiene vacío por lo que se lo denomina espacio de referencia como se muestra en la figura 9.

Durante el procedimiento calefactores regulan la temperatura tanto de la muestra como el del espacio de referencia a fin de que la temperatura se mantenga en equilibrio en ambos compartimientos, de esta forma si existe algún fenómeno físico en el cual exista un proceso endotérmico o exotérmico la cantidad de temperatura es equilibrada mediante una compensación de energía. (Granados, 2015)



**Figura 9** Esquema típico para una cámara de ensayo  
Fuente: (Ospina Jimenez & Rondón Arciniegas , 2006)

Las propiedades más destacadas que se puede determinar a través de este análisis se detallan en la tabla 22.

**Tabla 22**

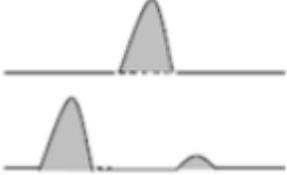
*Utilidades del Análisis DSC*

<b><i>Utilidades del Análisis DSC</i></b>
Capacidad Calórica y Relajación Estructural
Características de transformación: Transición Vítre, Punto de Cristalización, Fusión, Ebullición y Descomposición.
Estabilidad Térmica del Material
Cinética de Cristalización de la sustancia o producto

Fuente: (Granados, 2015)

La interpretación de las curvas en un termograma obtenidas mediante un análisis DSC ha sido implantada de acuerdo a sistemas nacionales de ensayos en los diferentes países teniendo así en su mayoría las interpretaciones descritas en la tabla 23.

**Tabla 23***Interpretación de curvas DSC*

<b>INTERPRETACIÓN DE CURVAS DSC</b>		
<b>TRANSFORMACIÓN</b>	<b>CURVA DSC</b>	<b>TIPO DE TRANSICIÓN</b>
Fusión Múltiple (Diferentes fases o tamaños de los cristales, mezcla de polímeros semicristalinos)		Fusión
Fusión de un polímero orientado		
Cristalización en condiciones Isotermas		Cristalización
Cristalización desde el fundido		
Cristalización con un calentamiento		
Enfriamiento desde el Fundido		Transición Vítrea
Polimerización		Otros Procesos Físico - Químicos
Descomposición		
Evaporación, Sublimación		
Evaporación en crisol cerrado		

*Fuente:* (Granados, 2015)

## CAPÍTULO III

### IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE ENDURECIMIENTO

El presente capítulo detalla los ajustes realizados al equipo de extrusión como procedimiento preparatorio para la implementación posterior del sistema de endurecimiento, se precisa además diferentes alternativas para la selección de dispositivos de enfriamiento y posteriormente se realiza la implementación.

El ajuste, diseño y construcción del sistema de endurecimiento se lo realizará en dos fases detalladas en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Fases de Implementación del Diseño de Endurecimiento*

<b>1era Fases</b>	1. Identificación de los sistemas del equipo de extrusión
	2. Determinación del estado actual del equipo de extrusión
	3. Mantenimiento y recuperación de elementos del equipo de extrusión
	4. Implementación de mejoras necesarias en equipo de extrusión.
<b>2nda Fases</b>	1. Selección de alternativas para dispositivos de sistema de endurecimiento
	2. Diseño del Dispositivo
	3. Calibración y pruebas de funcionamiento

#### **3.1. Ajustes del equipo de extrusión**

Es indispensable para poder ajustar el equipo de extrusión conocer la situación actual del funcionamiento operacional de la misma y de sus parámetros de operación.

##### **3.1.1. Parámetros del Equipo de Extrusión**

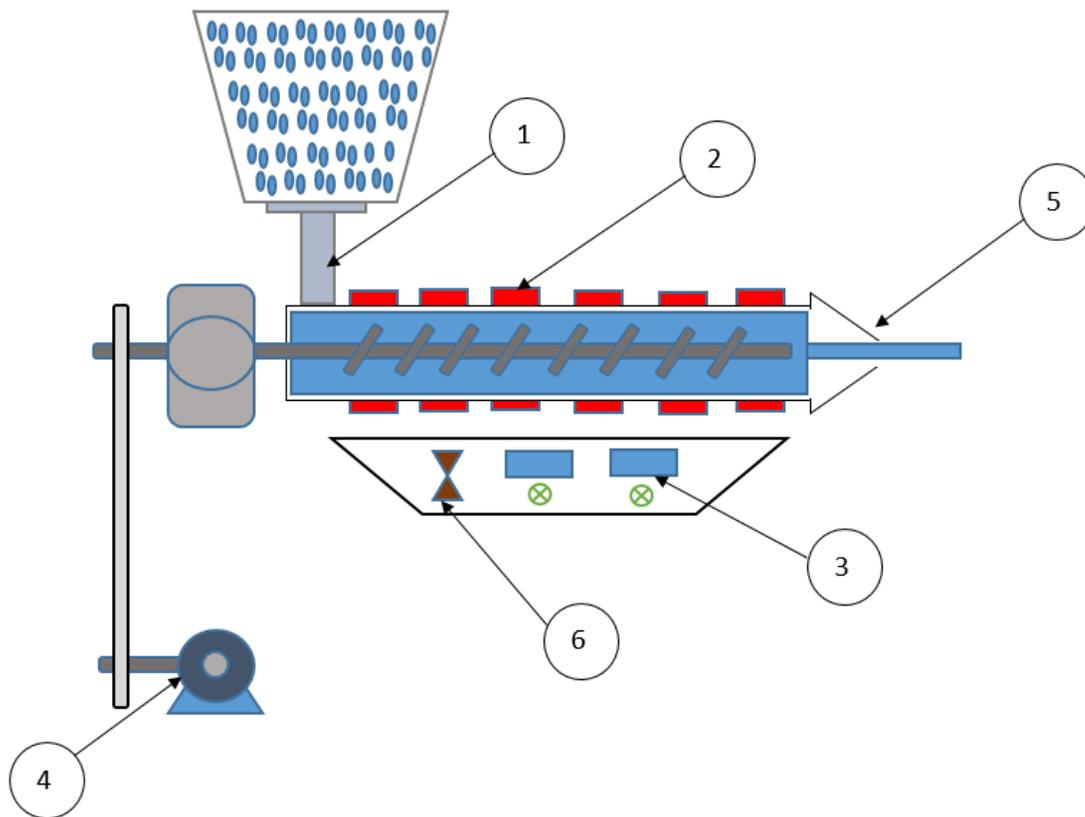
Se tiene los parámetros iniciales del equipo de extrusión detallada en la tabla 25

**Tabla 25***Parámetros del Equipo de Extrusión*

<b>Motor</b>	Motor Trifásico de 1.5 HP
<b>Reductor</b>	480 V
<b>helicoidal</b>	60 Hz
<b>Leroy Somer</b>	1680 RPM
	2.4 A
<b>Tornillo</b>	Longitud: 760 mm
<b>sinfín</b>	Diámetro: 27 mm
	Ángulo de hélice: 17 °
<b>Resistencias</b>	5 Resistencias de 700 Watts
<b>Térmicas</b>	1 Resistencia de 400 Watts
<b>Conexión</b>	220 V
<b>eléctrica</b>	

**3.1.2. Situación actual del equipo de Extrusión**

En el laboratorio de Mecánica de Materiales “ESPE”, se encuentra un equipo de extrusión realizado como proyecto de titulación en el año 2010. El equipo en un inicio fue utilizado por los estudiantes del DECEM para poder obtener conocimientos prácticos en cuanto al proceso de extrusión. En la figura 10 se muestra un esquema del equipo de extrusión con cada uno de los sistemas identificados.



**Figura 10** Sistemas del Equipo de Extrusión  
Fuente: (Autoría Propia)

La tabla 26 detalla cada uno de los sistemas del equipo de extrusión.

**Tabla 26**

*Detalle de los Sistemas del Equipo de Extrusión*

No.	Sistema Identificado
1	Sistema de Alimentación
2	Sistema de Calentamiento
3	Sistema de Medición
4	Sistema Motriz
5	Sistema de Extrusión del Perfil
6	Sistema de Seguridad

### 3.1.3. Sistema Alimentación

El sistema de alimentación en el proceso de extrusión permite que el material peletizado ingrese a la máquina de forma continua antes de ser procesado. Los elementos que conforman el sistema se detallan en la tabla 27.

**Tabla 27**

*Sistema de Alimentación*

<b>Componentes</b>	<b>Observaciones</b>
Tolva	Ninguna
Tubo de Alimentación	Temperatura alta
Tornillo helicoidal sinfín	Material residual pegado

Durante las pruebas que se realizaron inicialmente en la extrusora se pudo verificar que el proceso de alimentación no era continuo por lo que en determinados intervalos la alimentación de material era en menores cantidades a lo normal. Tomando en cuenta las observaciones detalladas en la tabla 27.

Se pudo observar que este inconveniente se debía a que el tubo de alimentación llegaba a calentarse a temperaturas altas similares a las de las bandas calefactoras, de esta forma el material que ingresaba se aglomeraba en las paredes y evitaba que este siga pasando hacia el tornillo de extrusión, finalmente la velocidad de extrusión se reducía.

Para mejorar el funcionamiento del tubo de alimentación se incorporó un serpentín de cobre de 2 metros de longitud con recirculación de agua en el área con mayor temperatura permitiendo que el tubo se mantenga frío y el material siga fluyendo sin interrupciones como se muestra en la figura 11.

El tornillo sinfín también forma parte del sistema de alimentación ya que es el encargado de llevar el material fundido hacia el cañón de conformado por lo que se realizó el desmontaje y limpieza del mismo ya que contenía material pegado en las paredes como se muestra en la figura 12.



**Figura 11** Serpentín de Enfriamiento

Fuente: (Autoría Propia)



**Figura 12** Limpieza del Tornillo de extrusión

Fuente: (Autoría Propia)

### **3.1.4. Sistema de Calentamiento**

El sistema de calentamiento está compuesto por los elementos descritos en la tabla 28 su función principal es aportar energía térmica con el fin de calentar el material que es trasladado por el tornillo sin fin.

**Tabla 28***Sistema de Calentamiento*

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Observaciones</b>
Bandas Calefactoras 700 W	5	Ninguna
Banda Calefactora 400 W	1	Ninguna
Interruptores para calefactores	2	Ninguna

Se pudo observar que el sistema de calentamiento funciona de manera correcta en el proceso de extrusión por lo que no se realizó ninguna observación.

**3.1.5. Sistema de Medición de Temperatura**

El sistema de medición de temperatura está compuesto por los instrumentales detallados en la tabla 29 su principal función es setear e indicar las temperaturas de las bandas calefactores a las cuales se desea trabajar.

**Tabla 29***Sistema de Medición de Temperatura*

<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Observaciones</b>
Termocuplas Tipo J	2	Ninguna
Controladores Digitales de Temperatura CAMSCO TC - 96	1	Ninguna

Tanto las termocuplas, así como los controladores digitales tenían un funcionamiento correcto, no se registró ninguna observación.

**3.1.6. Sistema Motriz**

El sistema motriz en el proceso de extrusión es uno de los más importantes ya que permite transmitir el movimiento generado por el motor reductor y variar la velocidad de extrusión que es un parámetro importante en el proceso. Los elementos que conforman este sistema se detallan en la tabla 30.

**Tabla 30**  
*Sistema Motriz*

<b>Componentes</b>	<b>Observaciones</b>
Cadena	Falta engrasar
Piñones	Falta engrasar
Motor Reductor helicoidal Leroy Somer	Ninguna
Rodamientos Cónicos	Falta Engrasar
Variador de Frecuencia Danfoss Delta 2HP	Ninguna

El principal inconveniente que se pudo detectar en este sistema es la falta de lubricante en los diferentes componentes. Se limpió cada uno de los componentes descritos y se los engraso para que su funcionamiento sea óptimo.

### **3.1.7. Sistema de Extrusión del Perfil**

El sistema de extrusión está compuesto de los elementos descritos en la tabla 31. Este sistema permite dirigir el material fundido a través de un dado que permite darle la forma geométrica deseada al perfil extruido.

**Tabla 31**  
*Sistema de Extrusión del Perfil*

<b>Componentes</b>	<b>Observaciones</b>
Cañón de Extrusión	Ninguna
Dado de extrusión de perfil cuadrado	Ninguna

Los elementos del sistema de extrusión funcionan correctamente, únicamente al ser desmontados fueron limpiados como mantenimiento preventivo. Adicionalmente no se registraron observaciones.

### 3.1.8. Sistema de Seguridad

En el panel de control de la maquina extrusora podemos identificar tanto el botón de encendido como el de paro de emergencia que son los principales componentes de este sistema descritos en la tabla 32.

**Tabla 32**

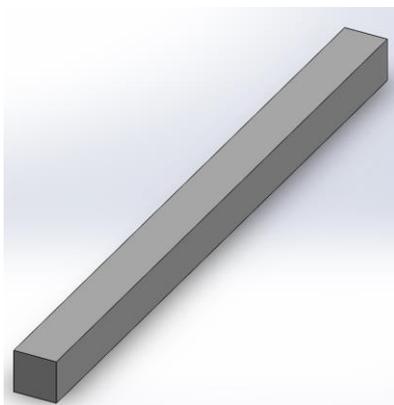
*Sistema de Seguridad*

<b>Componentes</b>	<b>Observaciones</b>
Botón de encendido	Ninguna
Botón de Paro de Emergencia	Ninguna

El funcionamiento de los componentes del sistema de seguridad era correcto, no se registró observaciones.

### 3.2. Sistema de calibración

Para la implementación del sistema de calibración se ha realizado la reingeniería de un calibrador de extrusión. La figura 13 muestra la probeta que se desea extruir.



**Figura 13** Perfil deseado a partir de la extrusión

Un calibrador de extrusión es un elemento cuya función es permitir que la cantidad de material extruido se enfríe y mantenga su geometría.

Es común que los sistemas de calibración a nivel industrial sean construidos de materiales que permitan una alta conducción térmica como son el acero, el aluminio o el bronce y que puedan soportar la corrosión que se produce por liberación de gases del plástico extruido.

Adicionalmente el canal de extrusión es pulido para facilitar el flujo del material. (Jurado, 2016)

### 3.2.1. Selección de alternativas para sistema de endurecimiento

Existen distintas alternativas para la implementación del sistema de endurecimiento, la herramienta técnica que se ha utilizado para facilitar este procedimiento es el uso de una matriz morfológica de selección descrita en la tabla 33.

Que permita a través de características positivas y negativas de cada una de las alternativas seleccionar la más adecuada en acorde al proyecto que se está realizando.

**Tabla 33**

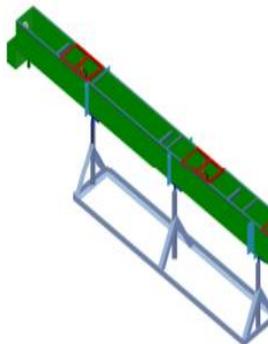
*Matriz Morfológica de Soluciones para enfriamiento de perfil extruido*

Endurecimiento del Perfil Extruido	Soluciones Analizadas	Ilustración de Solución	Función Requerida
	Aspersores de Enfriamiento		Enfriamiento del Polietileno extruido por medio de un flujo continuo de líquido refrigerante

**CONTINÚA**

---

Tina de  
Enfriamiento  
o



Enfriamiento del Polietileno extruido  
mediante convección por inmersión de la  
probeta en un medio refrigerante

---

Calibrador  
de  
Enfriamiento  
o



Enfriamiento del perfil extruido  
mediante conducción y convección.

---

La matriz de evaluación detallada en la tabla 34 permite identificar las variantes de solución y tomar la decisión más adecuada para la selección del dispositivo de endurecimiento conforme a las evaluaciones realizadas.

Y de esta manera poder tener la mejor opción para la realización del proyecto teniendo el mejor rendimiento para tener un sistema de refrigeración y poder dar un endurecimiento correcto a la probeta.

Tabla 34

*Matriz de Evaluación de selección de elemento para sistema de enfriamiento*

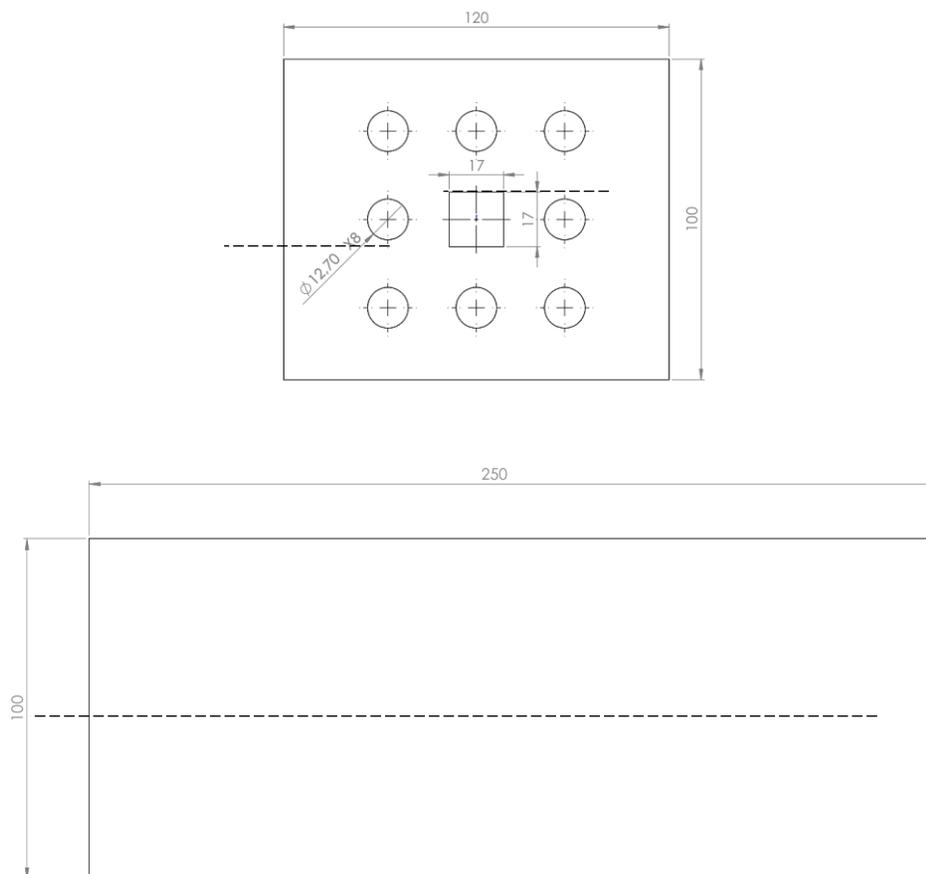
ENFRIAMIENTO DEL PERFIL DE EXTRUSIÓN									
VARIANTE SOLUCIÓN	Variante solución (vs) evaluada por: CRITERIO DE SELECCIÓN (+) Si (-) No (?) Falta de Información (!) Revisar Especificaciones							DECISIÓN	
	Eficiencia del Enfriamiento							Marcar variante solución (VS)  (+) Continuar la solución (-) Eliminar la Solución (?) Colectar información (!) Revisar especificaciones para posible camino	
	Facilidad de Instalación								
	Facilidad de Mantenimiento								
	Costo Económico								
	Mejor conformado de la probeta								
	Preferencia a nivel Industrial								
	OBSERVACIONES (INDICADORES, RAZONES)							Decisión	
	A	B	C	D	E	F	G		
	Aspersores de Enfriamiento	-	+	-	+	-	-		Es de fácil instalación y bajo costo económico sin embargo no logra mantener la forma geométrica del material
Tina de Enfriamiento	+	+	+	+	-	-		Brinda un eficiente enfriamiento, es de fácil instalación, no logra mantener forma geométrica del perfil extruido y a nivel industrial es usado híbridamente con un calibrador.	+
Calibrador de Enfriamiento	+	+	+	-	+	+		Logra mantener la forma geométrica del material, es de fácil mantenimiento e instalación, es más usado en industria.	+

*Fuente: Formato propuesto por (PAHL & BEITZ, 1977)*

De acuerdo al análisis realizado con la tabla 32 de la matriz morfológica de selección, se tomó como opción idónea el uso de un dispositivo calibrador con el fin de poder endurecer al material extruido y de esta manera obtener las probetas requeridas.

### 3.2.2. Especificaciones del Calibrador

Se ha realizado una reingeniería de un Sistema de Calibración convencional, la construcción del mismo se ha basado en las especificaciones descritas a continuación. Las dimensiones generales del calibrador son detalladas en la figura 14.



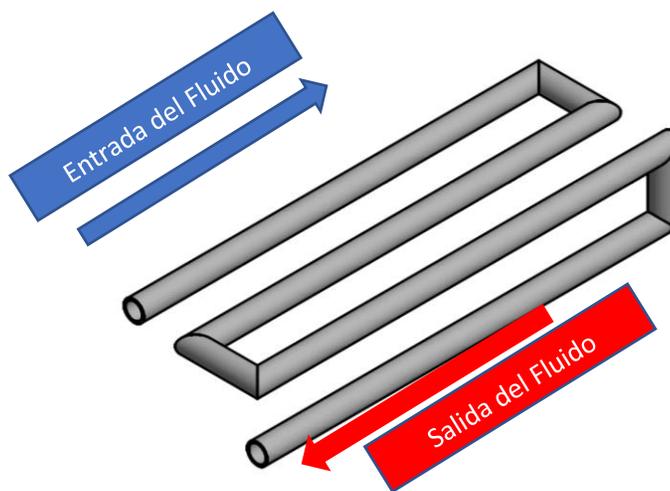
**Figura 14** Dimensiones del Calibrador

Para el uso de calibradores es eficiente que estos sean construidos en dos partes, una tapa superior y una tapa inferior con el objetivo de facilitar el paso inicial del material extruido a través del calibrador como se detalla en los planos del anexo 1.

Esta configuración del calibrador facilita el mantenimiento del canal de extrusión para poder ser pulido y engrasado después de su uso.

El calibrador cuenta con ocho canales de enfriamiento de  $\frac{1}{2}$  in de diámetro a lo largo del calibrador y distribuidos de manera simétrica abarcando todas las aristas y caras alrededor del área del canal de extrusión para tener un mejor enfriamiento.

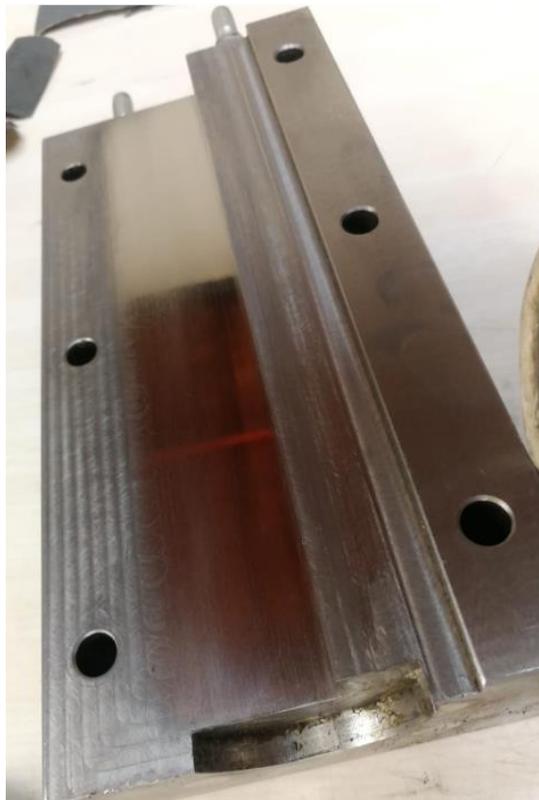
El flujo del líquido refrigerante tiene una configuración en paralelo y a contracorriente debido a que los 4 canales de refrigeración de cada cara tanto superior como inferior están conectados como se detallados en la figura 15 de esta manera se tiene una entrada de refrigerante frío y una salida de refrigerante caliente en cada tapa.



**Figura 15** Esquema de la conexión de canales de enfriamiento.

Los calibradores a nivel industrial son construidos con materiales como aluminio y bronce por dos principales razones, la primera es por su alto coeficiente de conductividad térmica y la segunda porque tienen un menor índice de corrosión. Sin embargo, su costo en el mercado es alto.

El calibrador es de Acero estructural ASTM A36, ya que para la aplicación de este proyecto el enfriamiento del mismo es adecuado y su costo en el mercado es accesible para el presupuesto del proyecto como se observa en la figura 16.

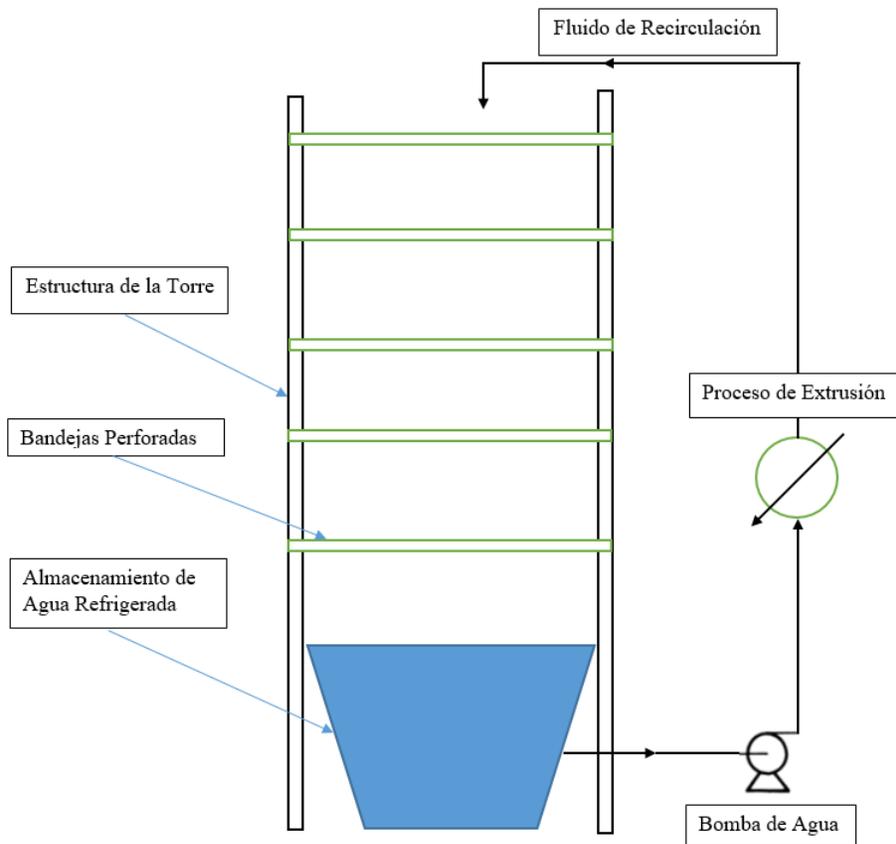


**Figura 16** Calibrador de Acero

### 3.3. Sistema de recirculación de agua

El sistema de calibración utiliza agua como fluido refrigerante, para obtener agua a una temperatura menor a la temperatura ambiente se utilizará una torre de enfriamiento. Por facilidades de instalaciones y disminución en los costos, el proyecto será realizado en las instalaciones de la Empresa “Plásticos ALPE” ubicada en la parroquia de Pomasqui.

En la figura 17 se presenta el esquema de la torre de enfriamiento con sus principales componentes y la explicación de su funcionamiento se detalla en la tabla 35.



**Figura 17** Esquema de la Torre de Enfriamiento

**Tabla 35***Funcionamiento de los elementos de la torre de Enfriamiento*

<b>No.</b>	<b>Componente</b>	<b>Función</b>
<b>1</b>	Estructura de la Torre de Enfriamiento	Su función es brindar estabilidad y soporte a los demás elementos que componen la torre de enfriamiento.
<b>2</b>	Bandejas Perforadas	El agua que se ha calentado en el proceso de extrusión llega por medio de la tubería hacia la bandeja más alta de la torre de enfriamiento, en ese momento a través de las perforaciones el agua empieza a caer hacia las bandejas inferiores logrando que el agua se enfríe nuevamente.
<b>3</b>	Tanque de Almacenamiento de Agua Refrigerada	Su función es almacenar todo el líquido que ha sido enfriado, está conectado por medio de tubería a la bomba de agua.
<b>4</b>	Bomba de Agua PAOLO PKm80	Se encarga de del recirculamiento de agua.
<b>5</b>	Proceso de Extrusión	Durante el proceso de extrusión el agua refrigerada ingresa al calibrador de enfriamiento y al serpentín ubicado en el tubo de alimentación, el agua se calienta y nuevamente sale para poder ser refrigerada.
<b>6</b>	Tubería de Circulación	Es la encargada de llevar el líquido refrigerante.

En la figura 18 se muestra una fotografía de la torre de enfriamiento utilizada en el proyecto.



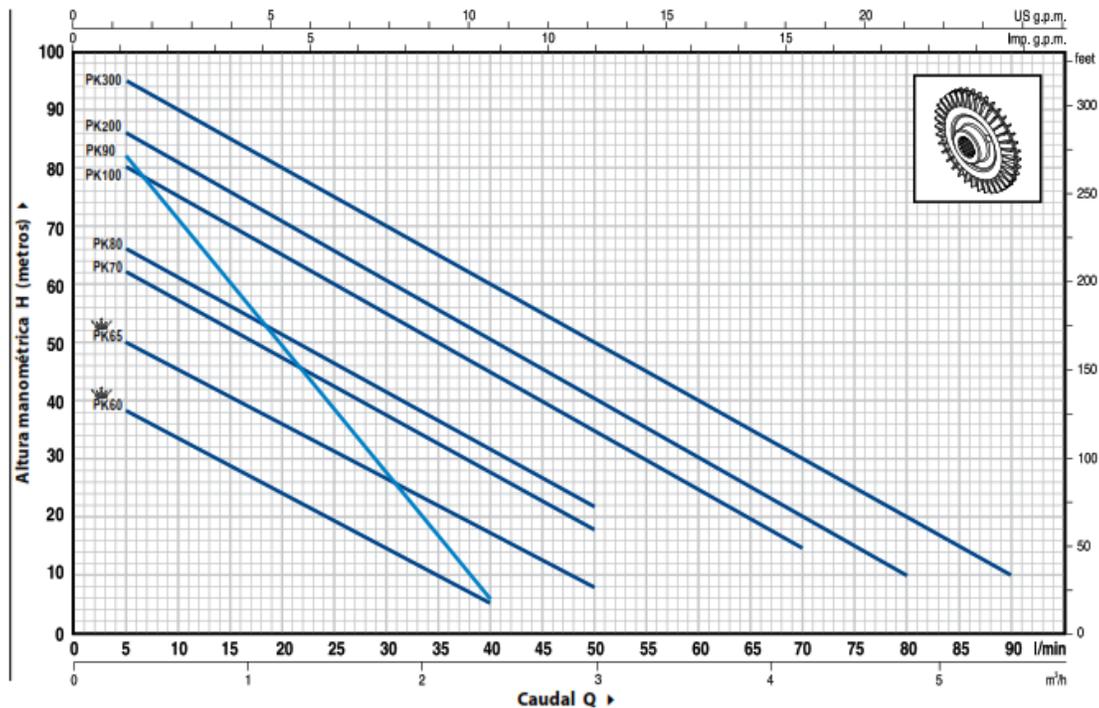
**Figura 18** Fotografía de la Torre de Enfriamiento

Para poder determinar el caudal de bombeo de agua refrigerada se ha realizado el cálculo tomando en cuenta las características detalladas en la tabla 36 de la bomba y la altura manométrica a la que se está bombeando el fluido que es de 3 metros, esta información fue proporcionada por la empresa “Plásticos ALPE”.

**Tabla 36**

*Características Técnicas de la Bomba Paolo PKm80*

PUMP : PKm80		n.						
Q.	5 ÷ 46	l/min	H	60 ÷ 10	m			
H.max	66	m	Q.max	48	l/min			
kW	0.75	HP	1	Hz	60	V	115/230	3450 min <sup>-1</sup>



**Figura 19** Tabla de Caudales de acuerdo a altura manométrica de Bombeo  
Fuente: Catálogo de Bombas PAOLO

Como se puede observar en la figura 19 a una altura de 3 metros el caudal de bombeo es el máximo ya que este valor empieza a disminuir a partir de los 22 metros de altura.

El valor de caudal de bombeado es  $46 \frac{L}{min}$  de acuerdo a la placa de características de la bomba. El caudal de la bomba es:  $Q_{bW} = 46 \frac{L}{min} = 0.77 \frac{kg}{s}$

La empresa “Plásticos ALPE” en sus instalaciones cuenta con una inyectora de Plásticos de marca WELLTEC 160F<sub>2</sub>, uno de los componentes más importantes de la Inyectora es el sistema de distribución de agua que cuenta con 6 salidas regulables el para control del caudal del líquido refrigerante utilizado en el proceso de refrigeración del molde de inyección de la máquina. El sistema de distribución de agua se muestra en la figura 20.



**Figura 20** *Sistemas de Distribución*

Para este proyecto La empresa “Plásticos ALPE” ha facilitado el uso de tres salidas del sistema de distribución de agua, las mismas que servirán para el enfriamiento del serpentín en el tubo de alimentación de la extrusora y de cada una de las tapas del calibrador. Se puede observar en la figura 20 que el sistema de distribución dispone de rotámetros en cada una de las salidas lo que nos permite poder variar el caudal del fluido refrigerante.

### 3.4. Pruebas de funcionamiento

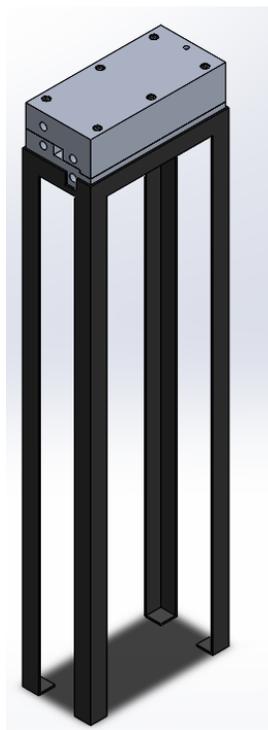
Inicialmente se realizaron pruebas de funcionamiento de la máquina extrusora en el laboratorio de Mecánica de Materiales ESPE, con el fin de poder determinar cuál era el estado del funcionamiento de la máquina extrusora.

Se pudo observar tras varios ensayos que, sin el uso de un sistema de endurecimiento, el material que era extruido perdía la forma geométrica deseada, ya que inicialmente se expandía debido a la dilatación térmica y posteriormente el material sufría una contracción. El material que se obtuvo en esta fase se puede observar en la figura 21.



**Figura 21** Probetas Iniciales sin sistema de Endurecimiento

Para poder endurecer la probeta y evitar que esta pierda su forma geométrica se implementó en el proceso de extrusión el calibrador como sistema de endurecimiento, además se construyó una mesa estructural detallada en la figura 22 que brinda soporte al calibrador con el fin de poder nivelar la altura del dado de extrusión con el calibrador.



*Figura 22 Fotografía de la Mesa y el Calibrador*

Se pudo observar que inicialmente era necesario hacer pasar una cierta cantidad de material extruido a través del calibrador con las caras abiertas con el objetivo de tener un tramo de material solido a la salida del calibrador que nos permita poder extraer el material por medio de tensión una vez que el calibrador ya era cerrado con sus dos tapas.

Sin embargo, el material extruido no conservaba una forma geométrica definida ya que tenía secciones diferentes al salir del calibrador. Este inconveniente era producto de que la fuerza y velocidad ejercida por la persona que tensionaba el material no era constante y se producía probetas como se muestra en la figura 23.

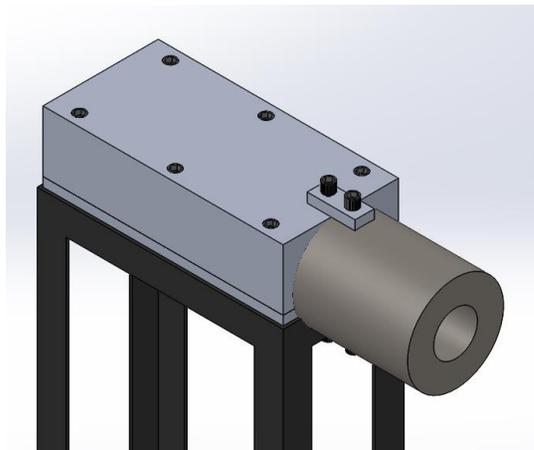


**Figura 23** Fotografía de Probetas con sección desigual

Se determinó que era necesario el uso de un jalador o tortuga de arrastre que permita extraer el material a una fuerza y velocidad constante, pero su alto costo en el mercado no era factible para este proyecto.

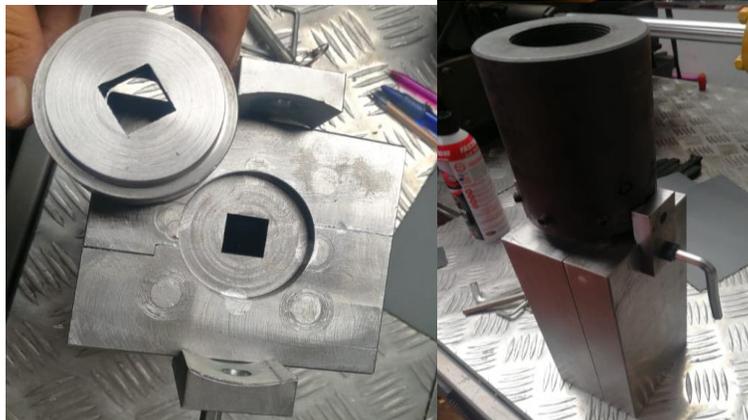
Para dar solución al inconveniente de mantener una fuerza de tensión y velocidad constante se tomó la iniciativa de ensamblar el cañón de extrusión con la entrada de material del calibrador a fin de que funcionen como un solo elemento como se muestra en la figura 24.

De esta manera la presión generada por el flujo del material que sale de la extrusora es suficiente para que el material logre pasar por el calibrador y este realice su función de endurecimiento.



**Figura 24** Calibrador y Cañón de Extrusora ensamblados

Se realizó un maquinado en la cara de entrada del material del calibrador para que la sección circular del dado de extrusión coincida con el canal de extrusión del calibrador como se observa en la figura 25.



**Figura 25** Fotografía del dado de extrusión y el calibrador

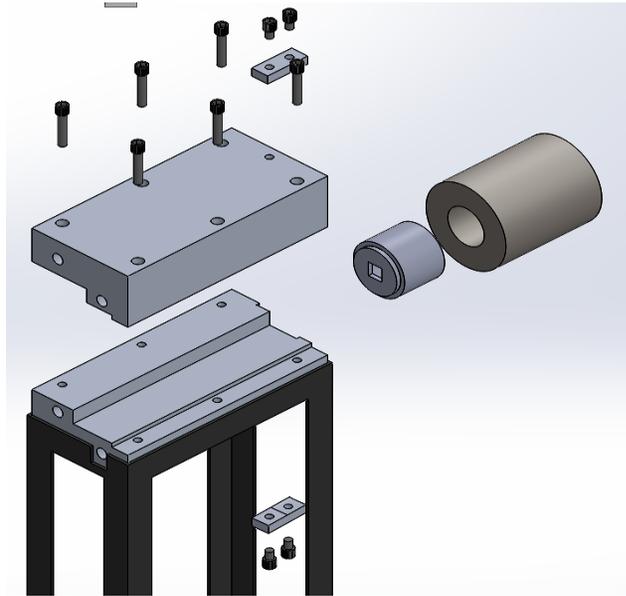
Se obtuvo como resultado probetas con la geometría deseada y endurecidas como se detalla en la figura 26.



**Figura 26** Fotografía de las probetas con sección cuadrada

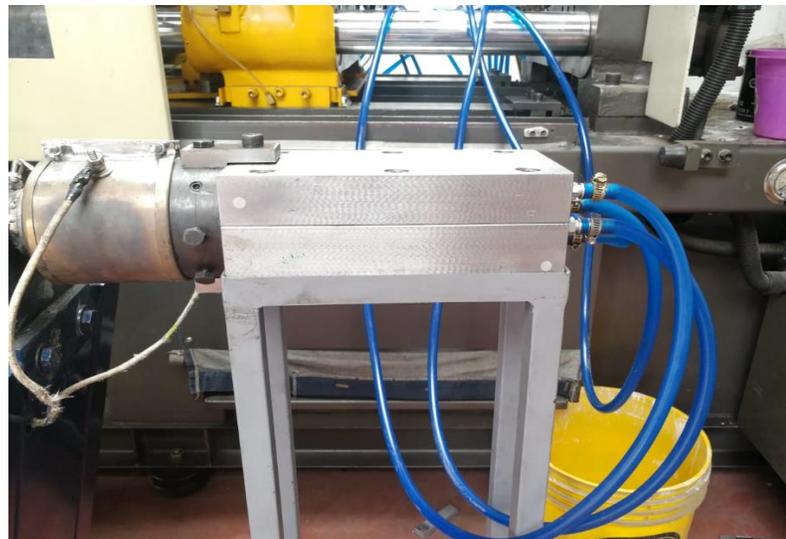
### **3.5. Ensamble del sistema de endurecimiento.**

Se muestra en la figura 27 el explotado del ensamble del sistema de endurecimiento con el cañón de extrusión y los ajustes que fueron requeridos.



**Figura 27** Ensamble del sistema de endurecimiento

Una vez ensamblado el sistema con las tuberías de agua y los pernos se pudo poner en funcionamiento el sistema de endurecimiento como se muestra en la figura 28.



**Figura 28** Ensamble definitivo del sistema de endurecimiento

## CAPÍTULO IV

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 4.1. Diseño factorial

En el presente proyecto el uso del diseño factorial tiene como principales ventajas reducir la variabilidad de los efectos del experimento y los tiempos de experimentación. El diseño factorial que se ha utilizado en este experimento es de un modelo:

$$3^2$$

Este modelo indica que se tiene dos factores de control que están especificados como valor del exponente, el coeficiente del modelo indica que se tiene 3 niveles de variación por cada uno de los factores especificados.

Los factores con mayor influencia en el proceso de extrusión del proyecto son:

- Temperatura de extrusión.
- Caudal del líquido refrigerante que permite el enfriamiento del calibrador.

Los niveles de variación para cada uno de los factores a controlar se detallan en la tabla 37.

**Tabla 37**

*Factores Controlables con sus correspondientes Niveles*

FACTORES	NIVELES
<b>Temperatura de Extrusión.</b>	125 ° C
	135 ° C
	150 ° C
<b>% Caudal del Líquido refrigerante.</b>	0.25 % = 19(Kg /seg)
	0.50 % = 38,5(Kg /seg)
	0.75 % = 58 (Kg / seg)

Los valores de los diferentes niveles de temperatura son 125, 135 y 150 grados centígrados, estos valores son tomados debido a que el rango de temperaturas para conformado de polietileno de alta densidad va desde 110 °C hasta 180 °C.

El caudal del refrigerante para controlar la temperatura del calibrador ha sido manejado mediante los rotámetros del sistema de distribución por lo que los niveles de abertura para dicho factor son del 0,25%, 0,50% y 0,75%.

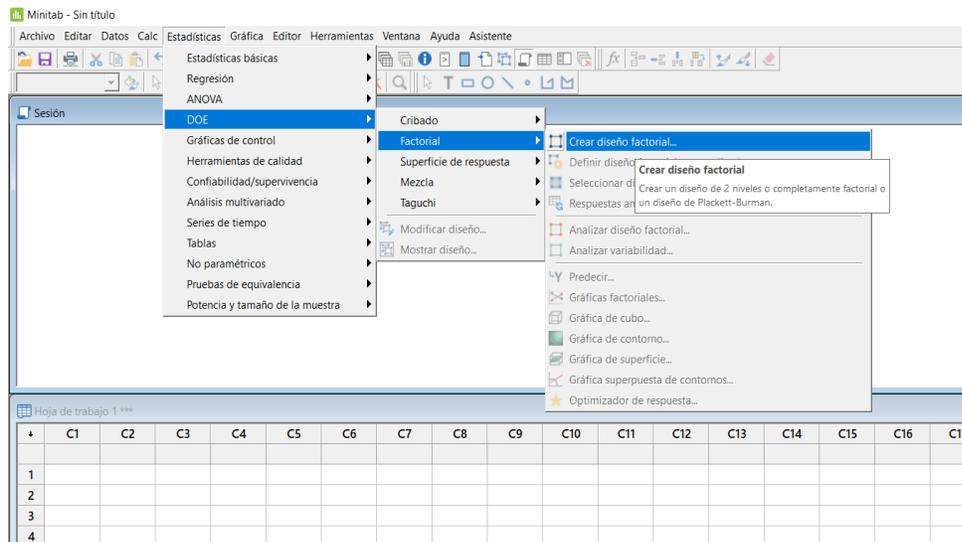
La variable de respuesta que se va a analizar en el diseño de experimentos es la carga máxima [N] en un ensayo a flexión de las probetas debido a que los factores que inciden durante el proceso de extrusión ayudan a mejorar o empeorar el conformado del material.

Se realiza dos réplicas por cada combinación de experimentos realizado ya que de esta manera el problema se vuelve más consistente, a mayor número de réplicas se tendrá una estimación más certera de los efectos.

Se utilizó el software estadístico MINITAB que permite realizar un análisis estadístico del diseño factorial a fin de obtener los parámetros óptimos para la obtención de probetas por medio de extrusión.

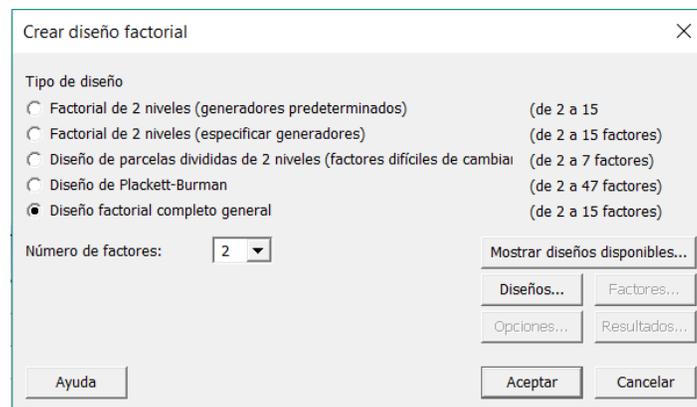
El análisis del experimento se realizó únicamente tomando en cuenta los parámetros de extrusión para probetas de 100% plástico, debido a que el incremento en la resistencia a flexión de probetas con madera como material de refuerzo hubiera sido notorio debido a que es un material reforzado y no por los cambios en las combinaciones de los tratamientos experimentales para extrusión.

En la pantalla principal de MINITAB en la pestaña estadística seleccionamos la opción diseño factorial y creamos un nuevo análisis de diseño factorial como se observa en la figura 29.



**Figura 29** Pantalla principal de Minitab

Creamos un diseño factorial completo con un número de factores igual a 2 como se detalla en la figura 30.



**Figura 30** Opciones de creación de diseño factorial

A continuación, en la opción diseños definimos la etiqueta para los dos factores, el número de los niveles para cada factor y el número de réplicas como se observa en la figura 31.

Factor	Nombre	Número de niveles
A	Temperatura de Extrusión	3
B	Caudal de Enfriamiento	3

Número de réplicas: 2

Bloque en réplicas

Ayuda      Aceptar      Cancelar

**Figura 31** Opciones de Diseños Factoriales

Una vez que se ha definido los valores anteriormente mostrados ingresamos al botón factores y definimos los valores de los niveles para cada uno de los niveles como se observa en la figura 32.

Factor	Nombre	Tipo	Niveles	Valores de nivel		
A	Temperatura	Numérico	3	125	135	155
B	Caudal de En	Numérico	3	0,25	0,50	0,75

Ayuda      Aceptar      Cancelar

**Figura 32** Definición de factores de diseño factorial

Una vez que se ha definido todos los parámetros para el diseño de experimentos aceptamos los cambios realizados y el programa automáticamente nos indica una tabla de resumen del diseño de experimentos y la matriz de tratamientos generada como se muestra en la figura 33.

<b>Diseño factorial de múltiples niveles</b>			
<b>Resumen del diseño</b>			
Factores:	2	Réplicas:	2
Corridas base:	9	Total de corridas:	18
Bloques base:	1	Total de bloques:	1
Número de niveles: 3; 3			
<b>Tabla de diseño</b>			
Corrida	Blq	A	B
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	1	3
4	1	2	1
5	1	2	2
6	1	2	3
7	1	3	1
8	1	3	2
9	1	3	3
10	1	1	1
11	1	1	2
12	1	1	3
13	1	2	1
14	1	2	2
15	1	2	3
16	1	3	1
17	1	3	2
18	1	3	3

**Figura 33** Tabla de resumen de Diseño Factorial

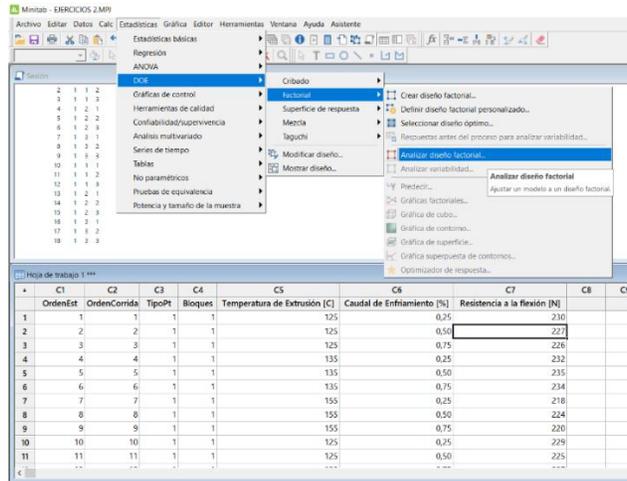
En la pantalla de celdas en una columna vacía adicionamos la etiqueta de resistencia a flexión con los valores resultantes al ensayar cada uno de los distintos tratamientos y sus réplicas como se muestra en la tabla 38.

**Tabla 38***Matriz Ortogonal de Diseño Factorial*

<b>Orden Est</b>	<b>Orden Corrida</b>	<b>Tipo Pt</b>	<b>Bloq</b>	<b>Temperatura de Extrusión [C]</b>	<b>Caudal de Enfriamiento [%]</b>	<b>Carga Max [N]</b>
1	1	1	1	125	0,25	230
2	2	1	1	125	0,50	227
3	3	1	1	125	0,75	226
4	4	1	1	135	0,25	232
5	5	1	1	135	0,50	235
6	6	1	1	135	0,75	234
7	7	1	1	150	0,25	218
8	8	1	1	150	0,50	224
9	9	1	1	150	0,75	220
10	10	1	1	125	0,25	229
11	11	1	1	125	0,50	225
12	12	1	1	125	0,75	227
13	13	1	1	135	0,25	233
14	14	1	1	135	0,50	235
15	15	1	1	135	0,75	230
16	16	1	1	150	0,25	217
17	17	1	1	150	0,50	223
18	18	1	1	150	0,75	220

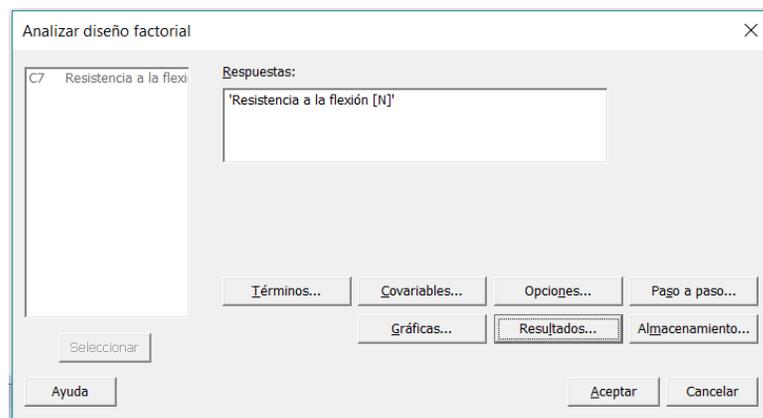
*Fuente: Datos obtenidos de Software Minitab*

Posterior al ingreso de las variables resultado volvemos a ingresar a la pantalla principal, seleccionamos la pestaña estadística seguido de la opción DOE, factorial y seleccionamos la opción análisis diseño factorial como se muestra en la figura 34.



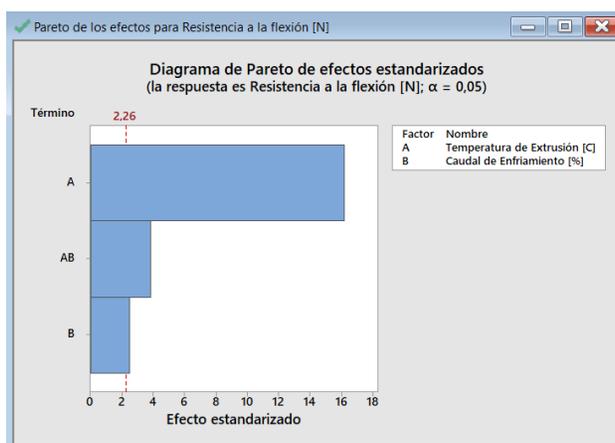
**Figura 34** Ejecución de Diseño Factorial

Le indicamos al software cual es la variable resultante para el análisis del Diseño factorial y aceptamos para poder obtener los resultados estadísticos como se detalla en la figura 35.



**Figura 35** Análisis del Diseño Factorial

A continuación, se muestra en la figura 36 el diagrama de Pareto de los efectos estandarizados con un nivel de confianza  $\alpha = 0.05$ , en la cual podemos observar que la línea con un valor de 2.26 cruza por los factores A, AB, y B mostrándonos de esta manera que son estadísticamente significativos en el experimento realizado.



**Figura 36** Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Los valores probabilísticos para cada uno de los factores a fin de podernos asegurar la significativos son en nuestro experimento. Se detalla el resumen del ANOVA en la figura 37.

### Regresión factorial general: Resistencia a la flexión [N] ... iamiento [%]

#### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Temperatura de Extrusión [C]	3	125; 135; 155
Caudal de Enfriamiento [%]	3	0,25; 0,50; 0,75

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.
Modelo	8	556,44	69,556
Lineal	4	509,22	127,306
Temperatura de Extrusión [C]	2	495,44	247,722
Caudal de Enfriamiento [%]	2	13,78	6,889
Interacciones de 2 términos	4	47,22	11,806
Temperatura de Extrusión [C]*Caudal de Enfriamiento [%]	4	47,22	11,806
Error	9	12,50	1,389
Total	17	568,94	

Fuente	Valor F	Valor p
Modelo	50,08	0,000
Lineal	91,66	0,000
Temperatura de Extrusión [C]	178,36	0,000
Caudal de Enfriamiento [%]	4,96	0,035
Interacciones de 2 términos	8,50	0,004
Temperatura de Extrusión [C]*Caudal de Enfriamiento [%]	8,50	0,004
Error		
Total		

#### Resumen del modelo

S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,17851	97,80%	91,21%

**Figura 37** Tabla de resumen ANOVA

Como se puede observar los valores probabilísticos (P) de la temperatura de extrusión, el caudal de enfriamiento y a la interacción de ambos son significativos ya que su valor es menor a 0.05 que es el nivel de confianza con el que se trabaja.

En el resumen de los valores de coeficientes detallado en la figura 38 también podemos observar los valores probabilísticos de los diferentes tratamientos.

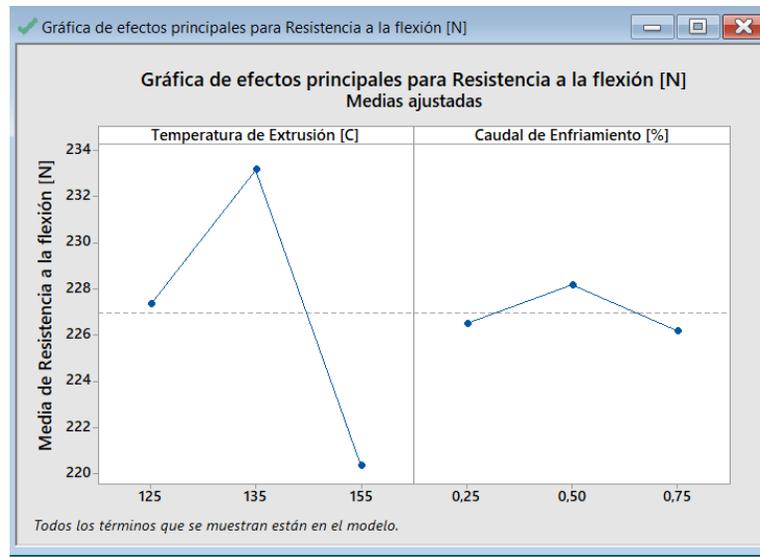
## Coeficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p
Constante	226,944	0,278	817,00	0,000
Temperatura de Extrusión [C]				
125	0,389	0,393	0,99	0,348
135	6,222	0,393	15,84	0,000
Caudal de Enfriamiento [%]				
0,25	-0,444	0,393	-1,13	0,287
0,50	1,222	0,393	3,11	0,012
Término	FIV			
Constante				
Temperatura de Extrusión [C]				
125	1,33			
135	1,33			
Caudal de Enfriamiento [%]				
0,25	1,33			
0,50	1,33			
Temperatura de Extrusión [C]*Caudal de Enfriamiento [%]				
125 0,25	1,78			
125 0,50	1,78			
135 0,25	1,78			
135 0,50	1,78			

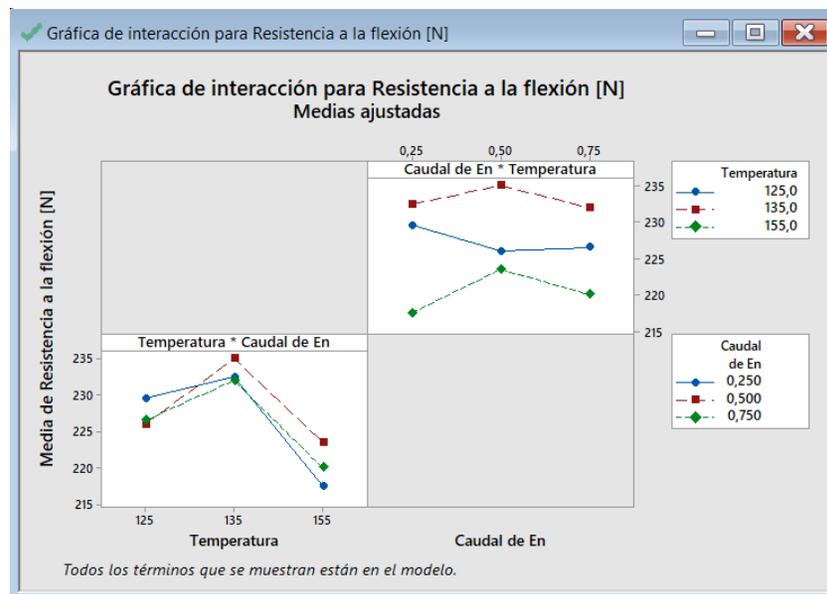
**Figura 38** Tabla de resumen de Coeficientes

Se puede observar que los valores probabilísticos menores a 0.05 son los parámetros con un valor de temperatura a 135 °C y un caudal de enfriamiento a una apertura de 0.50% por lo que a esta configuración se obtienen las probetas con mayor resistencia a flexión

Finalmente analizaremos los gráficos de efectos principales estos se muestran en la figura 39 y en la figura 40 podemos observar la gráfica interacción de ambos factores y su resultado para determinar combinación más óptima a fin de evitar resultados con alta variabilidad.



**Figura 39** Gráfica de Efectos Principales



**Figura 40** Gráfica de Interacción para Resistencia a flexión

Como se puede observar en las gráficas anteriores los valores más óptimos para obtener una probeta con mayor resistencia a la flexión es con una temperatura de 135 ° C y un caudal con apertura de 0.50%. Estos valores serán utilizados como parámetros para la obtención de las probetas que serán posteriormente ensayadas.

#### **4.2. Material de Matriz y Refuerzo**

Se especifica la procedencia tanto de la matriz polimérica como el refuerzo de madera y sus características.

##### **4.2.1. Material Plástico (Polietileno de Alta densidad reciclado)**

El material utilizado como matriz para el conformado del WPC es polietileno reciclado de alta densidad que se obtuvo de la empresa Reciplast, es importante recalcar que todas las probetas que se van a obtener del proceso de extrusión deben ser conformadas a partir del mismo lote de polietileno para evitar que exista variaciones en el comportamiento mecánico del material por lo que se utilizará un saco de 25Kg de HDPE reciclado detallado en la figura 41.



**Figura 41** Fotografía de Material HDPE

#### **4.2.2. Material de Refuerzo (Madera Eucalipto)**

El material utilizado como refuerzo son partículas de madera de Eucalipto, este material se obtuvo del aserradero MaderPin se compró un saco de aserrín de madera de Eucalipto del mismo lote de trabajo como se detalla en la figura 42 con el fin de que las propiedades del mismo no muestren variaciones en su comportamiento.



*Figura 42* Fotografía de Madera de Eucalipto

#### **4.3. Obtención de probetas**

Se especifica los pasos que se siguieron para la mezcla y obtención de las probetas.

##### **4.3.1. Secado de la Madera, tamizado y medición de diámetro**

Para la obtención de las probetas de material WPC es importante que la madera utilizada en el proceso de extrusión tenga un tamaño de partícula uniforme y una cantidad de humedad mínima, se puede utilizar polvo de madera o partículas más grandes de madera.

Se secó la madera con el fin de disminuir su humedad, esto favorece a que la liberación de gases sea mínima y se pueda evitar la generación de porosidad en el material. Se utilizó la maquina Banco de pruebas Sistema de Bomba de Calor Mecánica de 1HP de Capacidad que usa Refrigerante R404A con Aplicación en un Horno para Secado de Materia Orgánica ubicada en el laboratorio de Termodinámica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como se ve en la figura 43.



*Figura 43 Fotografía secado de Madera en máquina Banco de pruebas Sistema de Bomba de Calor Mecánica*

Se realizó el tamizado del aserrín de madera de Eucalipto con el fin de que las partículas de madera utilizadas para el proceso de extrusión tengan una dimensión similar a los pellets de HDPE reciclado, de esta manera el conformado del material será uniforme. Para el tamizado de las partículas se utilizó una malla de acero con diámetro de agujero de 4 mm, como se detalla en la figura 44.



**Figura 44** Fotografía de Malla de Acero para tamizado

#### **4.3.2. Mezclado y peso del producto**

Para la mezcla del material WPC se utilizó un recipiente plástico en el cual se pesaba mediante la balanza: KERN 440-53 con una apreciación de un gramo la cantidad de 720 gramos de polietileno de alta densidad establecida de acuerdo al volumen del recipiente como se muestra en la figura 45.



**Figura 45** Fotografía de Material pesado

Una vez que se ha pesado el material se realiza el cálculo del 5,10 y 15 % de porcentaje en masa que se debe retirar de los 800 gramos para poder adicionar la cantidad en masa de madera faltante y de esta manera mantener los 800 gramos como cantidad establecida como se detalla en la figura 46.



**Figura 46** Fotografía de Material pesado mezclado

Se muestra el ejemplo de cálculo realizado para una muestra de 5%:

$$\text{Cantidad inicial de HDPE} = 800 \text{ gr}$$

$$5\% \text{ en masa de HDPE a retirar} = 800 * 0.05 \text{ gr} = 40 \text{ gr}$$

La cantidad de material utilizado para obtener muestras con 5% de Madera y 95% HDPE es:

$$\text{HDPE: } 760 \text{ gr}$$

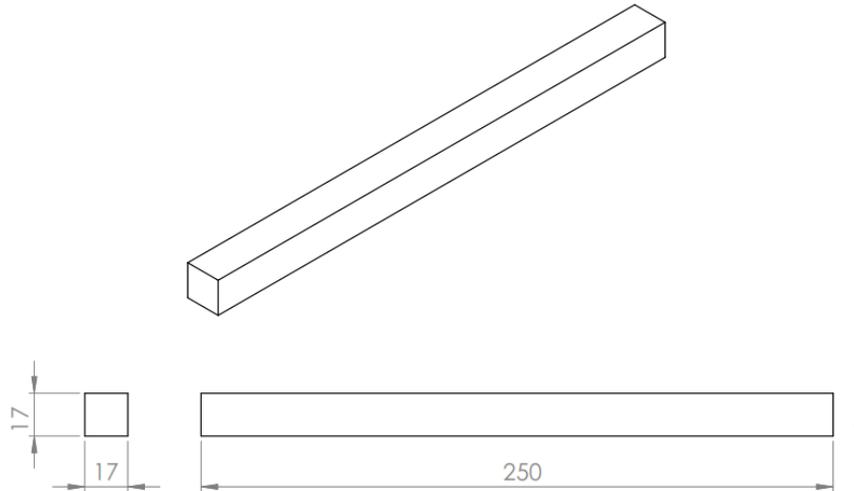
$$\text{Madera de Eucalipto} = 40 \text{ gr}$$

#### **4.3.3. Tiempo de enfriamiento**

Para determinar el tiempo de enfriamiento que requiere la probeta dentro del calibrador se ha realizado el cálculo mediante la teoría de conducción en estado transitorio. A continuación, se detalla el ejemplo de cálculos:

- **PROBETAS DE 100% PLÁSTICO**

Las dimensiones de la probeta se detallan en la figura 47 teniendo un ancho de 17 mm y un alto de 17 mm.



**Figura 47** Dimensiones de la Probeta

- Cálculo del diámetro hidráulico de la probeta:

$$\text{Área de la sección} = 0.017m * 0.017m = 2.89 \times 10^{-4} m^2$$

$$\text{Perímetro de la sección} = 2(0.017m) + 2(0.017m) = 0.068m$$

$$\text{Diámetro Hidráulico} = \frac{4(\text{Área de la Sección})}{\text{Perímetro de la sección}}$$

$$\text{Diámetro Hidráulico (DH)} = 0.017 m$$

- Cálculo del número de Nusselts:

En un tubo caracterizado por un flujo de calor superficial uniforme y condiciones laminares completamente desarrolladas el número de Nusselts es una constante independiente del número de Reynolds y el número de Prandtl.

$$Nu = \frac{48}{11} = 4.364$$

- Cálculo del coeficiente convectivo del polietileno:

$$h_{HDPE} = \frac{Nu * K_{HDPE}}{DH_{HDPE}}$$

El coeficiente conductivo del polietileno de alta densidad es:

$$K_{HDPE} = 0.50 \frac{Watt}{m \text{ } ^\circ K}$$

$$h_{HDPE} = \frac{48}{11} * \frac{0.50 \frac{Watt}{m \text{ } ^\circ K}}{0.017 m}$$

$$h_{HDPE} = 128.342 \frac{Watt}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

- Cálculo del número de Biot:

$$Bi = \frac{h_{HDPE} * Lc}{K_{HDPE}}$$

La longitud crítica de la probeta es  $Lc = \frac{0.017}{2} m = 8.5 \times 10^{-3} m$

$$Biot = \frac{128.342 \frac{Watt}{m^2 \text{ } ^\circ K} * (8.5 \times 10^{-3}) m}{0.50 \frac{Watt}{m \text{ } ^\circ K}} \quad Biot = 2.182$$

Al ser el valor del número de Biot mayor a 0.1 descartamos la posibilidad de realizar el cálculo por medio del método de Resistencia Interna Despreciable. Para el cálculo del tiempo adimensional utilizamos las ecuaciones para soluciones aproximadas.

Los valores de  $\lambda_1$  y  $A_1$  se obtienen mediante interpolación de la tabla 19 del libro de transferencia de calor y masa, Yunus Cengel. (Cengel, 2011)

$$\lambda_1 = 1.1842564011$$

$$A_1 = 1.097919548$$

- Cálculo de variación de Temperatura:

$$\theta = \frac{T_o - T_m}{T_i - T_m}$$

Donde:

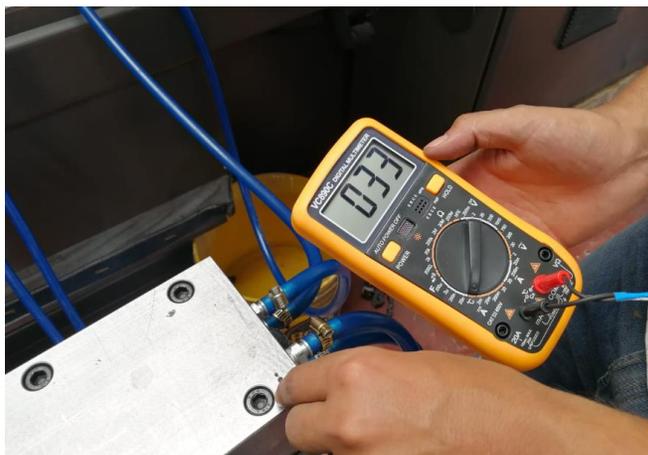
$T_o$ : *Temperatura final del HDPE*

$T_m$ : *Temperatura del Medio de enfriamiento*

$T_i$ : *Temperatura inicial del HDPE*

Para determinar los valores de temperatura inicial, final y del medio del proceso de extrusión utilizamos un multímetro VC890C DIGITAL MULTIMETER, mediante el uso de la función de medición de temperatura y una termocupla tipo J medimos estas variables como se detalla en la figura 48 y 49.

$$\theta = \frac{48 - 33}{150 - 33} = 0.128$$



**Figura 48** Medición Temperatura del Calibrador



**Figura 49** Medición Temperatura final del material

Los materiales compuestos WPC dependiendo de sus componentes han sido evaluados y caracterizados a partir de normas que tienen relación a polímeros o maderas como son la ASTM D790 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials). Los valores de las temperaturas medidas se detallan en la tabla 39.

**Tabla 39***Temperaturas Medidas en Proceso de Endurecimiento*

<b>Temperatura medidas</b>	
<b>Temperatura Inicial del Material</b>	150 °C
<b>Temperatura del Calibrador</b>	33 °C
<b>Temperatura Final del Material</b>	48 °C

- Cálculo de la difusividad térmica del Material:

$$\alpha = \frac{K_{HDPE}}{\rho_{HDPE} * Cp_{HDPE}}$$

Los valores de la densidad del polietileno y su capacidad calórica son:

$$\rho_{HDPE} = 950 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Cp_{HDPE} = 1900 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}$$

$$\alpha = \frac{K_{HDPE}}{\rho_{HDPE} * Cp_{HDPE}} = 2.77 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

- Cálculo del número de Fourier

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{\theta}{A_1}\right)}{-(\lambda_1^2)}$$

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{0.128}{1.097919548}\right)}{-(1.1842564011^2)}$$

$$\tau = 1.531$$

- Cálculo del Tiempo de enfriamiento del elemento:

$$t = \frac{Lc^2 * \tau}{\alpha} t = \frac{(8.5 \times 10^{-3}m)^2 * 1.531}{2.77 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}} t = 6.656 \text{ min} = 6 \text{ min } 39 \text{ seg}$$

Para el cálculo del enfriamiento de las probetas de material compuesto se sigue el mismo procedimiento realizado anteriormente, con la variante de que se debe calcular la densidad del material compuesto y el coeficiente de conductividad térmica a partir de la ley de mezclas para materiales compuestos.

- **Cálculo de Densidad del material compuesto.**

Se realiza un ejemplo de cálculo para una probeta de composición 5% Eucalipto – 95% Plástico, el cálculo se realiza de acuerdo a la ecuación 6.

***Ecuación 6 Densidad de un material compuesto***

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Donde:

- $\rho_c$ : densidad del material compuesto
- $\rho_f$ : densidad de las fibras
- $\rho_m$ : densidad de la matriz
- $V_f$ : Fracción volumétrica de las fibras
- $V_m$ : Fracción volumétrica de la matriz

La densidad de la madera de eucalipto esta entre:

$$\rho_{madera} = \{0.45 - 0.55\} \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

La densidad del polietileno de alta densidad esta entre:

$$\rho_{HDPE} = \{0.941 - 0.954\} \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

Para el cálculo de la fracción volumétrica utilizamos la ecuación:

$$V_f = \frac{\rho_m * W_f}{\rho_f * W_m + \rho_m * W_f}$$

$$V_m = \frac{\rho_f * W_m}{\rho_f * W_m + \rho_m * W_f}$$

Donde:

- $W_m$ : peso del elemento matriz
- $W_f$ : Peso de las fibra

$$W_{madera} = 40 \text{ g} * 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 100 \frac{cm}{m} = 39200 \left[ \frac{g * cm}{s^2} \right]$$

$$W_{HDPE} = 760 \text{ g} * 9.8 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * 100 \frac{cm}{m} = 744800 \left[ \frac{g * cm}{s^2} \right]$$

$$V_f: \quad V_{madera} = \frac{(0.941 * 39200)}{(0.45 * 744800) + (0.941 * 39200)} = 0.0991466$$

$$V_m: \quad V_{HDPE} = \frac{(0.45 * 744800)}{(0.45 * 744800) + (0.941 * 39200)} = 0.90085344$$

$$\rho_{c-5\%} = \left\{ 0.45 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] * 0.0991466 \right\} + \left\{ 0.941 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] * 0.90085344 \right\}$$

$$\rho_{c5\%} = 0.892319057 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

- **Cálculo de la conductividad térmica del material compuesto.**

Para el cálculo de la conductividad térmica del material utilizamos la ecuación:

$$K_c = K_f V_f + K_m V_m$$

Donde:

- $K_c$ : Conductividad térmica del material compuesto
- $K_f$ : Conductividad térmica de las fibras
- $K_m$ : Conductividad térmica de la matriz

El coeficiente de conductividad de la madera se lo obtiene de la tabla 40 a partir de su densidad.

**Tabla 40**

*Propiedades Térmicas de la Madera de acuerdo a su densidad*

Material	$\rho$ $\frac{Kg}{m^3}$	$K$ $\frac{Watt}{m \text{ } ^\circ K}$	$Cp$ $\frac{J}{Kg \text{ } ^\circ K}$
<b>Froncosa</b>			
<b>Froncosa, muy pesada</b>	$\rho > 780$	0,29	50
<b>Froncosa pesada</b>	$750 < \rho \leq 870$	0,23	50
<b>Froncosa de peso medio</b>	$565 < \rho \leq 750$	0,18	50
<b>Froncosa ligera</b>	$435 < \rho \leq 565$	0,15	50
<b>Froncosa muy ligera</b>	$200 < \rho \leq 435$	0,13	50
<b>Conífera</b>			
<b>Conífera muy pesada</b>	$\rho > 610$	0,23	20
<b>Conífera Pesada</b>	$520 < \rho \leq 610$	0,18	20
<b>Conífera de peso medio</b>	$435 < \rho \leq 520$	0,15	20
<b>Conífera Ligera</b>	$\rho \leq 435$	0,13	20
<b>Balsa</b>	$\rho \leq 200$	0,057	20
<b><math>K</math></b>	Conductividad térmica		
<b><math>Cp</math></b>	Calor específico		

Fuente: (Arriaga, Herrero, & Íñiguez, 2010)

$$K_m: \quad K_{HDPE} = 0.50 \left[ \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

$$K_f: \quad K_{Madera} = 0.15 \left[ \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

$$K_{c5\%} = (0.15 * 0.0991466) + (0.50 * 0.90085344) = 0.465 \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K}$$

- **Cálculo de la capacidad calórica del material utilizamos la ecuación:**

$$Cp_c = Cp_{HDPE} * V_{HDPE} + Cp_{madera} * V_{madera}$$

Donde:

- $Cp_c$ : Capacidad cal del material compuesto
- $Cp_f$ : Capacidad calórica de las fibras
- $Cp_m$ : Capacidad calórica de la madera

$$Cp_m: \quad Cp_{HDPE} = 1900 \left[ \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]$$

De acuerdo a tabla 40 la capacidad calórica de la madera es:

$$Cp_f: \quad Cp_{madera} = 50 \left[ \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]$$

$$Cp_c = (1900 * 0.90085344) + (50 * 0.0991466)$$

$$Cp_{c5\%} = 1716.578 \left[ \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]$$

$$h_{HDPE} = \frac{Nu * K_{HDPE}}{DH_{HDPE}}$$

$$h_{HDPE} = \frac{48}{11} * \frac{0.465 \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K}}{0.017 m}$$

$$h_{HDPE} = 119.358 \frac{Watt}{m^2 \cdot ^\circ K}$$

$$Biot = \frac{119.358 \frac{Watt}{m^2 \cdot ^\circ K} * (8.5 \times 10^{-3}) m}{0.465 \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K}}$$

$$Biot = 2.182$$

$$\lambda_1 = 1.1842564011$$

$$A_1 = 1.097919548$$

$$\theta = \frac{50 - 36}{135 - 36} = 0.141$$

$$\alpha = \frac{K_{c_{5\%}}}{\rho_{c_{5\%}} * Cp_{c_{5\%}}}$$

$$\alpha = \frac{0.465 \frac{Watt}{m \cdot ^\circ K}}{0.892319057 \left[ \frac{g}{cm^3} \right] * \frac{1Kg}{1000g} * \frac{100^3 cm^3}{m^3} * 1716.578 \left[ \frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]}$$

$$\alpha = 3.264 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

- Cálculo del número de Fourier

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{\theta}{A_1}\right)}{-(\lambda_1^2)}$$

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{0.141}{1.097919548}\right)}{-(1.1842564011^2)}$$

$$\tau = 1.461$$

- Cálculo del Tiempo de enfriamiento del elemento:

$$t = \frac{Lc^2 * \tau}{\alpha}$$

$$t = \frac{(8.5 \times 10^{-3}m)^2 * 1.461}{3.264 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}}$$

$$t = 6.072 \text{ min} = 6 \text{ min } 4 \text{ seg}$$

A continuación, se presentan los valores del tiempo de enfriamiento en la tabla 41 para las probetas de 100% plástico, 5% Madera – 95% plástico, 10% Madera – 90% plástico, 15% Madera – 85% plástico.

**Tabla 41**

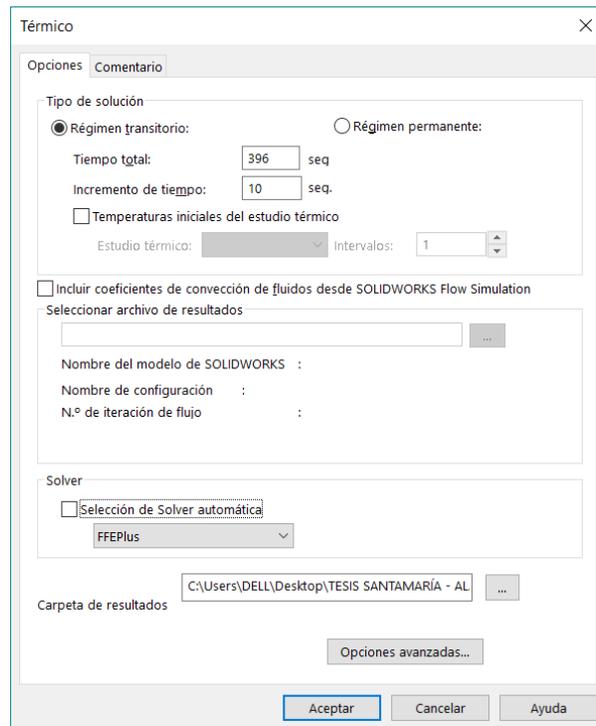
*Valores de Tiempo de Enfriamiento de Probetas*

<b>Probeta</b>	<b>Tiempo de enfriamiento</b>
100% plástico	6 min 39 seg
5% Madera – 95% plástico	6 min 04 seg
10% Madera – 90% plástico	5 min 35 seg
15% Madera – 85% plástico	5 min 08 seg

#### **4.3.4. Simulación del Proceso de Enfriamiento por medio de conducción en régimen transitorio.**

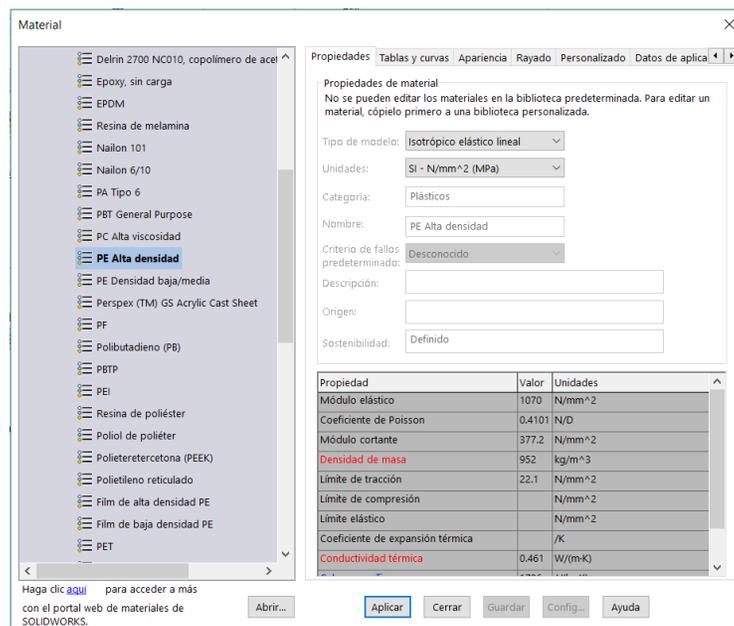
Se utilizó un software CAD para realizar la simulación del endurecimiento de la probeta de plástico. Primero se realizó el dibujo CAD con las dimensiones de la probeta como se muestra en la figura 49.

En el software de simulación se realiza un análisis térmico en donde inicialmente se debe definir que se realizará una simulación de transferencia de calor en régimen transitorio con un tiempo de enfriamiento definido en la tabla 41 como se detalla en la figura 50.



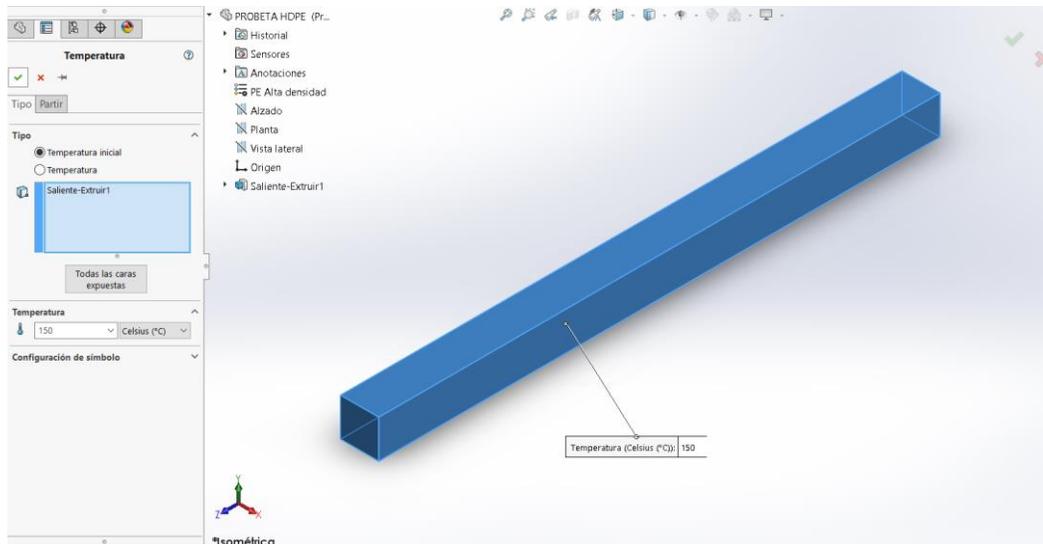
**Figura 50** Selección de régimen transitorio en software CAD

El siguiente paso por definir es el tipo de material de la probeta por lo cual se selecciona en el software el PE de alta densidad, como se muestra en la figura 51.



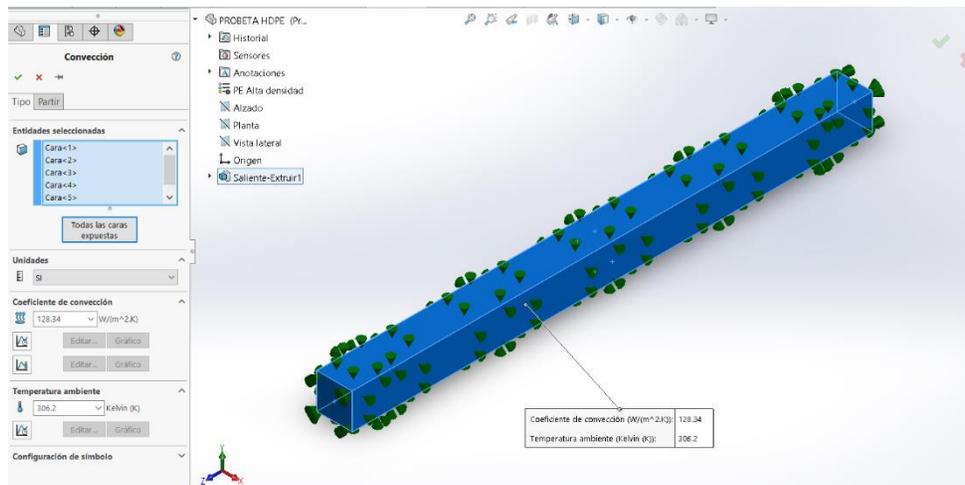
**Figura 51** Selección de Material en Software CAD

Una vez realizado este procedimiento se le indica al software las cargas térmicas a las cuales se encuentra inicialmente el material y a las condiciones a las cuales será sometido el material, como se detalla en la figura 52.



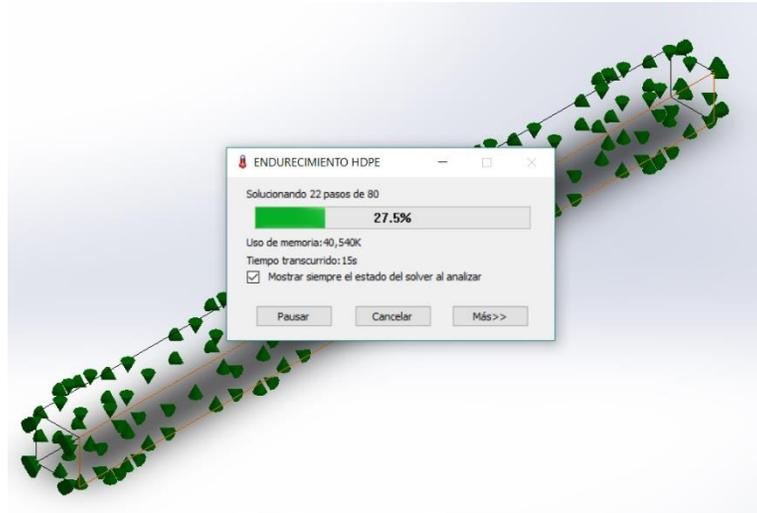
**Figura 52** Temperatura Inicial del Material

El siguiente paso es definir el coeficiente de convección del material y la temperatura del medio a la que será sometido en el proceso de endurecimiento como se detalla en la figura 53.



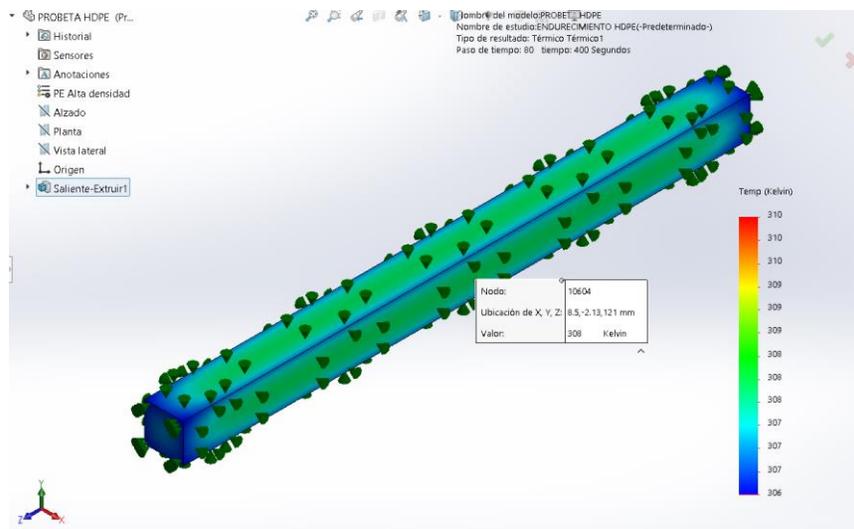
**Figura 53** Coeficiente de convección y temperatura del medio

Se realiza la ejecución de resultados para poder analizar el proceso de endurecimiento como se detalla en la figura 54.



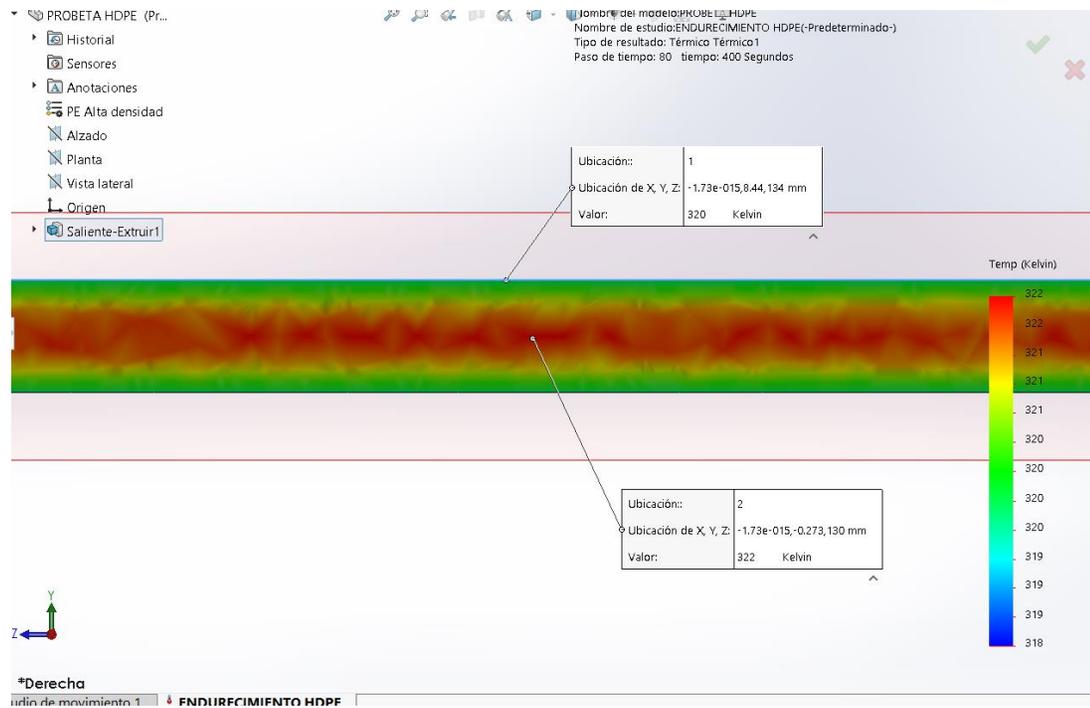
**Figura 54** Ejecución de Análisis

Una vez que ha finalizado la ejecución de resultados podemos observar por medio de colores y sus equivalencias cuanto ha sido enfriado el material como se observa en la figura 55.



**Figura 55** Resultados Visuales del Análisis Térmico

Se puede observar que la temperatura en las paredes del material se encuentra a 320 grados Kelvin es decir a 47 grados Celsius y las aristas a una temperatura de 46 grados Celsius. De esta manera se puede verificar que el material se ha enfriado, sin embargo, es importante observar la temperatura del núcleo del material por lo que se realiza un corte en el plano lateral como se muestra en la figura 56.



**Figura 56** Corte del plano Lateral de Resultados

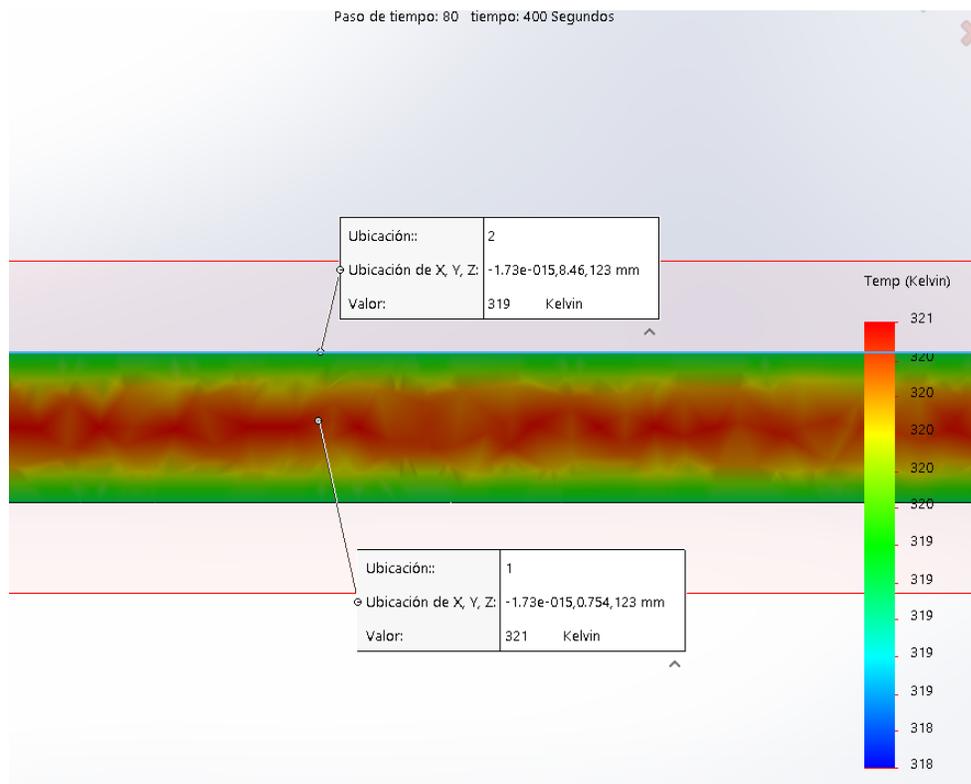
Como se puede observar a pesar de que las paredes del material ya han sido endurecidas el núcleo del material aún se mantiene a una temperatura mayor que las paredes con un valor de 322 grados Kelvin es decir a 49 grados Celsius, sin embargo, a esa temperatura el polietileno ya se encuentra endurecido por lo que no existe afectación en el conformado del material.

Para la simulación de las probetas de material compuesto se sigue el mismo procedimiento anterior únicamente realizando cambios en las propiedades del material compuesto como son su conductividad térmica, su densidad y su capacidad clórica.

Los resultados de simulación para los materiales compuestos se detallan a continuación:

- 5 % Madera -95% Plástico

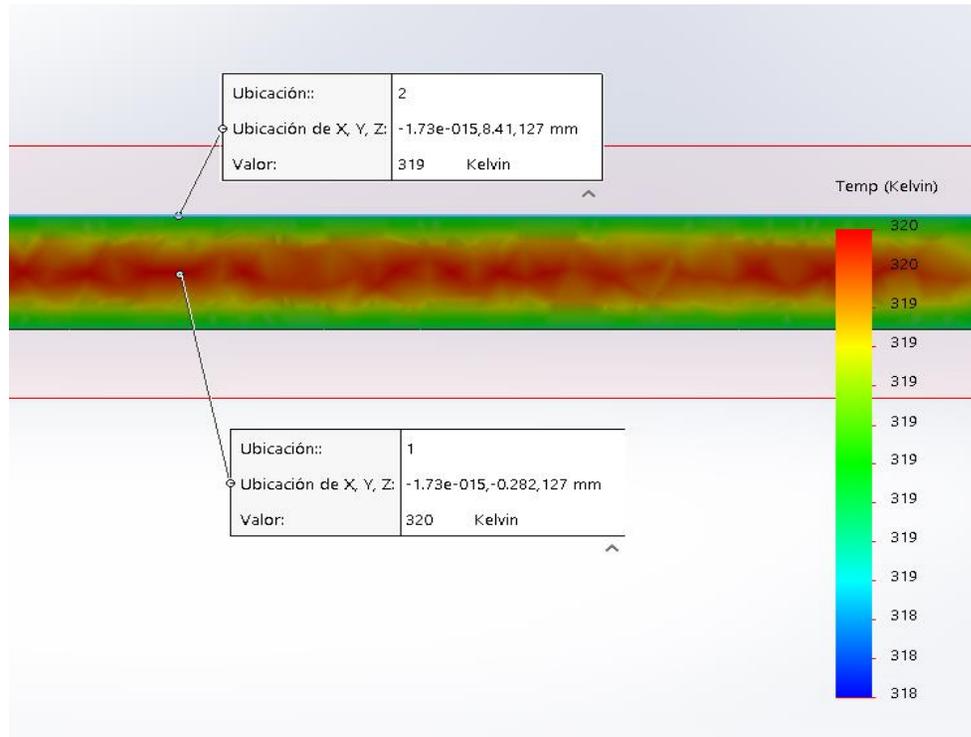
En la figura 58 se puede observar que las temperaturas con respecto a una probeta de 100% plástico mostrado en la figura 57. Son menor, pero sin mucha variación en sus valores.



**Figura 57** Corte del plano Lateral de Resultados 5% Madera - 95% Plástico

- 10 % Madera -90% Plástico

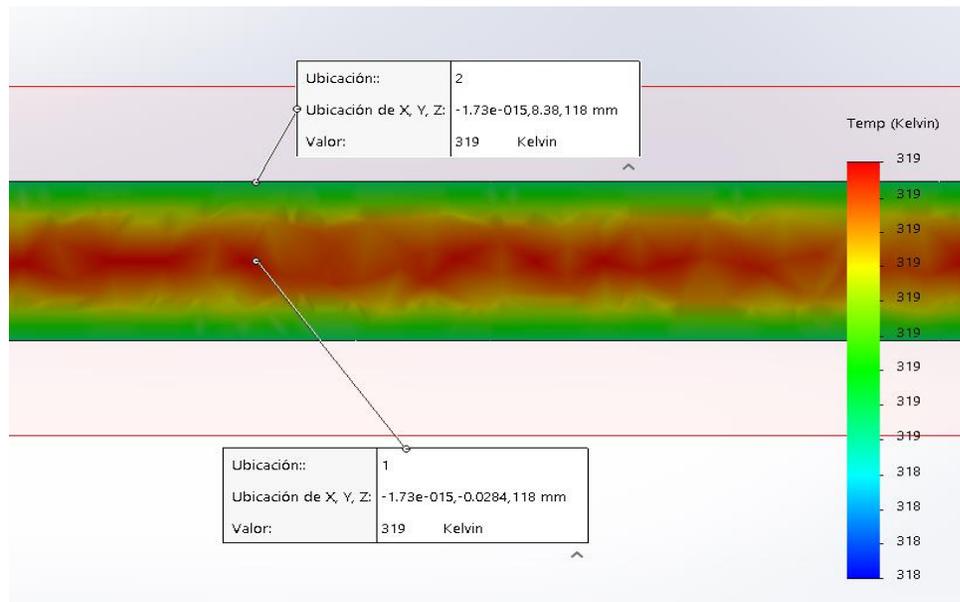
En la figura 58 se puede observar que las temperaturas disminuyen conforme aumenta el porcentaje de madera en el compuesto.



**Figura 58** Corte del plano Lateral de Resultados 10% Madera - 90% Plástico

- 15 % Madera -85% Plástico

En la figura 59 Se puede observar que las temperaturas continúan disminuyendo conforme aumenta la cantidad de madera a tal punto de que la temperatura del núcleo y la de las paredes es igual.



**Figura 59** Corte del plano Lateral de Resultados 15% Madera - 85% Plástico

#### 4.3.5. Fabricación de probetas

Como se ha detallado anteriormente se realizó un proceso experimental y práctico para poder obtener las probetas con mejores condiciones de resistencia y forma geométrica.

En primer lugar, se enciende las bandas calefactoras de la extrusora hasta que lleguen a una temperatura de  $140^{\circ}\text{C}$  con el fin de que el material residual de polietileno en el tornillo helicoidal se ablande y así el tornillo pueda girar libremente sin posibles daños. Finalizado el calentamiento inicial colocamos el material en la tolva y se enciende el sistema de recirculación de agua, posteriormente se procede a extruir a una velocidad máxima con el fin de que todo el material que ingresa al calibrador tenga un enfriamiento uniforme.

Para verificar que existe flujo continuo del material desde el cañón de extrusión hacia el calibrador se introduce una varilla en el canal de extrusión del calibrador verificando visualmente el movimiento de la varilla debido al empuje del material extruido, en el caso

de que se detenga el movimiento de la varilla se debe detener el proceso y verificar la causa ya que la presión producida por la extrusión puede generar daños a la máquina.

Cuando el material haya llegado hasta la salida del canal de extrusión del calibrador se detiene el motor de la extrusora y se permite que el calibrador enfríe a las probetas WPC durante el tiempo calculado anteriormente.

Finalizado el tiempo de enfriamiento se enciende nuevamente el motor de la extrusora y se obtiene las probetas como se observa en las figuras 60-63

- Probetas 100 % Plástico



**Figura 60** Fotografía de Probetas de 100% Plástico

- Probetas 5 % Madera - 95% Plástico



**Figura 61** Fotografía de Probetas 5% Madera - 95% Plástico

- Probetas 10 % Madera - 90% Plástico



**Figura 62** Fotografía de probetas 10% Madera - 90% Plástico

- Probetas 15 % Madera -85% Plástico



**Figura 63** Fotografía de Probetas 15% Madera - 85% Plástico

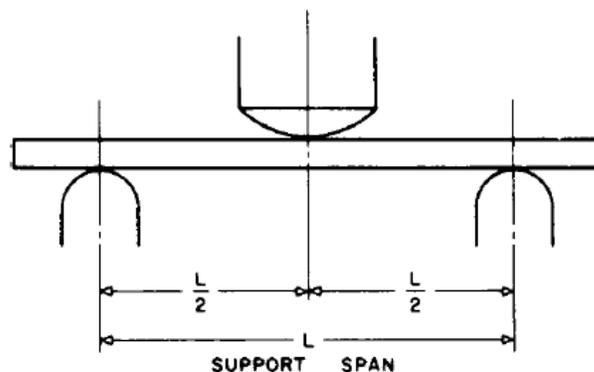
## CAPÍTULO V

### CARACTERIZACIÓN A FLEXIÓN

La resistencia a la flexión de los materiales es la capacidad de soportar cargas ejercidas en el sentido perpendicular en su eje longitudinal antes de que el material falle dado que se presentan tensiones inducidas por la combinación de los esfuerzos de tracción, compresión y cizalla lo que genera que el material ensayado se agriete o se rompa.

En el ensayo a flexión los resultados son la carga aplicada gradualmente en el tiempo y el desplazamiento en sentido vertical de la probeta ensayada y estos valores nos dan el esfuerzo máximo de la fibra y la deformación máxima que se da en la superficie de la probeta, para el caso de los plásticos en su mayoría no llegan a romperse y se presenta la resistencia de fluencia de la flexión que es un sinónimo del módulo de rotura.

El ensayo a flexión más utilizado es en el cual se trabaja con tres puntos de carga los cuales dos son de soporte de la probeta ensayada y uno es la aplicación de carga mediante un punzón que por lo general se lo posiciona entre la mitad de los dos soportes.



**Figura 64** Esquema de ensayo a flexión

Fuente: (ASTM-D790, 2003)

Para el caso analizado en el presente trabajo se analizará el ensayo a flexión con la referencia de la norma ASTM D-790 (Standard Test Methods for Flexural for Unreinforced and Plastics and Electrical Insulating Materials) la cual indica los procedimientos y cálculos necesarios.

Dentro de la norma se tiene dos tipos de procedimientos para el análisis a flexión el cual nos indica.

- Procedimiento A: Para materiales que se rompen a pequeñas deflexiones.
- Procedimiento B: Para materiales que tiene grandes deflexiones.

Para el caso del presente proyecto se utilizará el procedimiento B por lo que se tiene una deflexión considerable.

### 5.1. Equipos de ensayo

Para el análisis a flexión de las probetas WPC se utilizó la máquina de ensayos universales MTS que se encuentra en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el Laboratorio de Mecánica de Materiales que tiene las características establecidas en la tabla 42.

**Tabla 42**

*Características de Máquina de Ensayos Universal*

<b>Máquina de Ensayos universal</b>			
<b>Ciclos</b>	60 [Hz]	<b>Peso</b>	300 [Kg]
<b>Capacidad Max</b>	5000 [N]	<b>Velocidad Max Motor</b>	20 [p/g/min]
<b>Marca</b>	MTS	<b>Modelo</b>	T 5002
<b>Voltaje</b>	110/220 [V]	<b>Fases</b>	1



**Figura 65** Máquina de Ensayos Universales MTS

La máquina de ensayos universales tiene varios acoples entre los cuales tiene el acople de tres puntos de presión los cuales son los dos de soporte y el punzón los cuales se utilizó en el ensayo de flexión.



**Figura 66** Soporte de Máquina de Ensayos Universales

Según las especificaciones de la norma nos indica que los soportes para realizar el ensayo deben tener superficies de contacto cilíndricas y cuyo radio mínimo para los soportes es de 3,2

[mm] y su radio máximo depende del espesor de la probeta que se va a ensayar dando la relación que debe ser máximo 1,6 veces su espesor, en nuestro caso el espesor es de 17 [mm] lo cual nos da un radio máximo de 27,2 [mm].

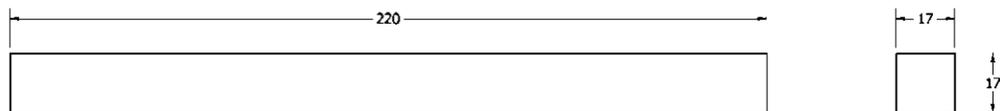
Para el punzón nos indica que debe tener un radio mínimo de 3,2 [mm] y su radio máximo tiene la relación de 4 veces su espesor el cual nos daría 68 [mm] de radio máximo.

El acople con el cual cuenta la máquina de ensayos universales tiene de medida de radio para los soportes y el punzón de 9,49 [mm] lo cual está dentro de los parámetros establecidos en la norma para las dimensiones de soporte y punzón.

En el caso de la distancia entre apoyos será de 180 [mm] y el largo de las probetas es de 220 [mm] con el cual se cumple lo establecido en la norma que menciona que la probeta deberá tener un largo suficiente para sobresalir en cada extremo por lo menos un 10% de la longitud entre apoyos.

## 5.2.Probetas de Ensayo

Las probetas para el ensayo a flexión son de forma rectangular con las dimensiones especificadas en la figura 67.



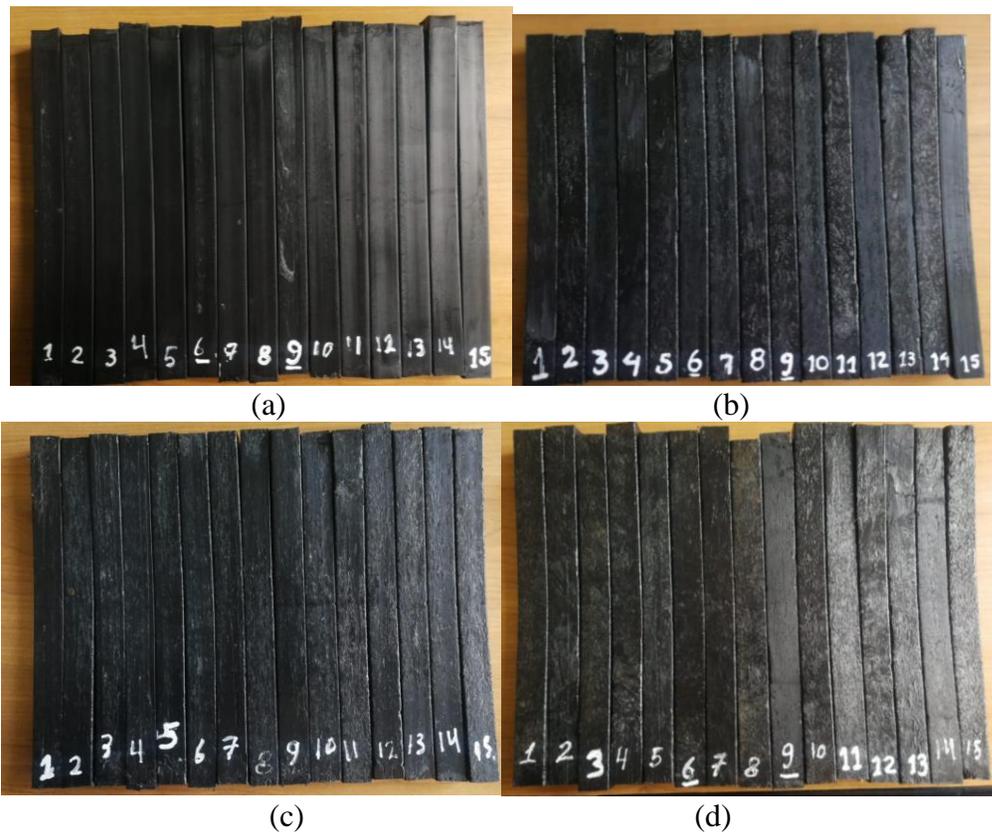
**Figura 67** Dimensiones Probetas para Ensayo

El ancho de la probeta es de 17 [mm] el cual cumple con el requisito de la norma que establece que el ancho no debe exceder en un cuarto a la distancia entre soportes.

Las probetas para el ensayo se clasificaron en:

- 100% Plástico
- 95% Plástico – 5% Madera
- 90% Plástico – 10% Madera
- 85% Plástico – 15% Madera

Se muestra en la figura 68 La numeración y clasificación de las probetas a ensayar.



**Figura 68** Probetas de acuerdo a la Proporción de Mezcla (a) Probetas 100% Plástico (b) Probetas 95% Plástico – 5% Madera (c) Probetas 90% plástico – 10% Madera (d) Probetas 85% plástico – 15% Madera

### 5.3. Condiciones de las Probetas

Para el ensayo a flexión las probetas tuvieron un tiempo de 48 horas (2 días) de acondicionamiento al ambiente luego de su extrusión para verificar que no se haya dado contracciones o pandeos y de la misma manera tuvieron un tiempo de acondicionamiento en el Laboratorio de Mecánica de Materias de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de 48 horas (2 días) en condiciones atmosféricas estándar las cuales establece la norma con una temperatura de  $23 \pm 2$  °C y porcentaje de humedad relativa del  $50 \pm 5$  %.

Todas las probetas de sus diferentes porcentajes de composición fueron ensayadas en las mismas condiciones atmosféricas establecidas en la norma ASTM D-790.

### 5.4. Procedimiento de ensayo

Se realiza la calibración de la celda de carga de la máquina de ensayos universales para evitar errores en los datos generados.

Se debe establecer la velocidad del brazo de móvil de la maquina universal de ensayos para todas las probetas ensayadas según la ecuación establecida en la norma.

#### *Ecuación 7 Velocidad del brazo móvil*

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Donde:

- R: Velocidad del brazo móvil [mm/min]
- L: Longitud entre soporte [mm]
- d: Espesor de la probeta [mm]

- Z: Tasa de deformación en la fibra externa [mm/mm/min]

(En el procedimiento B de la norma se establece  $Z=0,10$  [mm/mm/min])

$$R = \frac{0,10 \times 180^2}{6 \times 17}$$

$$R = 31,76 \left[ \frac{mm}{min} \right]$$

Para todos los ensayos se debe mantener una velocidad constante en el brazo móvil de la máquina, se debe establecer una frecuencia al motor para que la velocidad sea semejante a la calcula.

La frecuencia calculada es de 300 [Hz] y con una tolerancia que establece la norma del  $\pm 10\%$  de la frecuencia establecida la cual sería  $\pm 30$  [Hz].

Se adapta el acople de la máquina de la figura 69 para el ensayo a flexión con una separación de 180 [mm] y el punzón al brazo móvil como se muestra en la figura 72.



**Figura 69** Acople de la Máquina MTS para ensayos a flexión

Se marca en las probetas a ensayar en la mitad de su largo total para posicionarlas sobre los soportes del acople y que el punzón ejerza la fuerza en la mitad de la probeta como se observa en la figura 70.



*Figura 70 Probeta marcada en la Mitad.*

La norma establece un valor de deformación máxima a la cual el ensayo se debe terminar cuando alcance el 5% lo que equivale a 0.05 mm/mm o si la probeta falla antes de la deformación máxima que se calcula con la expresión establecida en la norma.

*Ecuación 8 Deflexión producida por la deformación máxima*

$$D = \frac{r \times L^2}{6 \times d}$$

Donde:

- D: Deflexión en el centro del tramo de los soportes [mm]
- r: Deformación máxima (Valor de 0.05 [mm/mm])
- d: Espesor de la probeta [mm]
- L: Distancia entre soportes [mm]

$$D = \frac{0,05 \times 180^2}{6 \times 17}$$

$$D = 15,88 [mm]$$

Al realizar los ensayos de flexión se evidenció que a la deflexión que recomienda la norma suspender el ensayo la probeta no fallaba dado que es un valor pequeño, el ensayo se dio por terminado al momento que la fuerza ejercida por el brazo móvil empezaba a descender lo que nos indicaba cual es el valor de carga máxima que soporta la probeta de WPC.

### **5.5.Cálculos realizados**

En el presente trabajo se realiza el cálculo establecido en la norma ASTM D-790 en la cual especifica:

- Esfuerzo de flexión
- Módulo de elasticidad
- Límite de proporcionalidad

#### **5.5.1. Carga aplicada**

En el ensayo a flexión se generó los valores de la fuerza aplicada [N] y el desplazamiento [mm] generado, todos los datos generados en cada uno de los ensayos de las diferentes clasificaciones de probetas se encuentran en el anexo 2 y las gráficas Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de todas las probetas ensayadas se encuentran en el anexo 3.

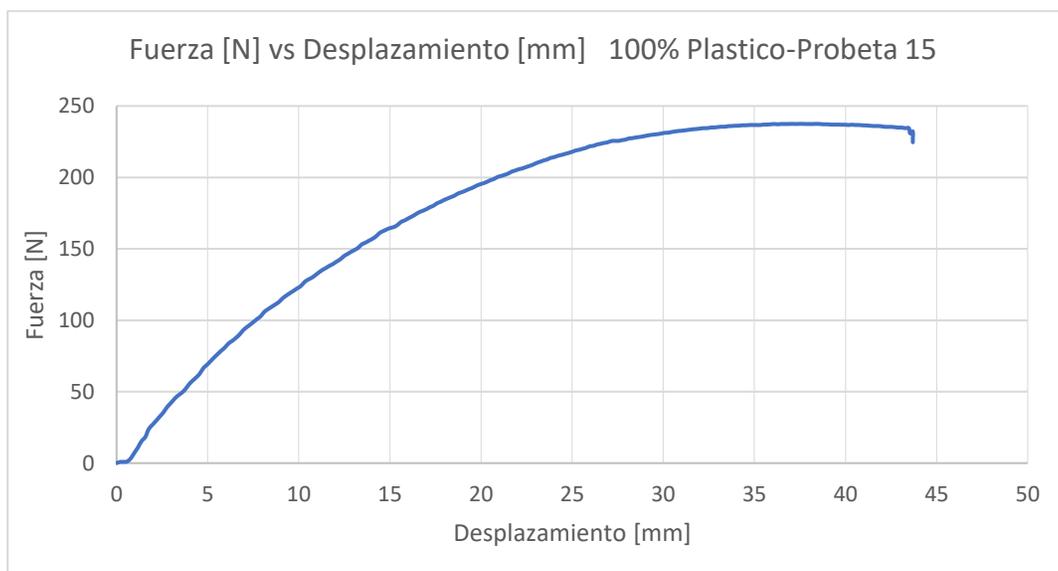
- Carga aplicada en las probetas de 100% plástico

Se establece en la tabla 43 que la probeta 15 es la que soporto la fuerza máxima con un valor de 237,5 [N].

**Tabla 43**  
*Valores de Fuerza Max en Probetas*  
*100% Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Fuerza Max [N]</b>
<b>1</b>	230.5
<b>2</b>	233.1
<b>3</b>	232.6
<b>4</b>	234.2
<b>5</b>	234.2
<b>6</b>	234.3
<b>7</b>	234.2
<b>8</b>	231.9
<b>9</b>	235.5
<b>10</b>	231.3
<b>11</b>	235.5
<b>12</b>	232.3
<b>13</b>	235.6
<b>14</b>	230.2
<b>15</b>	237.5

La grafica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 15 se muestra en la figura 71.



**Figura 71** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico

- Carga aplicada en las probetas de 95% plástico y 5% madera

Se establece en la tabla 44 que la probeta 2 es la que soporto la fuerza máxima con un valor de 299,8 [N].

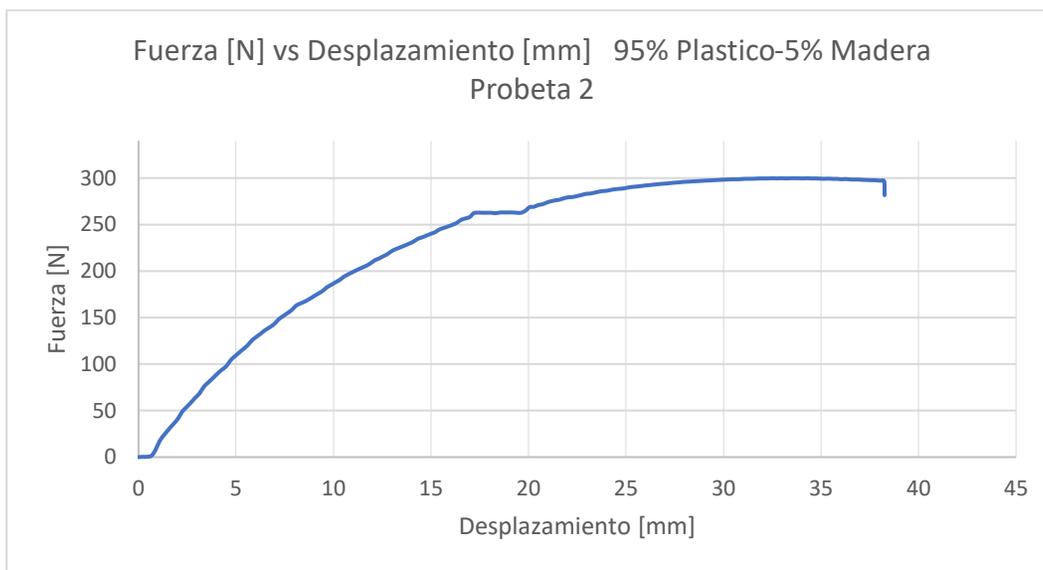
**Tabla 44**

*Valores de Fuerza Max en Probetas 95% plástico y 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Fuerza Max [N]</b>
<b>1</b>	287.8
<b>2</b>	299.8
<b>3</b>	299.6
<b>4</b>	299.5
<b>5</b>	284.2
<b>6</b>	287.2
<b>7</b>	286.8
<b>8</b>	292.5
<b>9</b>	281.2
<b>10</b>	293.8
<b>11</b>	296.5
<b>12</b>	290.5
<b>13</b>	293.5
<b>14</b>	299.3
<b>15</b>	295.5

La grafica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 2 se muestra en la figura

72.



**Figura 72** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Próbete 2: 95% Plástico - 5% Madera

- **Carga aplicada en las probetas de 90% plástico y 10% madera**

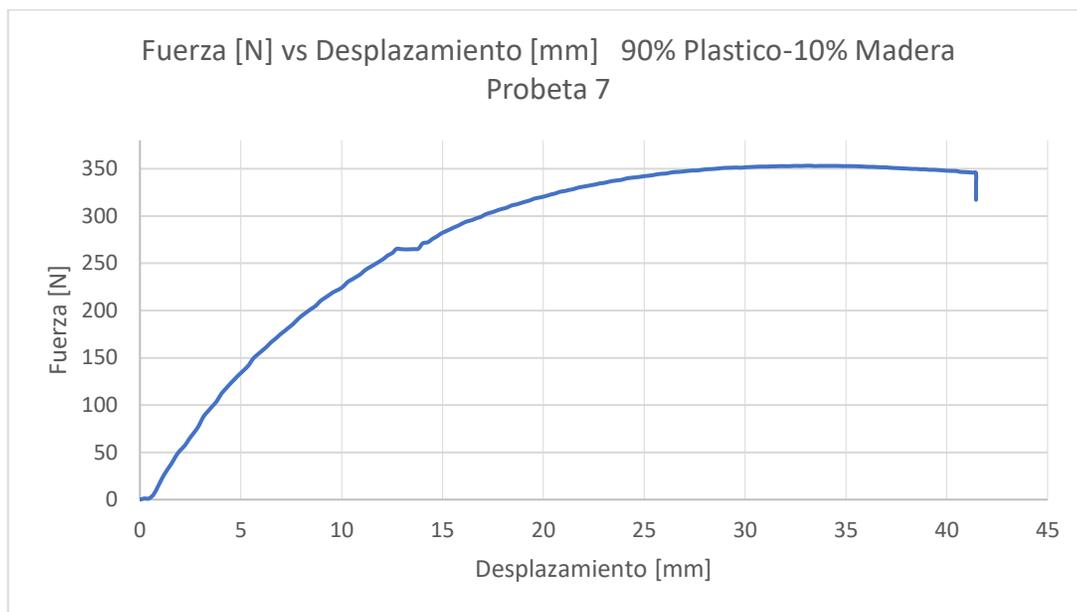
Se establece en la tabla 45 que la probeta 7 es la que soporto la fuerza máxima con un valor de 353,2 [N].

**Tabla 45**

*Valores Fuerza Max en Probetas  
90% Plástico - 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Fuerza Max [N]</b>
<b>1</b>	346.5
<b>2</b>	349.9
<b>3</b>	347.7
<b>4</b>	335.8
<b>5</b>	339.4
<b>6</b>	346.7
<b>7</b>	353.2
<b>8</b>	349.8
<b>9</b>	340.4
<b>10</b>	341.8
<b>11</b>	344.8
<b>12</b>	349.9
<b>13</b>	348.1
<b>14</b>	342.1
<b>15</b>	349.7

La grafica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 7 se muestra en la figura 73.



**Figura 73** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico - 10% Madera

- **Carga aplicada en las probetas de 85% plástico y 15% madera**

Se establece en la tabla 46 que la probeta 11 es la que soporto la fuerza máxima con un valor de 397,1 [N].

**Tabla 46**

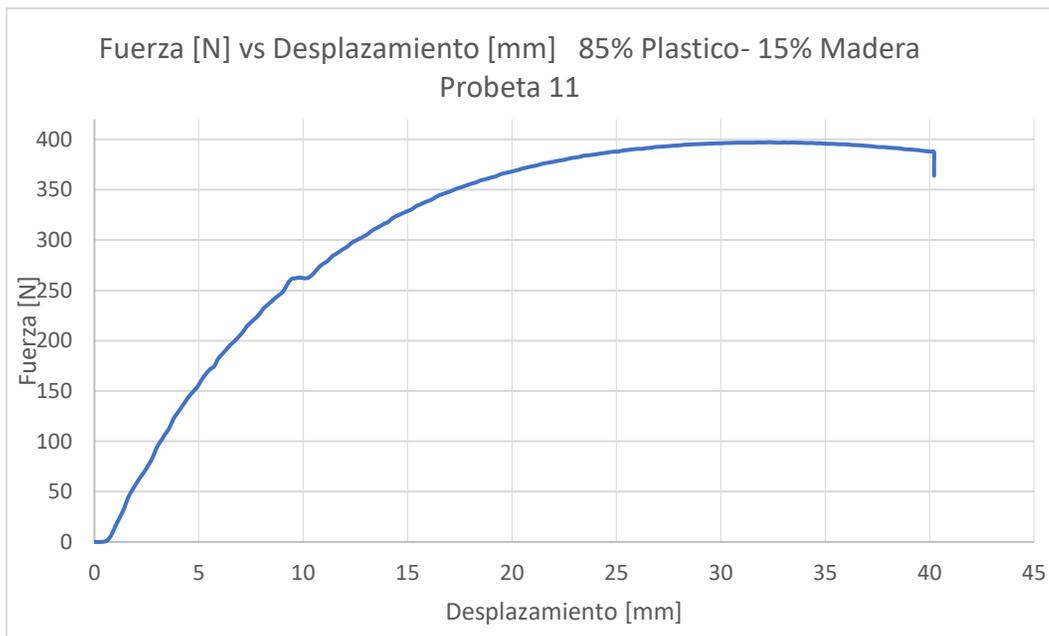
*Valores de Fuerza Max en probetas  
85% Plástico - 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Fuerza Max [N]</b>
<b>1</b>	383.9
<b>2</b>	387.1
<b>3</b>	387.7
<b>4</b>	386.1
<b>5</b>	396.8
<b>6</b>	385.9
<b>7</b>	380.3
<b>8</b>	391.2
<b>9</b>	394.9

**CONTINÚA**

<b>10</b>	395.2
<b>11</b>	397.1
<b>12</b>	384
<b>13</b>	391.5
<b>14</b>	386.2
<b>15</b>	380.6

La grafica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 11 se muestra en la figura 74.



**Figura 74** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 11: 85% Plástico - 15% Madera

### 5.5.2. Esfuerzo de flexión

El esfuerzo de flexión se da por la combinación de las fuerzas de tracción y de compresión que se generan en la sección transversal de un elemento para resistir una fuerza transversal aplicada, y el valor máximo es calculado en la superficie extrema de la probeta ensayada, la norma establece el cálculo mediante la fórmula 7.

***Ecuación 9 Esfuerzo de Flexión***

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

- $\sigma_f$ : Esfuerzo de flexión [MPa]
- P: Carga aplicada [N]
- d: Espesor de la probeta [mm]
- L: Distancia entre apoyos [mm]
- b: Ancho de la probeta [mm]

El esfuerzo de flexión se calculó en cada una de las clasificaciones de las probetas con su valor máximo de carga en el ensayo de flexión mediante la ecuación 9 y con los datos de espesor y ancho de la probeta de 17 [mm] las gráficas de Esfuerzo [Mpa] vs Desplazamiento [mm] de todas las probetas ensayadas se encuentran en el anexo 4

- **Esfuerzo de flexión en las probetas de 100% plástico**

Los valores del esfuerzo máximo de flexión en cada una de las probetas se establecen en la tabla 47.

**Tabla 47**

*Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa]  
para probetas 100%Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	12.67
<b>2</b>	12.81
<b>3</b>	12.78
<b>4</b>	12.87

***CONTINÚA***

<b>5</b>	12.87
<b>6</b>	12.88
<b>7</b>	12.87
<b>8</b>	12.74
<b>9</b>	12.94
<b>10</b>	12.71
<b>11</b>	12.94
<b>12</b>	12.77
<b>13</b>	12.95
<b>14</b>	12.65
<b>15</b>	13.05

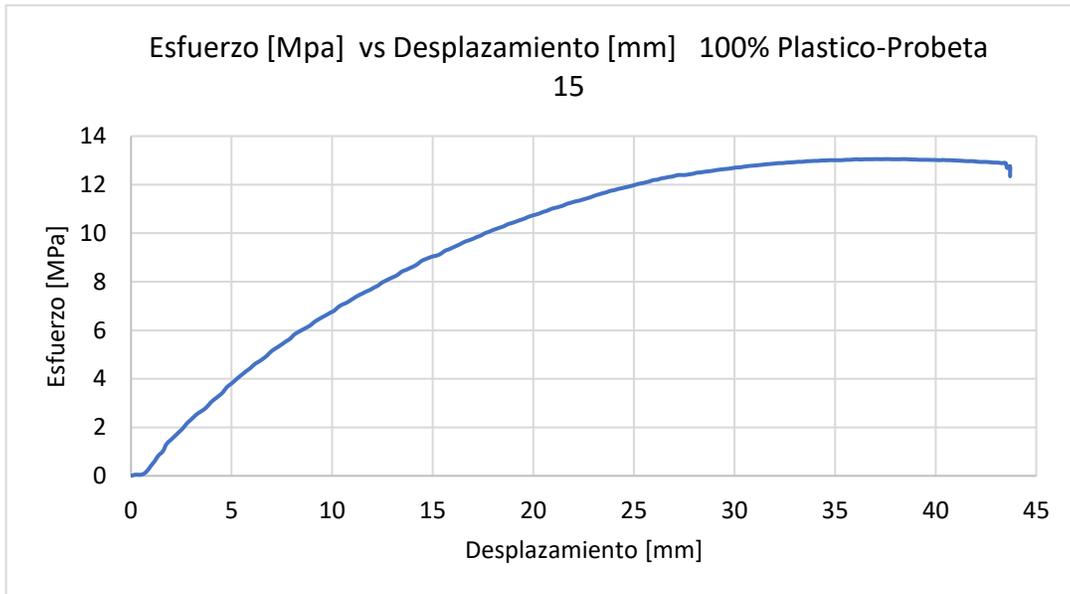
Ejemplo de cálculo:

Esfuerzo máximo para la Probeta 15 la cual soporto el valor más alto de carga de las probetas ensayadas.

$$\sigma_f = \frac{3 \times 237,5 \times 180}{2 \times 17 \times 17^2}$$

$$\sigma_f = 13,05 \text{ [MPa]}$$

La grafica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 15 se muestra en la figura 75.



**Figura 75** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico  
Fuente: Autoría Propia

- **Esfuerzo de flexión en las probetas de 95% plástico y 5% madera**

Los valores del esfuerzo máximo de flexión de las probetas en la tabla 48.

**Tabla 48**

*Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	15.82
<b>2</b>	16.48
<b>3</b>	16.46
<b>4</b>	16.46
<b>5</b>	15.62
<b>6</b>	15.78
<b>7</b>	15.76
<b>8</b>	16.07
<b>9</b>	15.45
<b>10</b>	16.15
<b>11</b>	16.29
<b>12</b>	15.96
<b>13</b>	16.13
<b>14</b>	16.45
<b>15</b>	16.24

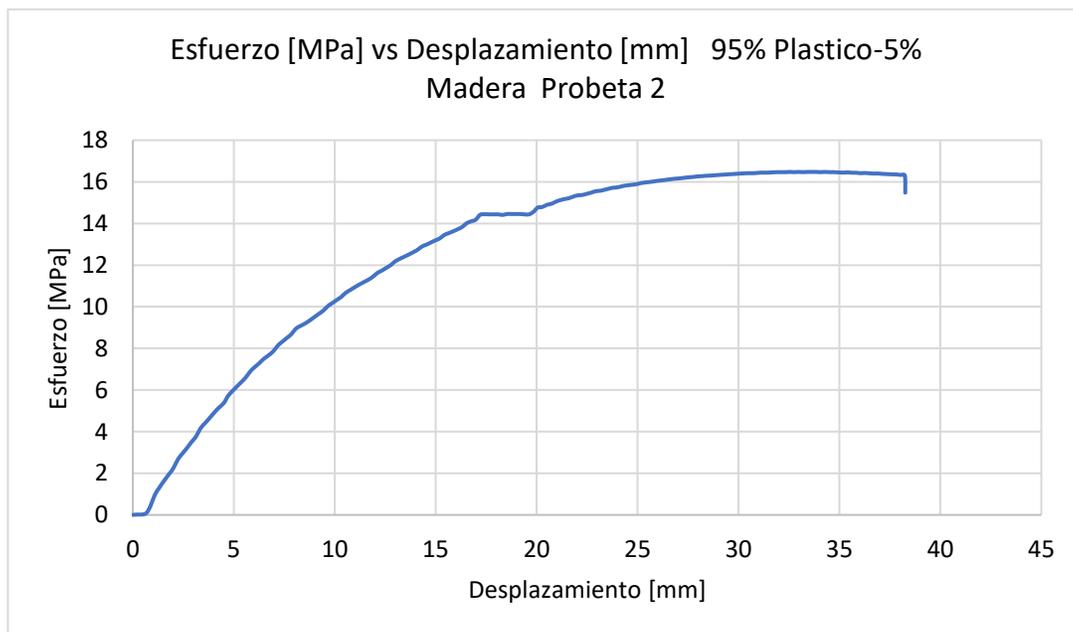
Ejemplo de cálculo:

Esfuerzo máximo para la Probeta 2 la cual soporto el valor más alto de carga de las probetas ensayadas.

$$\sigma_f = \frac{3 \times 299,8 \times 180}{2 \times 17 \times 17^2}$$

$$\sigma_f = 16,48 \text{ [MPa]}$$

La grafica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 2 se muestra en la figura 76.



**Figura 76** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 2: 95% Plástico – 5% Madera

- **Esfuerzo de flexión en las probetas de 90% plástico y 10% madera**

Los valores del esfuerzo máximo de flexión en cada una de las probetas se establecen en la tabla 49.

**Tabla 49**

*Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 90% Plástico – 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	19.04
<b>2</b>	19.11
<b>3</b>	19.11
<b>4</b>	18.45
<b>5</b>	18.65
<b>6</b>	19.05
<b>7</b>	19.41
<b>8</b>	19.22
<b>9</b>	18.71
<b>10</b>	18.78
<b>11</b>	18.95
<b>12</b>	19.23
<b>13</b>	19.13
<b>14</b>	18.80
<b>15</b>	19.22

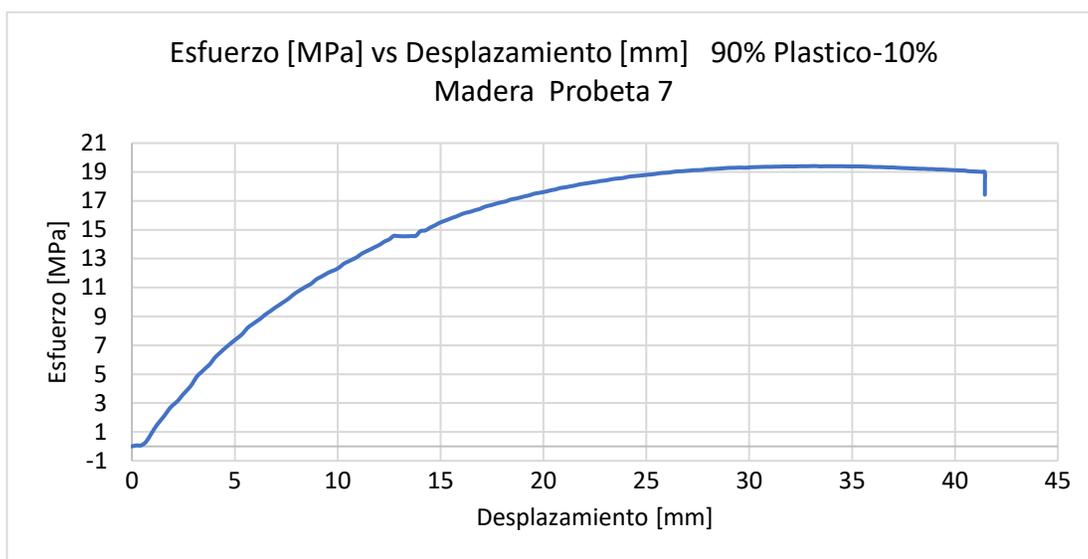
Ejemplo de cálculo:

Esfuerzo máximo para la Probeta 7 la cual soporto el valor más alto de carga de las probetas ensayadas.

$$\sigma_f = \frac{3 \times 353,2 \times 180}{2 \times 17 \times 17^2}$$

$$\sigma_f = 19,41 \text{ [MPa]}$$

La grafica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 7 se muestra en la figura 77.



**Figura 77** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera

- **Esfuerzo de flexión en las probetas de 85% plástico y 15% madera**

Los valores del esfuerzo máximo de flexión en cada una de las probetas se establecen en la tabla 50.

**Tabla 50**

*Valores de Esfuerzo de Flexión [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera*

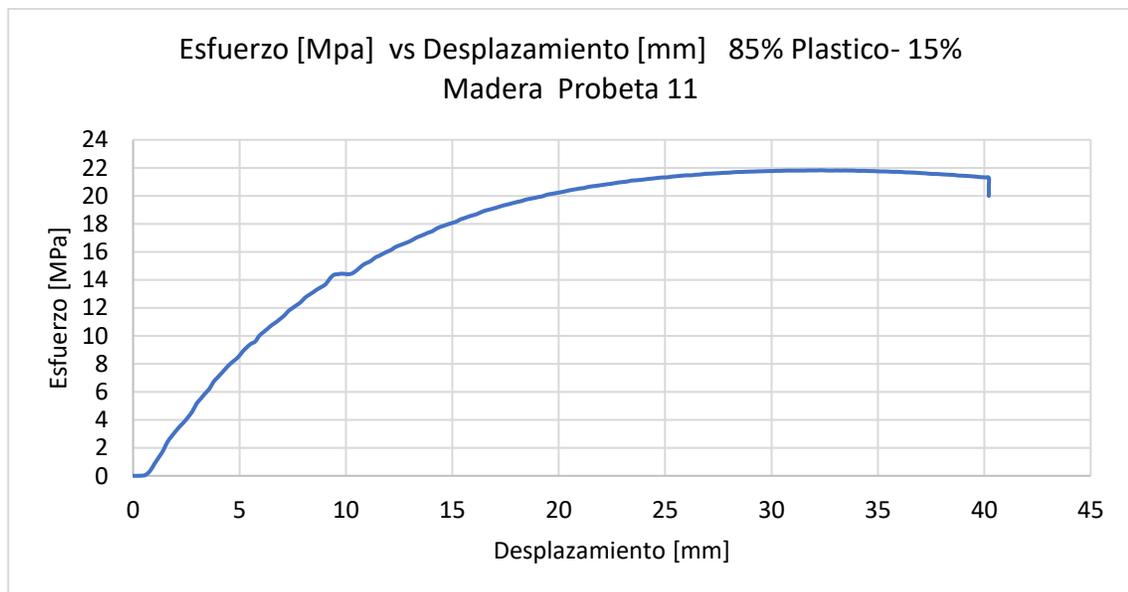
<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	21.10
<b>2</b>	21.27
<b>3</b>	21.31
<b>4</b>	21.22
<b>5</b>	21.81
<b>6</b>	21.21
<b>7</b>	20.90
<b>8</b>	21.50
<b>9</b>	21.70
<b>10</b>	21.72
<b>11</b>	21.82
<b>12</b>	21.10
<b>13</b>	21.52
<b>14</b>	21.22
<b>15</b>	20.92

Ejemplo de cálculo:

Esfuerzo máximo para la Probeta 11 la cual soporto el valor más alto de carga de las probetas ensayadas.

$$\sigma_f = \frac{3 \times 397,1 \times 180}{2 \times 17 \times 17^2} \sigma_f = 21,82 \text{ [MPa]}$$

La grafica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 11 se muestra en la figura 78.



**Figura 78** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 90% Plástico – 15% Madera

### 5.5.3. Módulo de elasticidad

Para el cálculo del módulo de elasticidad se realizó el análisis de la ecuación de la línea de tendencia lineal obtenida de los datos del diagrama Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] en el cual nos indica el coeficiente de regresión  $R^2$  que es el que nos indica que tan preciso

es el ajuste lineal generado a la gráfica, mientras este valor sea más próximo a 1 la tendencia de la línea se asemeja más a una recta.

Para obtener una mejor aproximación a una línea recta se restringe la cantidad de datos hasta que el valor de  $R^2$  se aproxime a 0.997 este valor se obtiene a partir de los datos de la zona plástica de los diagramas obtenidos.

Cuando el valor de  $R^2$  sea el más próximo a lo deseado se observa en la gráfica la ecuación de la línea de tendencia que es de la forma  $y = mx \pm b$ , de la cual el valor de la pendiente  $m$  será utilizado.

En la norma establece el cálculo mediante la ecuación 8.

***Ecuación 10 Modulo de Elasticidad***

$$E_B = \frac{mL^3}{4bd^3}$$

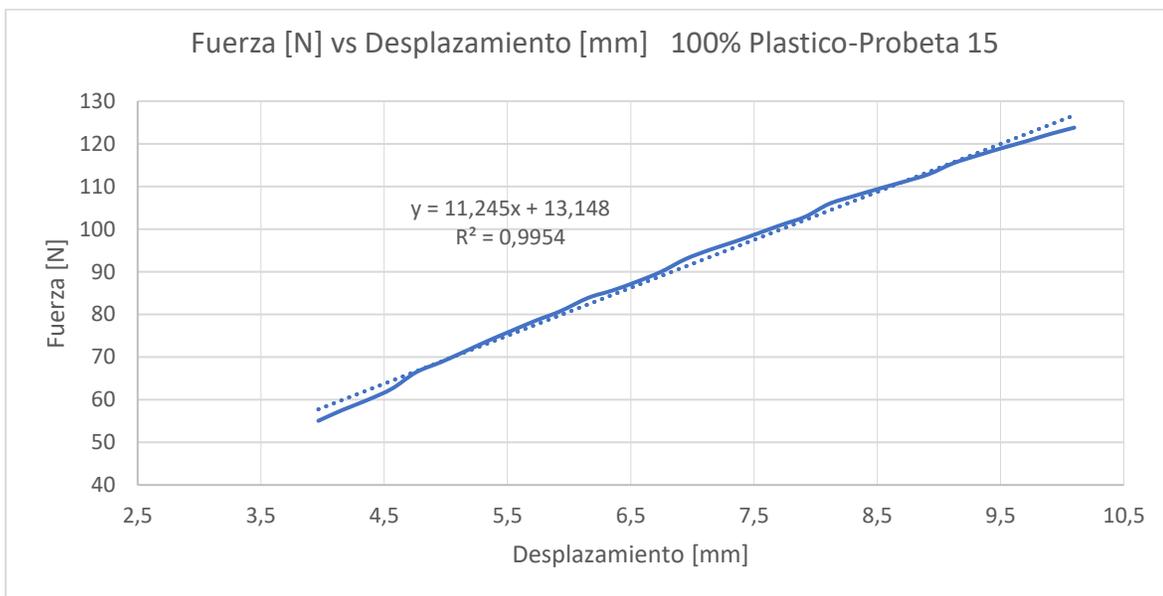
Donde:

- $E_B$ : Modulo de Elasticidad [MPa]
- $m$ : Pendiente [N/mm]
- $d$ : Espesor de la probeta [mm]
- $L$ : Distancia entre apoyos [mm]
- $b$ : Ancho de la probeta [mm]

El módulo de elasticidad se calculó en cada una de las clasificaciones de las probetas y las gráficas de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de todas las probetas ensayadas con el valor de la pendiente utilizado en cada probeta se encuentran en el anexo 5

- **Módulo de elasticidad en las probetas de 100% plástico**

En la gráfica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 15 que se muestra en la figura 79 se especifica el valor de la pendiente utilizada.



**Figura 79** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 15: 100% Plástico

Los valores del módulo de elasticidad máximo en cada una de las probetas se establecen en la tabla 51.

**Tabla 51**

*Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 100% Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	194.96
<b>2</b>	194.01
<b>3</b>	195.08
<b>4</b>	195.46
<b>5</b>	194.64
<b>6</b>	194.85
<b>7</b>	195.25
<b>8</b>	194.48
<b>9</b>	195.74

**CONTINÚA**

<b>10</b>	192.76
<b>11</b>	195.74
<b>12</b>	192.76
<b>13</b>	195.03
<b>14</b>	192.76
<b>15</b>	196.30

Ejemplo de cálculo:

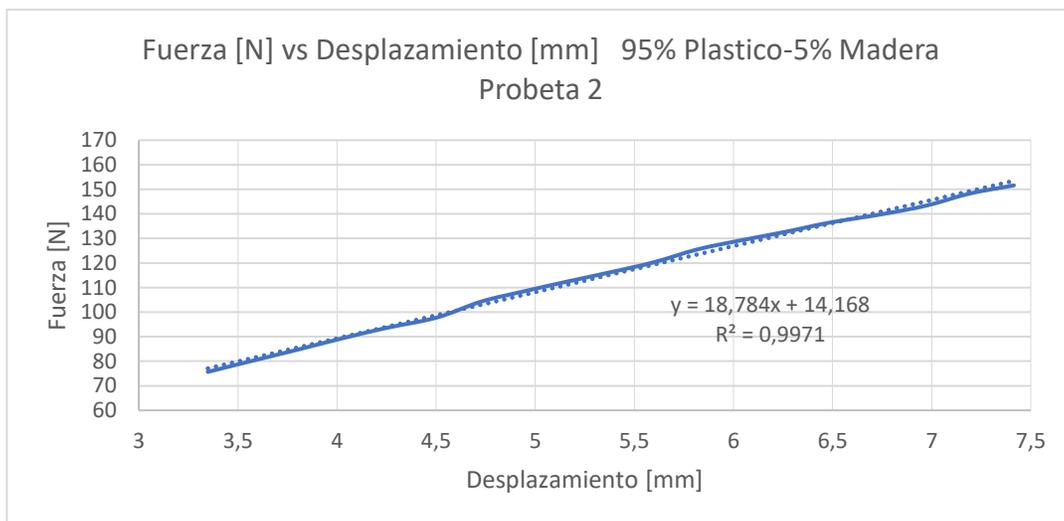
Módulo de elasticidad máximo para la Probeta 15 con un valor de pendiente de 11,245 [N/mm] es de:

$$E_B = \frac{11.245 \times 180^3}{4 \times 17 \times 17^3}$$

$$E_B = 196,3 \text{ [MPa]}$$

- **Módulo de elasticidad en las probetas de 95% plástico y 5% madera**

En la gráfica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 2 que se muestra en la figura 80 se especifica el valor de la pendiente utilizada.



**Figura 80** Gráfica Fuerza Vs. Desplazamiento Probeta 2: 95% Plástico – 5% Madera

Los valores del módulo de elasticidad máximo en cada una de las probetas se establecen en la tabla 52.

**Tabla 52**

*Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	324.10
<b>2</b>	327.91
<b>3</b>	327.68
<b>4</b>	325.78
<b>5</b>	326.53
<b>6</b>	327.68
<b>7</b>	324.59
<b>8</b>	327.02
<b>9</b>	324.64
<b>10</b>	324.78
<b>11</b>	324.57
<b>12</b>	327.17
<b>13</b>	327.17
<b>14</b>	323.63
<b>15</b>	325.99

Ejemplo de cálculo:

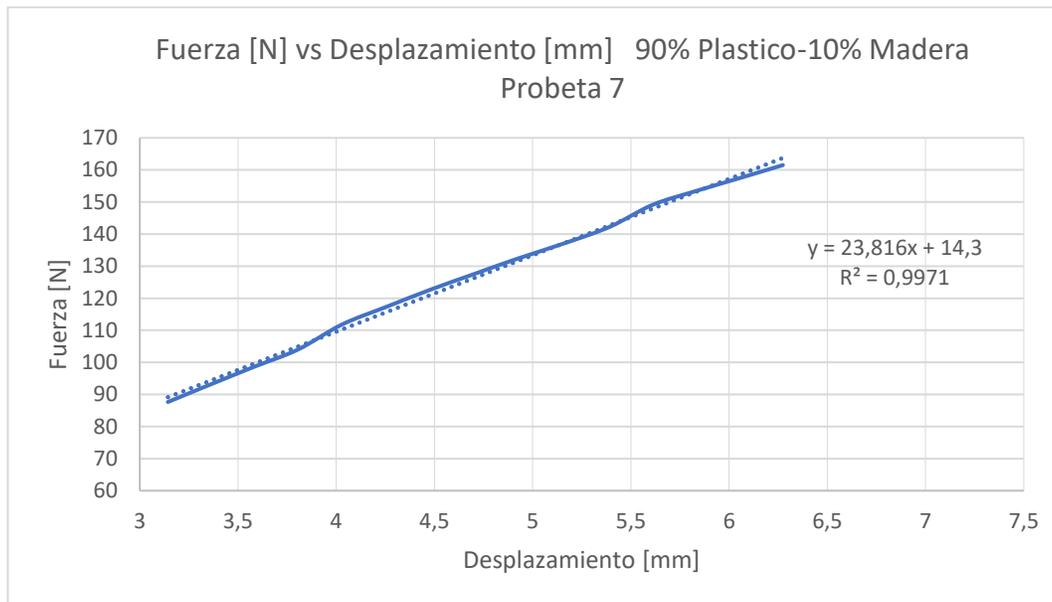
Módulo de elasticidad máximo para la Probeta 2 con un valor de pendiente de 18,784 [N/mm] es de:

$$E_B = \frac{18,784 \times 180^3}{4 \times 17 \times 17^3}$$

$$E_B = 327,91 \text{ [MPa]}$$

- **Módulo de elasticidad en las probetas de 90% plástico y 10% madera**

En la gráfica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 7 que se muestra en la figura 81 se especifica el valor de la pendiente utilizada.



**Figura 81** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera

Los valores del módulo de elasticidad máximo en cada una de las probetas se establecen en la tabla 53.

**Tabla 53**

*Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 90% Plástico – 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	413.25
<b>2</b>	415.21
<b>3</b>	413.41
<b>4</b>	410.21
<b>5</b>	410.09
<b>6</b>	411.52
<b>7</b>	415.75
<b>8</b>	414.32
<b>9</b>	412.31
<b>10</b>	411.86
<b>11</b>	412.19
<b>12</b>	412.01
<b>13</b>	413.64
<b>14</b>	411.75
<b>15</b>	413.41

Ejemplo de cálculo:

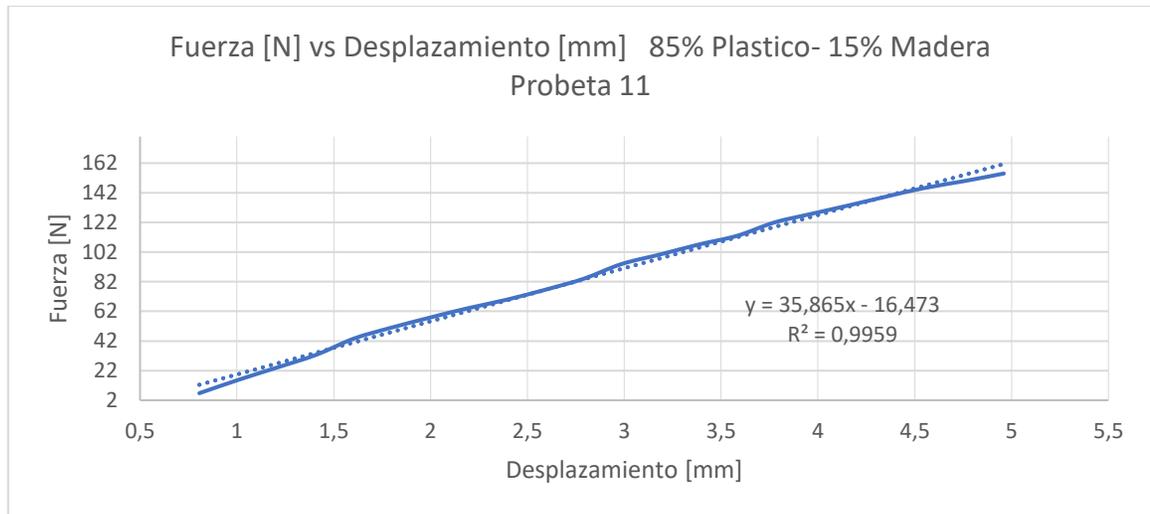
Módulo de elasticidad máximo para la Probeta 7 con un valor de pendiente de 23,816 [N/mm] es de:

$$E_B = \frac{23,816 \times 180^3}{4 \times 17 \times 17^3}$$

$$E_B = 415,75 \text{ [MPa]}$$

- **Módulo de elasticidad en las probetas de 85% plástico y 15% madera**

En la gráfica de Fuerza [N] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 11 que se muestra en la figura 82 se especifica el valor de la pendiente utilizada.



**Figura 82** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 85% Plástico – 15% Madera

Los valores del módulo de elasticidad máximo en cada una de las probetas se establecen en la tabla 54.

**Tabla 54**

*Valores de Modulo de Elasticidad [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	619.22
<b>2</b>	621.48
<b>3</b>	625.19
<b>4</b>	620.20
<b>5</b>	620.29
<b>6</b>	621.53
<b>7</b>	619.50
<b>8</b>	621.53
<b>9</b>	618.70
<b>10</b>	616.87
<b>11</b>	626.08
<b>12</b>	621.13
<b>13</b>	616.17
<b>14</b>	622.35
<b>15</b>	620.08

Ejemplo de cálculo:

Módulo de elasticidad máximo para la Probeta 11 con un valor de pendiente de 35,865 [N/mm] es de:

$$E_B = \frac{35,865 \times 180^3}{4 \times 17 \times 17^3}$$

$$E_B = 626,08 \text{ [MPa]}$$

#### **5.5.4. Esfuerzo límite de proporcionalidad**

Es el límite superior del valor del esfuerzo por debajo del cual se cumple la relación que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación, para el análisis del límite de proporcionalidad se utiliza la gráfica de Esfuerzo [MPa] vs

Desplazamiento [mm] mediante la cual el valor  $R^2$  como en el caso del módulo de elasticidad debe tener una aproximación a uno.

El valor de límite de proporcionalidad es el punto más alto de la gráfica Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] antes de que inicie la zona elástica, este se establece de forma visual dependiendo de la consideración del analista.

Las gráficas utilizadas para determinar el valor del límite de proporcionalidad de todas las probetas ensayadas se encuentran en el anexo 6

- **Esfuerzo límite de proporcionalidad en las probetas de 100% plástico**

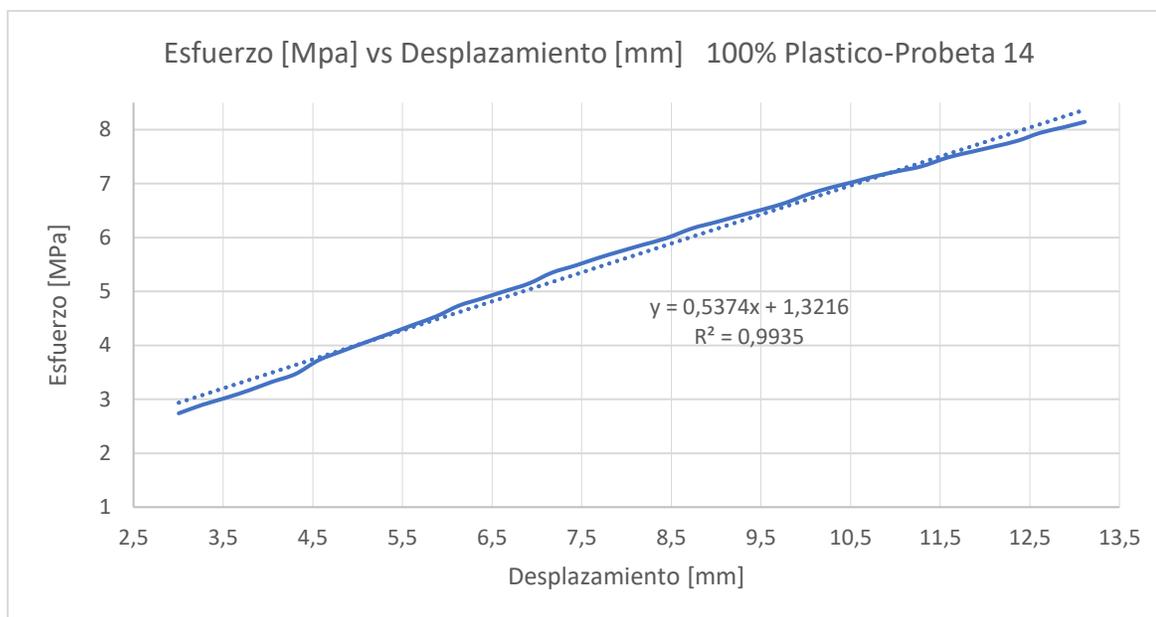
Los valores del límite de proporcionalidad en cada una de las probetas se establecen en la tabla 55.

**Tabla 55**

*Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 100% Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	7.49
<b>2</b>	7.37
<b>3</b>	7.46
<b>4</b>	7.69
<b>5</b>	7.75
<b>6</b>	7.82
<b>7</b>	7.75
<b>8</b>	7.85
<b>9</b>	7.79
<b>10</b>	8
<b>11</b>	7.79
<b>12</b>	8.05
<b>13</b>	8.12
<b>14</b>	8.14
<b>15</b>	7.83

Se muestra la gráfica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 14 en la cual se observó el mayor límite de proporcionalidad con un valor de 8,14 [Mpa] este se muestra en la figura 83.



**Figura 83** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 14: 100% Plástico

- **Esfuerzo límite de proporcionalidad en las probetas de 95% plástico y 5% madera**

Los valores del límite de proporcionalidad en cada una de las probetas se establecen en la tabla 56.

**Tabla 56**

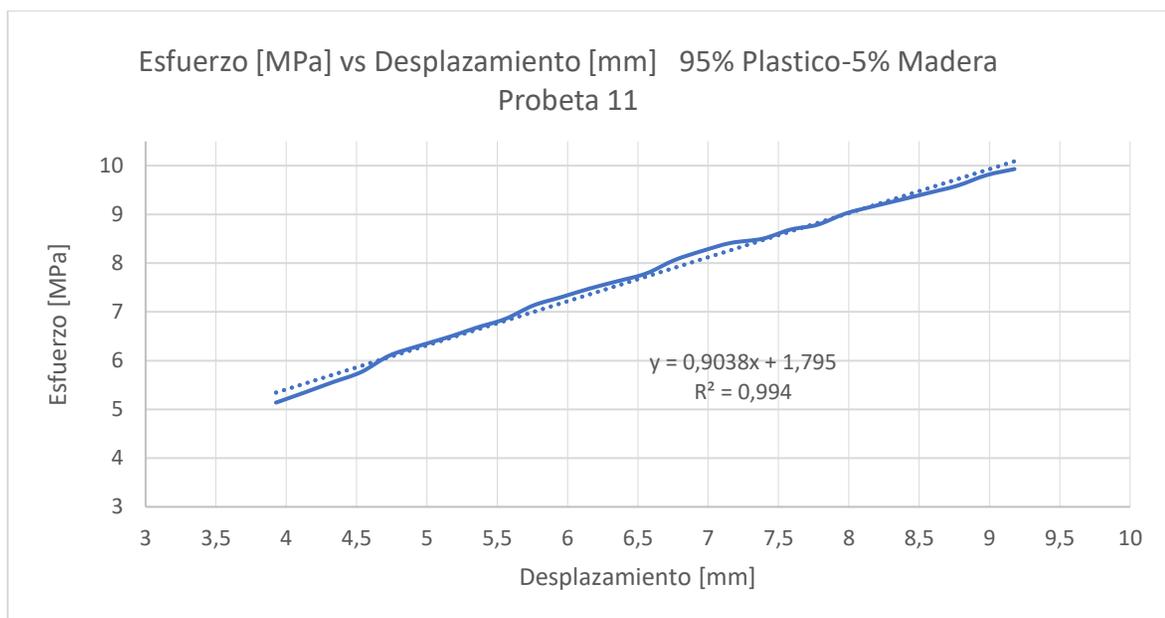
Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 95% Plástico – 5% Madera

Probetas	Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]
1	9.16
2	9.66
3	9.76
4	9.82
5	9.29
6	9.3

**CONTINÚA**

<b>7</b>	9.18
<b>8</b>	9.33
<b>9</b>	9.12
<b>10</b>	9.55
<b>11</b>	9.93
<b>12</b>	9.46
<b>13</b>	9.24
<b>14</b>	9.47
<b>15</b>	9.65

Se muestra la gráfica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 11 en la cual se observó el mayor límite de proporcionalidad con un valor de 9,93 [Mpa] este se muestra en la figura 84.



**Figura 84** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 11: 95% Plástico – 5% Madera

- **Esfuerzo límite de proporcionalidad en las probetas de 90% plástico y 10% madera**

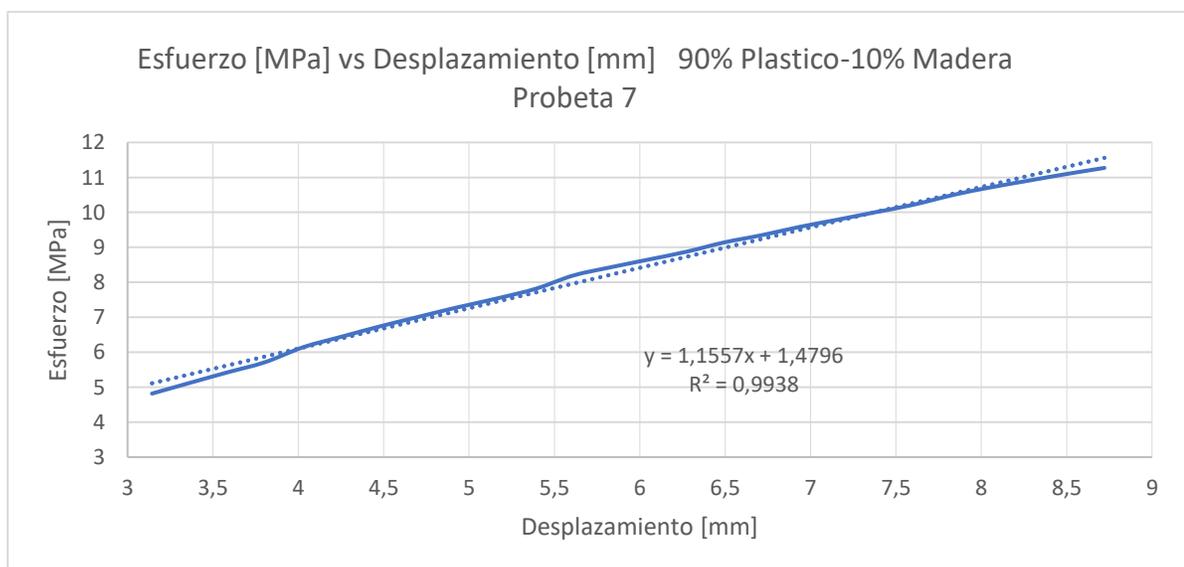
Los valores del límite de proporcionalidad en cada una de las probetas se establecen en la tabla 57.

**Tabla 57**

Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas  
90% Plástico – 10% Madera

Probetas	Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]
1	10.31
2	10.79
3	10.8
4	10.34
5	10.62
6	10.72
7	11.27
8	10.89
9	10.87
10	10.91
11	10.47
12l	10.85
13	10.95
14	11.09
15	11.07

Se muestra la gráfica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 7 en la cual se observó el mayor límite de proporcionalidad con un valor de 11,27 [Mpa] este se muestra en la figura 85.



**Figura 85** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 90% Plástico – 10% Madera

- **Esfuerzo límite de proporcionalidad en las probetas de 85% plástico y 15% madera**

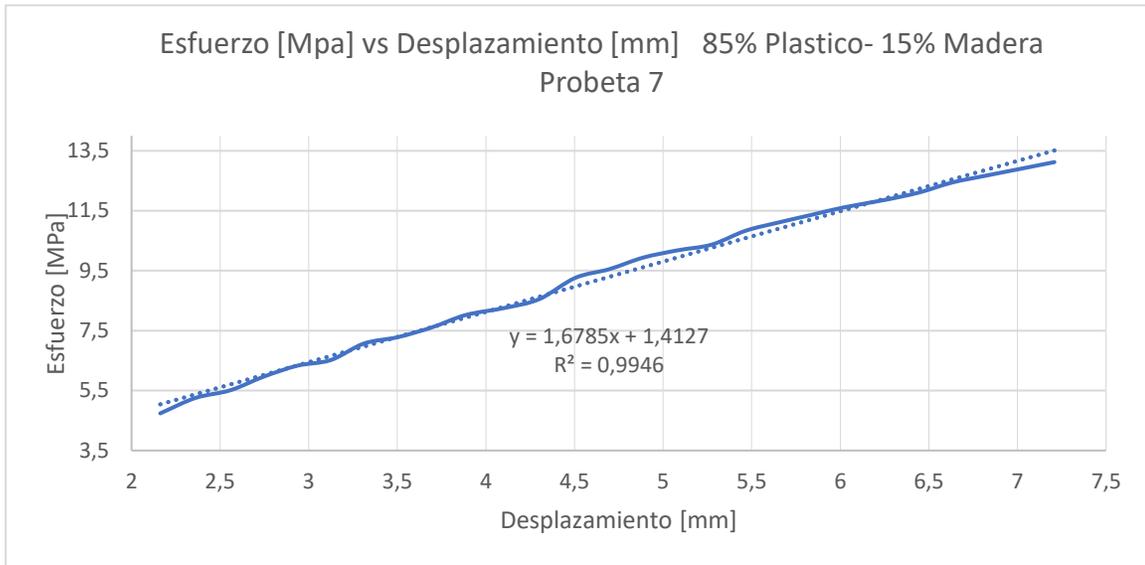
Los valores del límite de proporcionalidad en cada una de las probetas se establecen en la tabla 58.

**Tabla 58**

*Valores del Límite de proporcionalidad [MPa] para probetas 85% Plástico – 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	12.4
<b>2</b>	12.58
<b>3</b>	12.76
<b>4</b>	13.01
<b>5</b>	12.9
<b>6</b>	12.94
<b>7</b>	13.12
<b>8</b>	12.49
<b>9</b>	12.7
<b>10</b>	12.99
<b>11</b>	12.92
<b>12</b>	12.73
<b>13</b>	13.03
<b>14</b>	12.6
<b>15</b>	12.68

Se muestra la gráfica de Esfuerzo [MPa] vs Desplazamiento [mm] de la probeta 7 en la cual se observó el mayor límite de proporcionalidad con un valor de 13,12 [Mpa] este se muestra en la figura 86.



**Figura 86** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probeta 7: 85% Plástico – 15% Madera

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1. Esfuerzo de Flexión Máximo

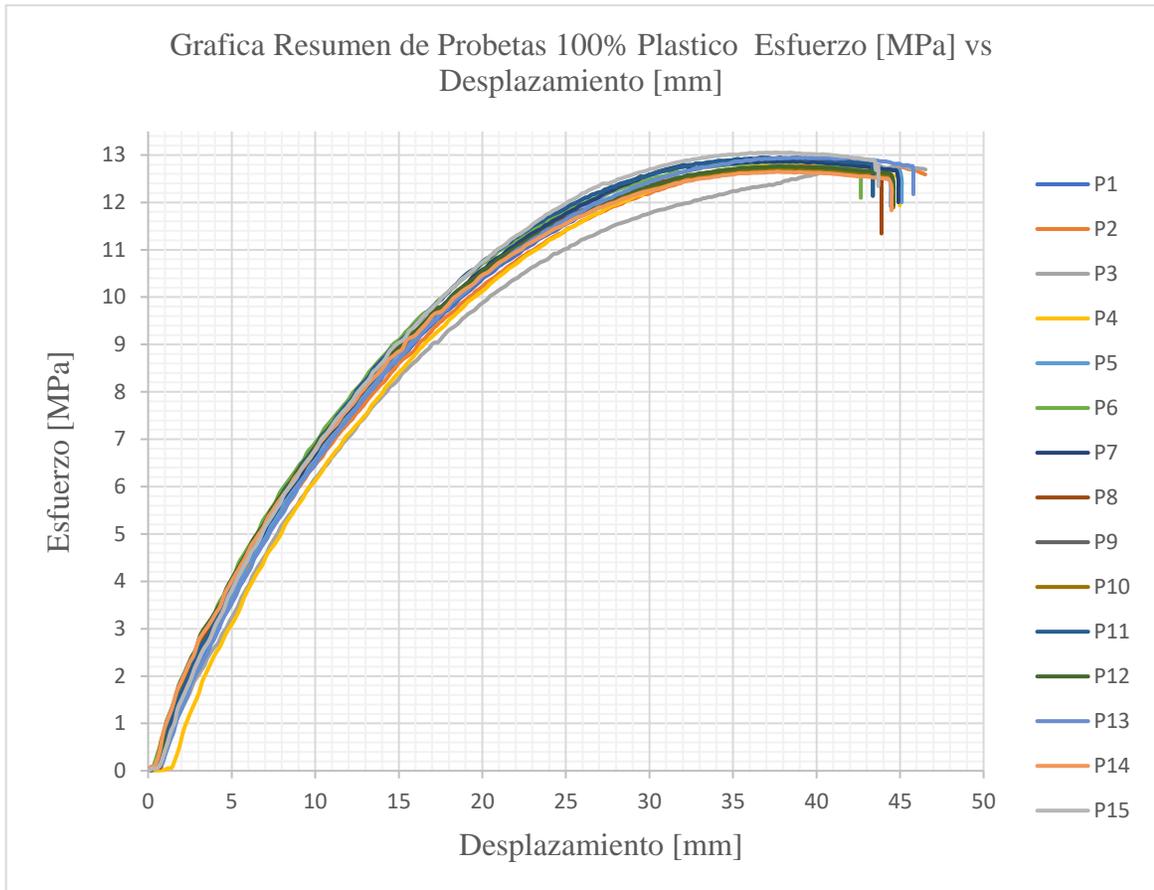
##### 6.1.1. Probetas de 100% Plásticos

Los valores de esfuerzo máximo en las probetas cuya composición es 100% plástico se detalla en la tabla 59, se muestra además en la figura 87 la gráfica del diagrama Esfuerzo [MPa] Vs. Desplazamiento [mm].

**Tabla 59**

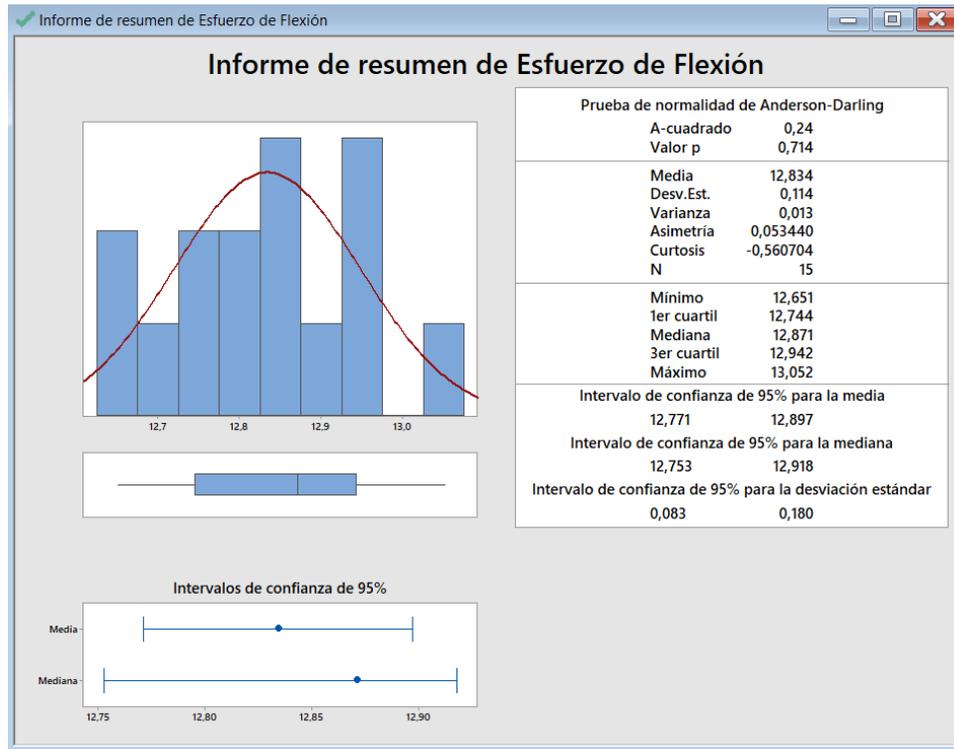
*Valores de Esfuerzo máximo para probetas 100% plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	12,67
<b>2</b>	12,81
<b>3</b>	12,78
<b>4</b>	12,87
<b>5</b>	12,87
<b>6</b>	12,88
<b>7</b>	12,87
<b>8</b>	12,74
<b>9</b>	12,94
<b>10</b>	12,71
<b>11</b>	12,94
<b>12</b>	12,77
<b>13</b>	12,95
<b>14</b>	12,65
<b>15</b>	13,05

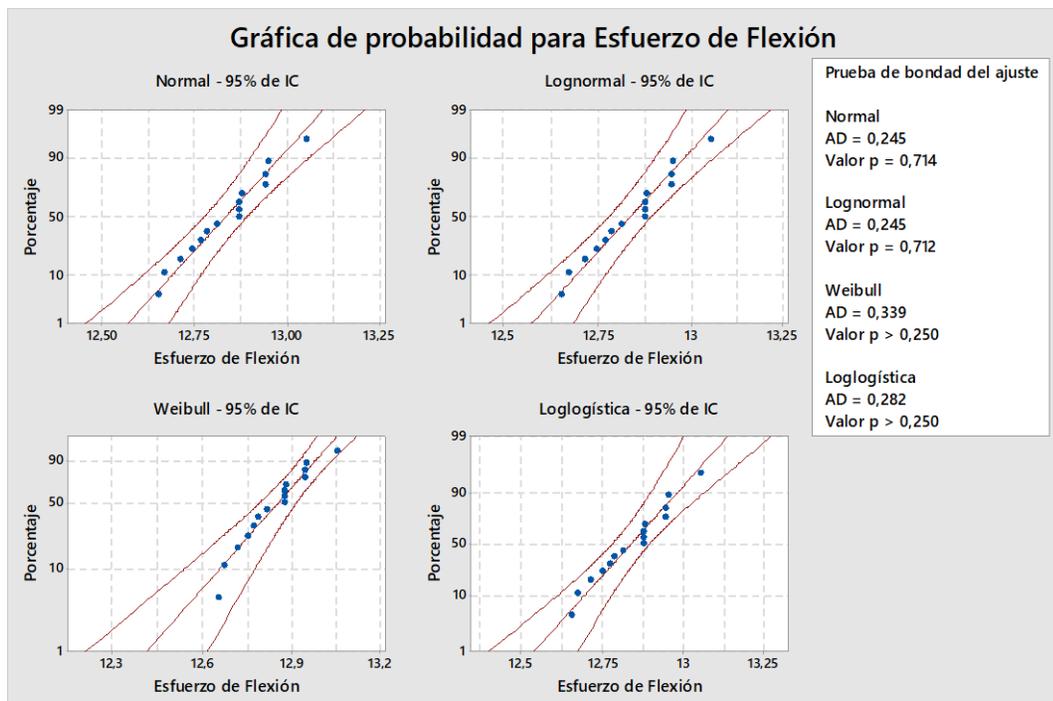


**Figura 87** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 100% Plástico

De acuerdo a la gráfica 88 podemos observar que el esfuerzo medio para probetas de 100% plástico es de 12.834 [MPa] con una desviación estándar de 0.114. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [12,771 – 12.897] [MPa].

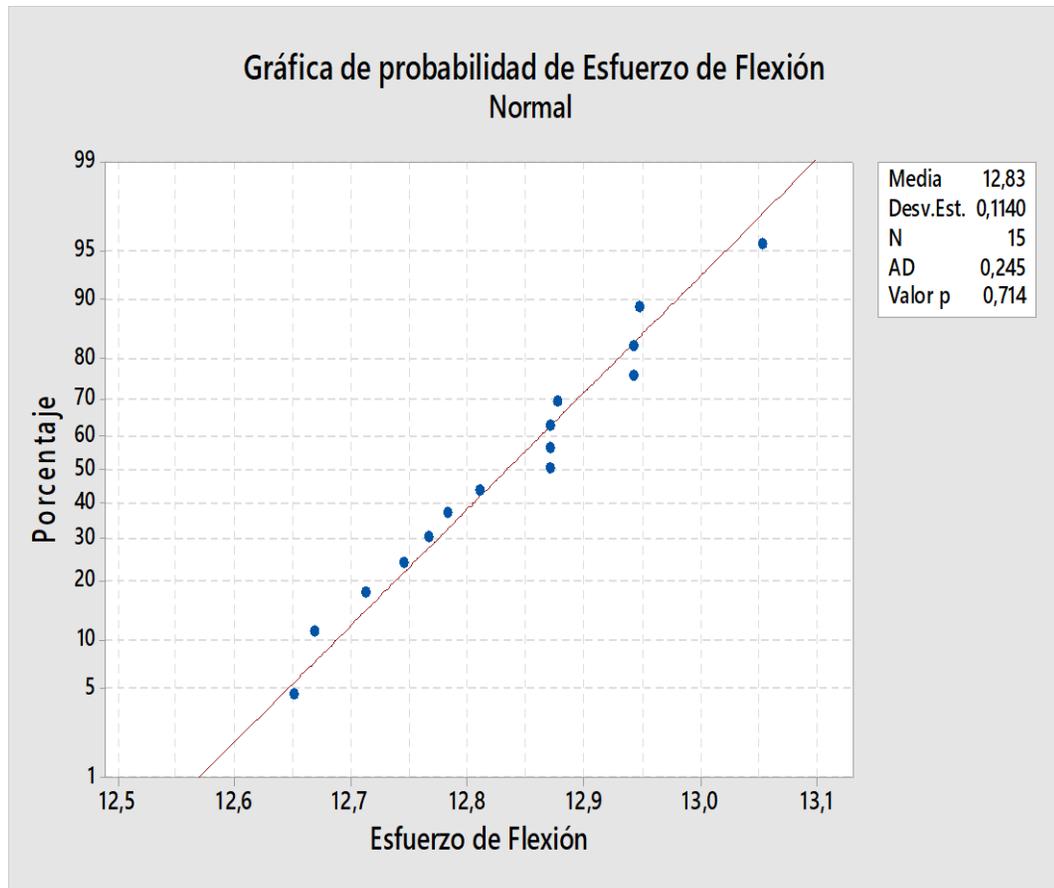


**Figura 88** Resumen estadístico Gráfico de probetas 100% Plásticos



**Figura 89** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 100% Plástico.

Se puede verificar en la figura 89 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan con menor dispersión a una distribución normal con un valor estadístico  $AD = 0,245$  siendo este el menor de todos.



**Figura 90** Gráfico de Distribución Normal para probetas 100% Plástico

Podemos observar en la gráfica 90 que los valores del esfuerzo de flexión están relativamente cerca de la línea de distribución normal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución normal.

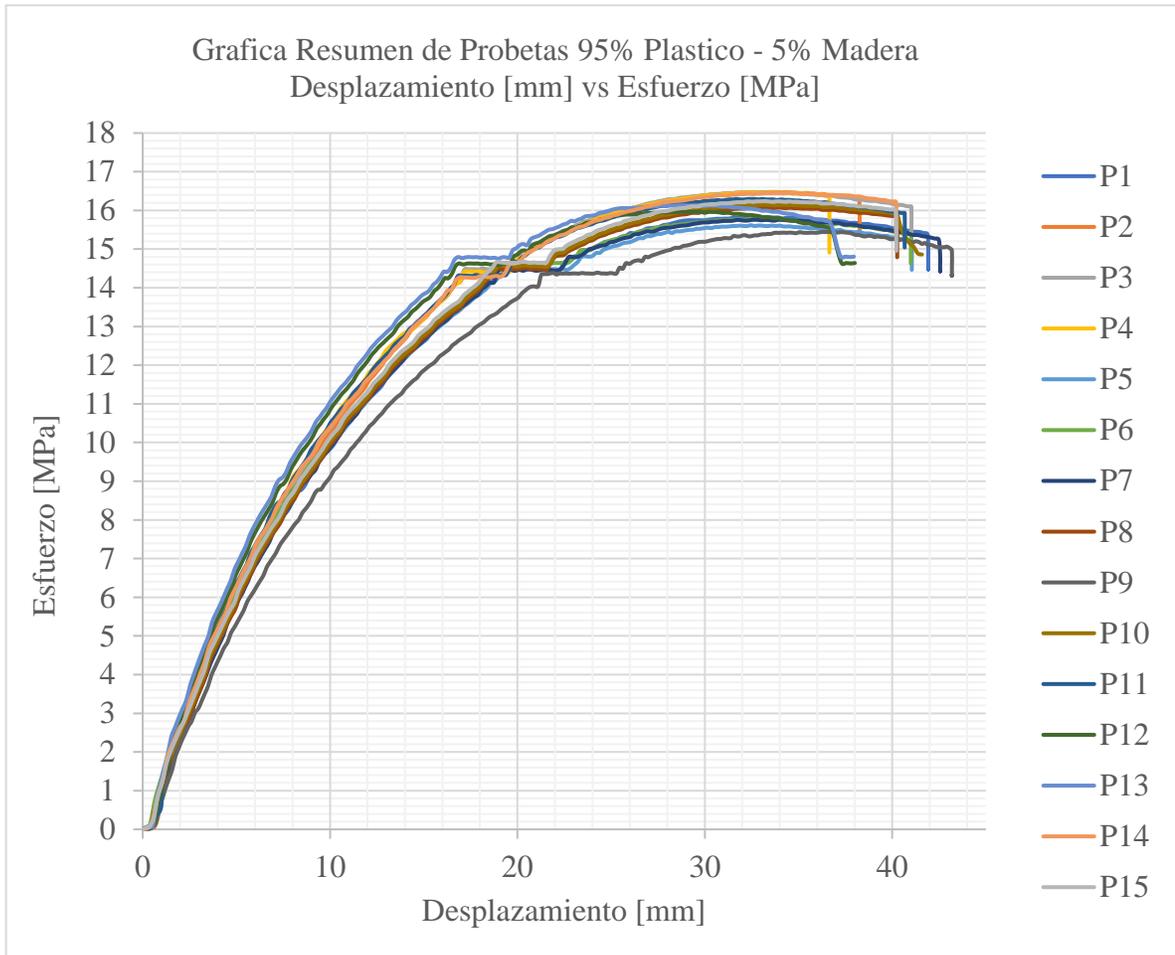
### 6.1.2. Probetas de 95% Plástico - 5% Madera

Los valores de esfuerzo máximo en las probetas cuya composición es 95% plástico – 5% Madera se detalla en la tabla 60, se muestra además en la figura 91 la gráfica del diagrama Esfuerzo [MPa] Vs. Desplazamiento [mm].

**Tabla 60**

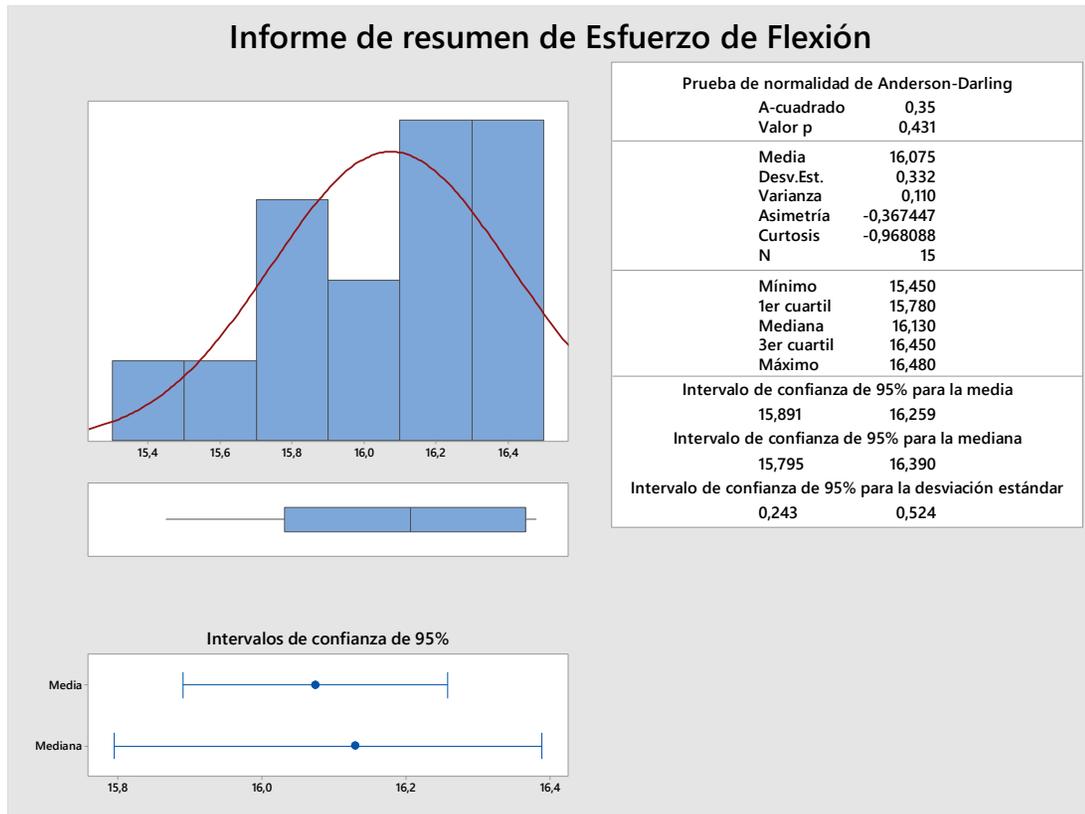
*Valores de Esfuerzo máximo para probetas  
95% Plástico – 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	15,82
<b>2</b>	16,48
<b>3</b>	16,46
<b>4</b>	16,46
<b>5</b>	15,62
<b>6</b>	15,78
<b>7</b>	15,76
<b>8</b>	16,07
<b>9</b>	15,45
<b>10</b>	16,15
<b>11</b>	16,29
<b>12</b>	15,96
<b>13</b>	16,13
<b>14</b>	16,45
<b>15</b>	16,24

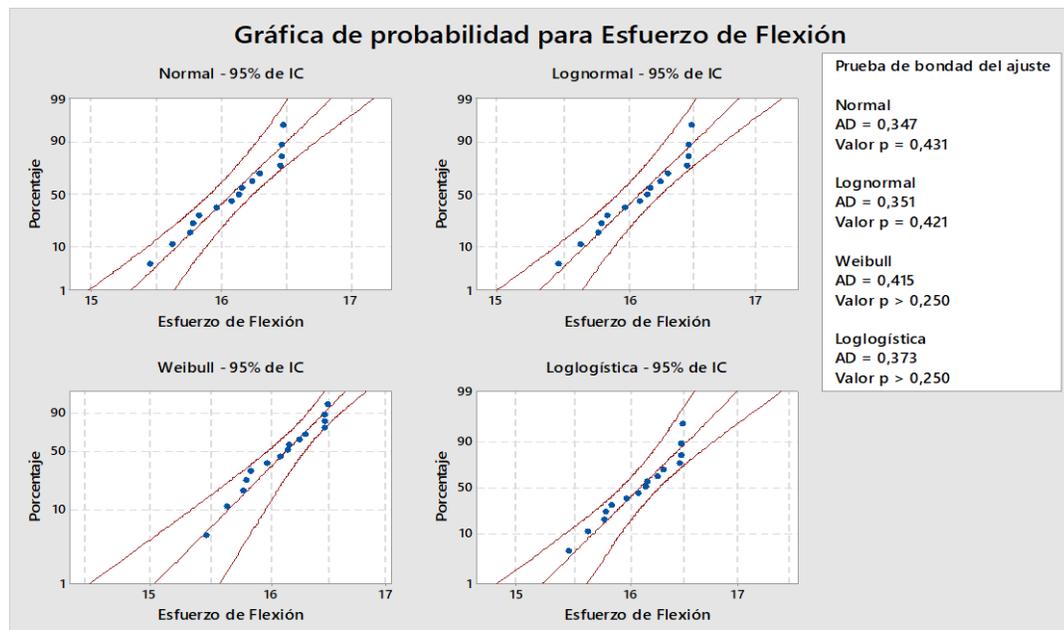


**Figura 91** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 95 % Plástico – 5% Madera

De acuerdo a la gráfica 92 podemos observar que el esfuerzo medio para probetas de 95 % Plástico – 5% Madera es de 16.075 [MPa] con una desviación estándar de 0.332. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [15,891 – 16.259] [MPa].

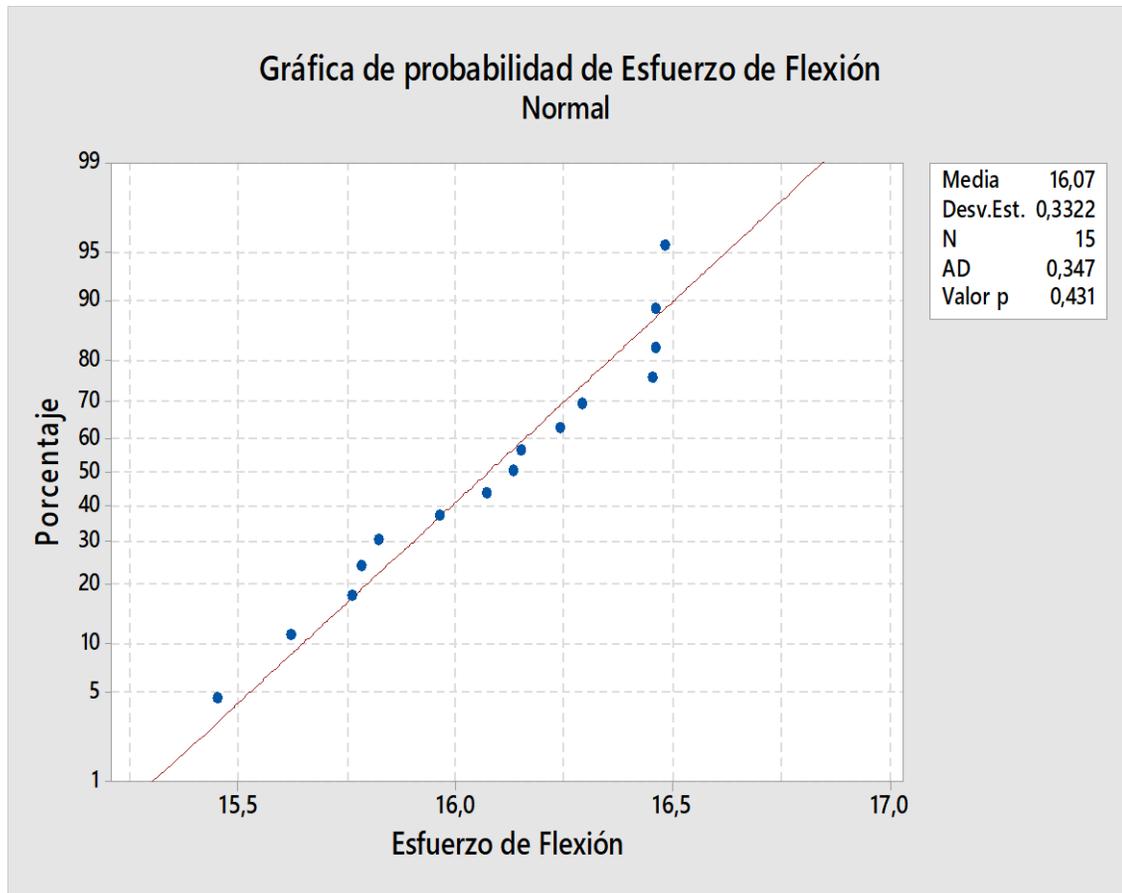


**Figura 92** Gráfica de Resumen estadístico para probetas 95% Plástico – 5% Madera



**Figura 93** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 95% Plástico – 5% Madera.

Se puede verificar en la figura 93 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución normal con un valor estadístico  $AD = 0,347$  siendo este el menor de todos.



**Figura 94** Gráfico de Distribución Normal para probetas 95% Plástico – 5% madera.

Podemos observar en la gráfica 94 que los valores del esfuerzo de flexión están relativamente cerca de la línea de distribución normal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor  $p$  mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución.

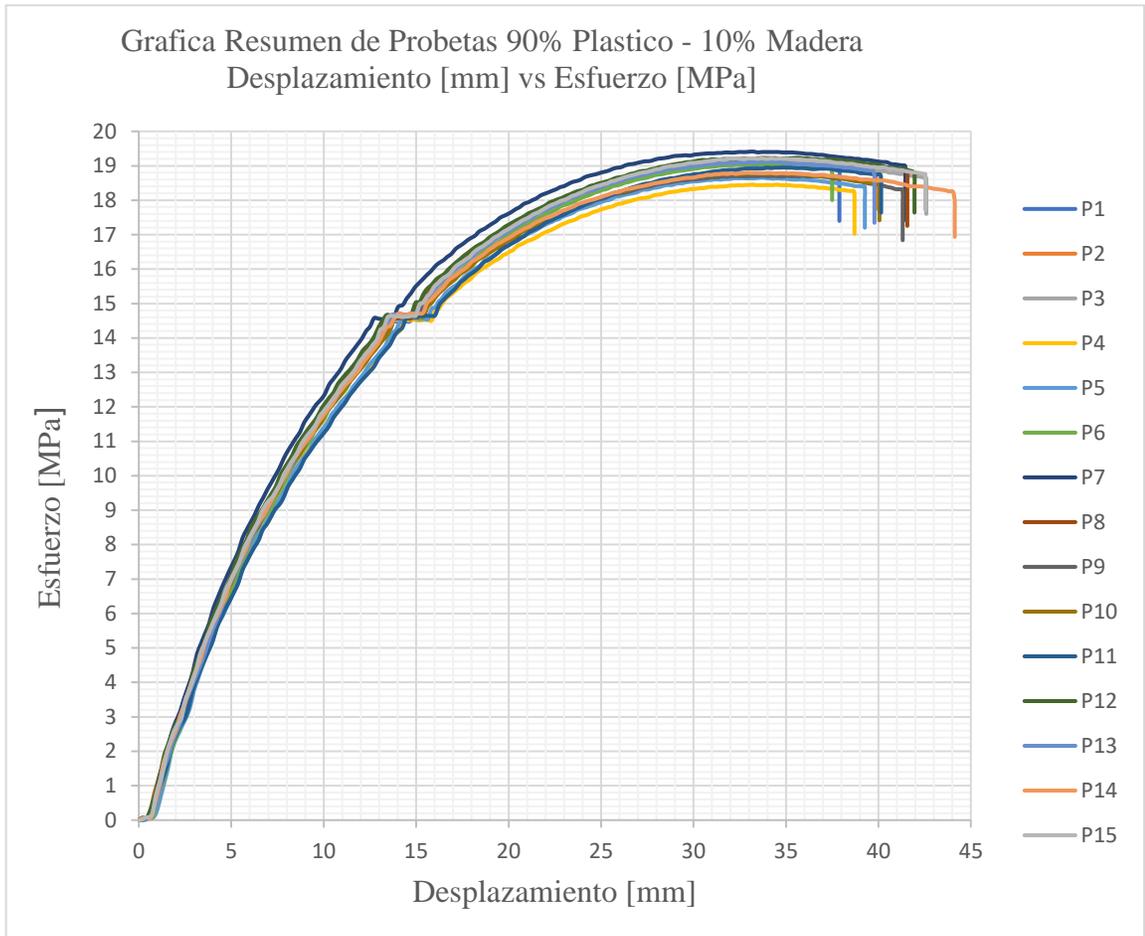
### 6.1.3. Probetas de 90% Plástico 10 % Madera

Los valores de esfuerzo máximo en las probetas cuya composición es 90% plástico – 10% Madera se detalla en la tabla 61, se muestra además en la figura 95 la gráfica del diagrama Esfuerzo [MPa] Vs. Desplazamiento [mm].

**Tabla 61**

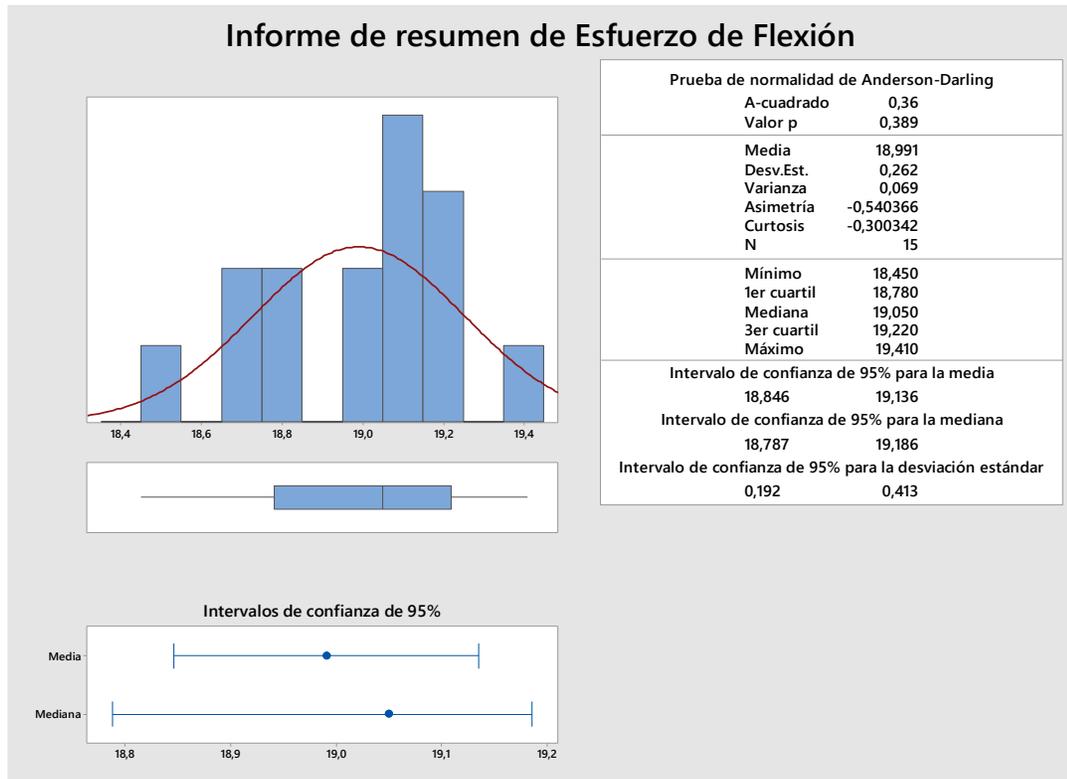
*Valores de Esfuerzo máximo para probetas  
90% Plástico – 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	19,04
<b>2</b>	19,11
<b>3</b>	19,11
<b>4</b>	18,45
<b>5</b>	18,65
<b>6</b>	19,05
<b>7</b>	19,41
<b>8</b>	19,22
<b>9</b>	18,71
<b>10</b>	18,78
<b>11</b>	18,95
<b>12</b>	19,23
<b>13</b>	19,13
<b>14</b>	18,80
<b>15</b>	19,22

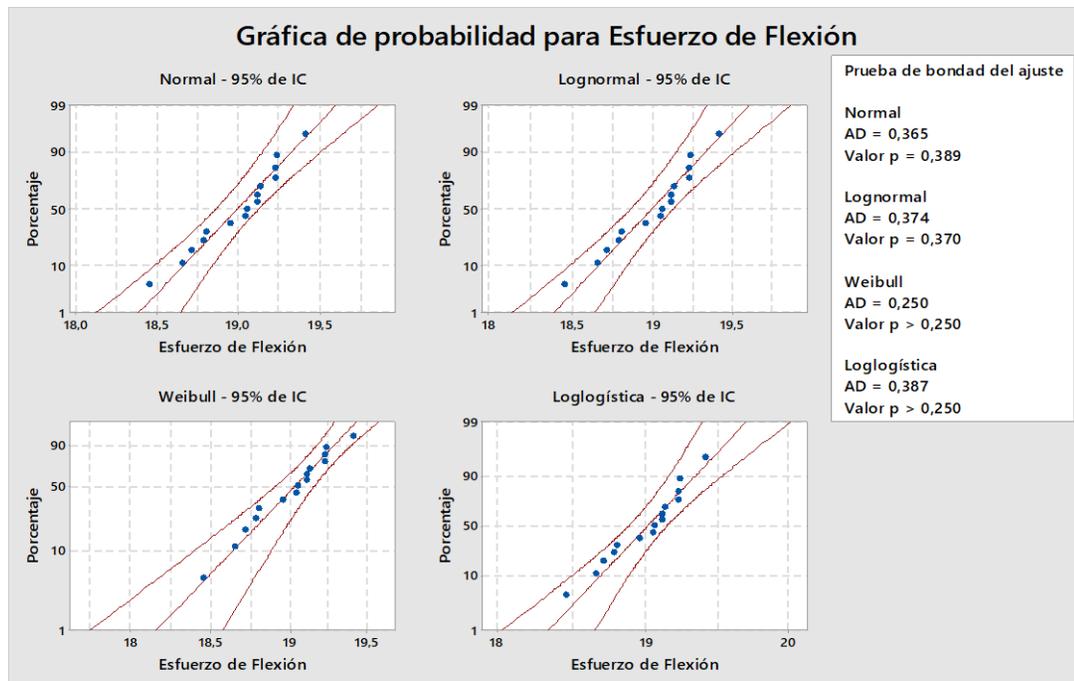


**Figura 95** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 90 % Plástico – 10% Madera

De acuerdo a la gráfica 96 podemos observar que el esfuerzo medio para probetas de 90 % Plástico – 10% Madera es de 18.991 [MPa] con una desviación estándar de 0.262. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [18,846 – 19,136] [MPa].

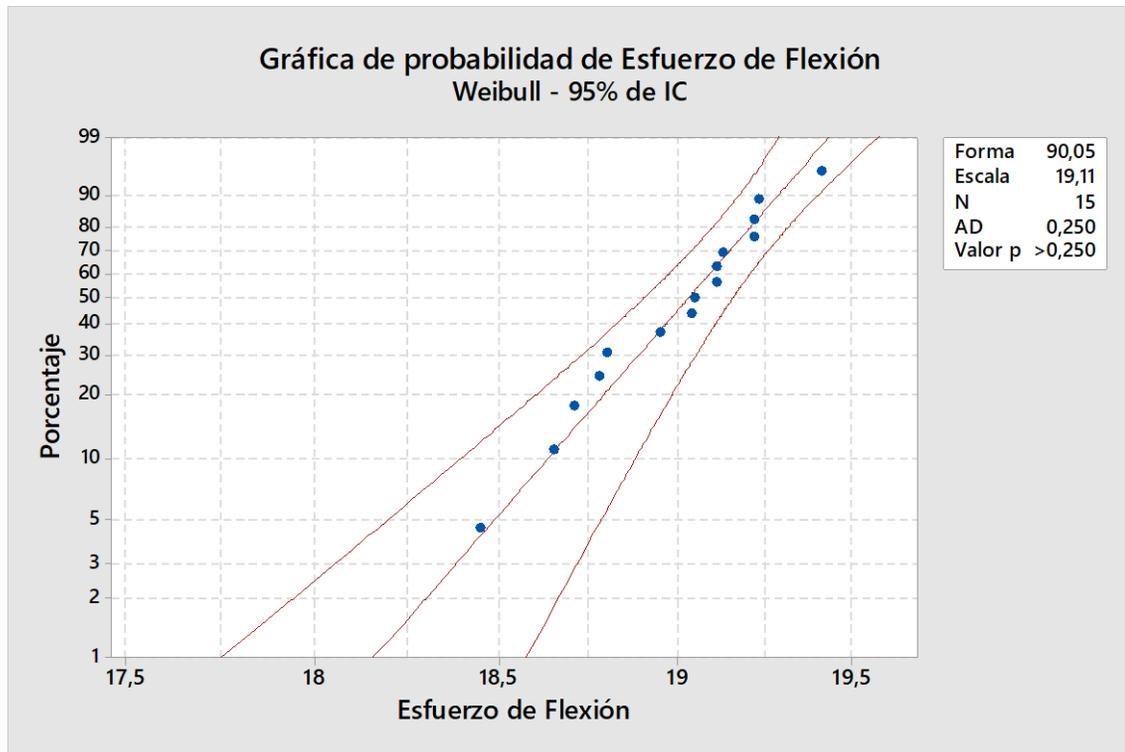


**Figura 96** Gráfica de Resumen estadístico para probetas 90% Plástico – 10% Madera



**Figura 97** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 90% Plástico – 10% Madera.

Se puede verificar en la figura 97 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Weibull con un valor estadístico  $AD = 0,250$  siendo este el menor de todos.



**Figura 98** Gráfico de Distribución Weibull para probetas 90% Plástico – 10% madera.

Podemos observar en la gráfica 98 que los valores del esfuerzo de flexión están relativamente cerca de la línea de distribución Weibull en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Weibull.

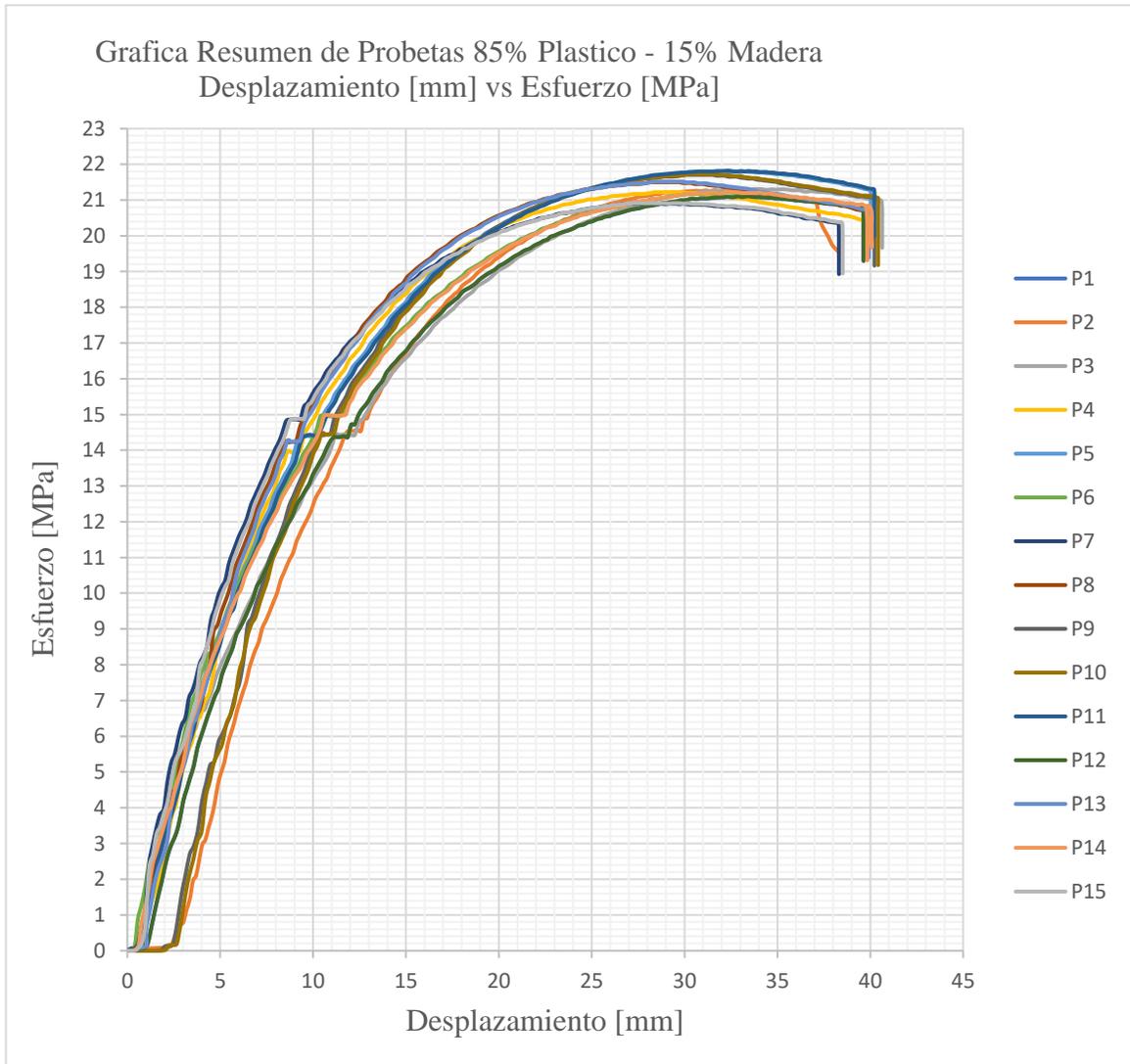
#### 6.1.4. Probetas de 85% Plástico 15 % Madera

Los valores de esfuerzo máximo en las probetas cuya composición es 85% plástico – 15% Madera se detalla en la tabla 62, se muestra además en la figura 99 la gráfica del diagrama Esfuerzo [MPa] Vs. Desplazamiento [mm].

**Tabla 62**

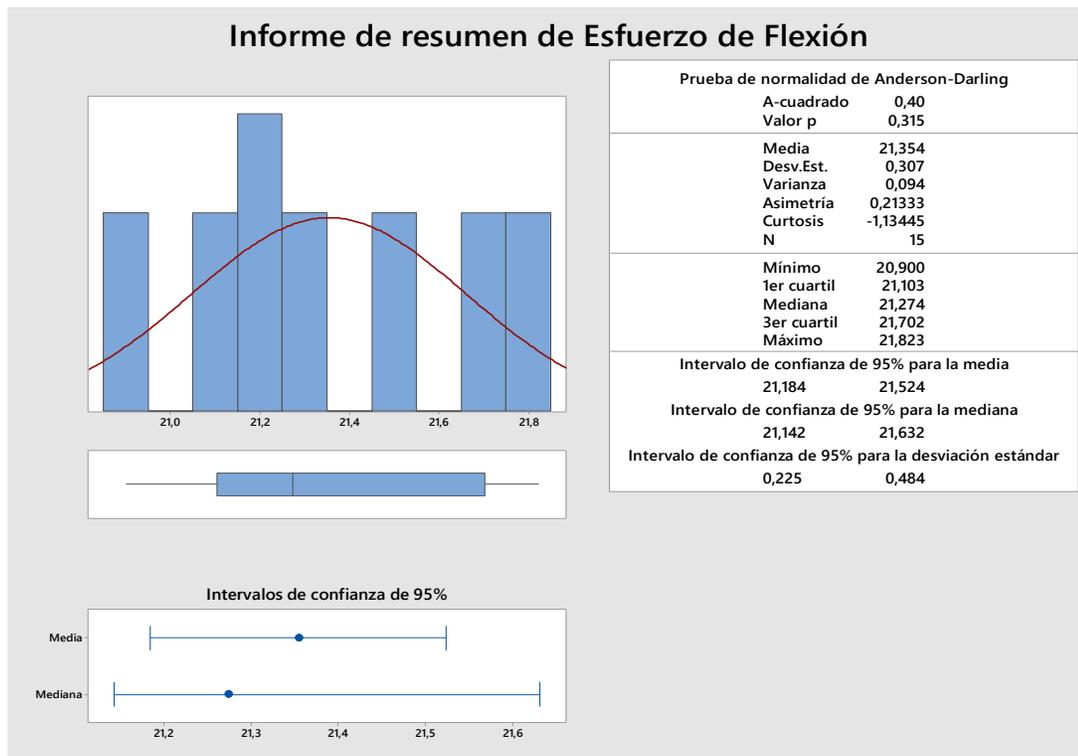
*Valores de Esfuerzo máximo para probetas 85% Plástico – 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo de Flexión [Mpa]</b>
<b>1</b>	21,10
<b>2</b>	21,27
<b>3</b>	21,31
<b>4</b>	21,22
<b>5</b>	21,81
<b>6</b>	21,21
<b>7</b>	20,90
<b>8</b>	21,50
<b>9</b>	21,70
<b>10</b>	21,72
<b>11</b>	21,82
<b>12</b>	21,10
<b>13</b>	21,52
<b>14</b>	21,22
<b>15</b>	20,92

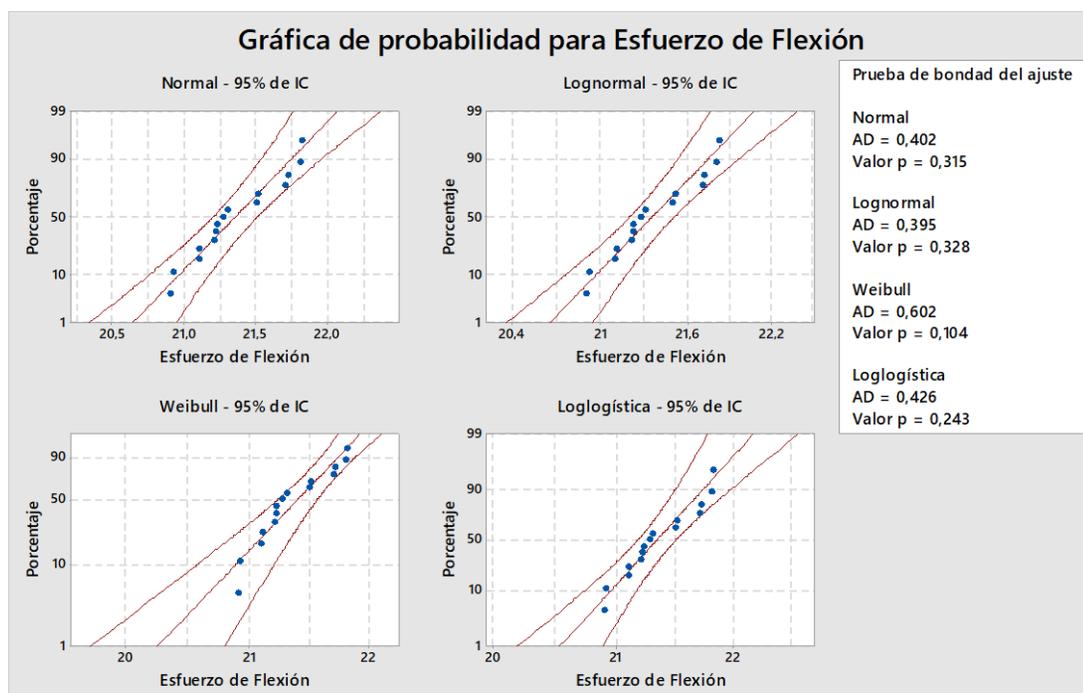


**Figura 99** Gráfica Esfuerzo Vs. Desplazamiento Probetas 85% Plástico – 15% Madera

De acuerdo a la gráfica 100 podemos observar que el esfuerzo medio para probetas de 85 % Plástico – 15% Madera es de 21.354 [MPa] con una desviación estándar de 0.307. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [21,184 – 21,524] [MPa].

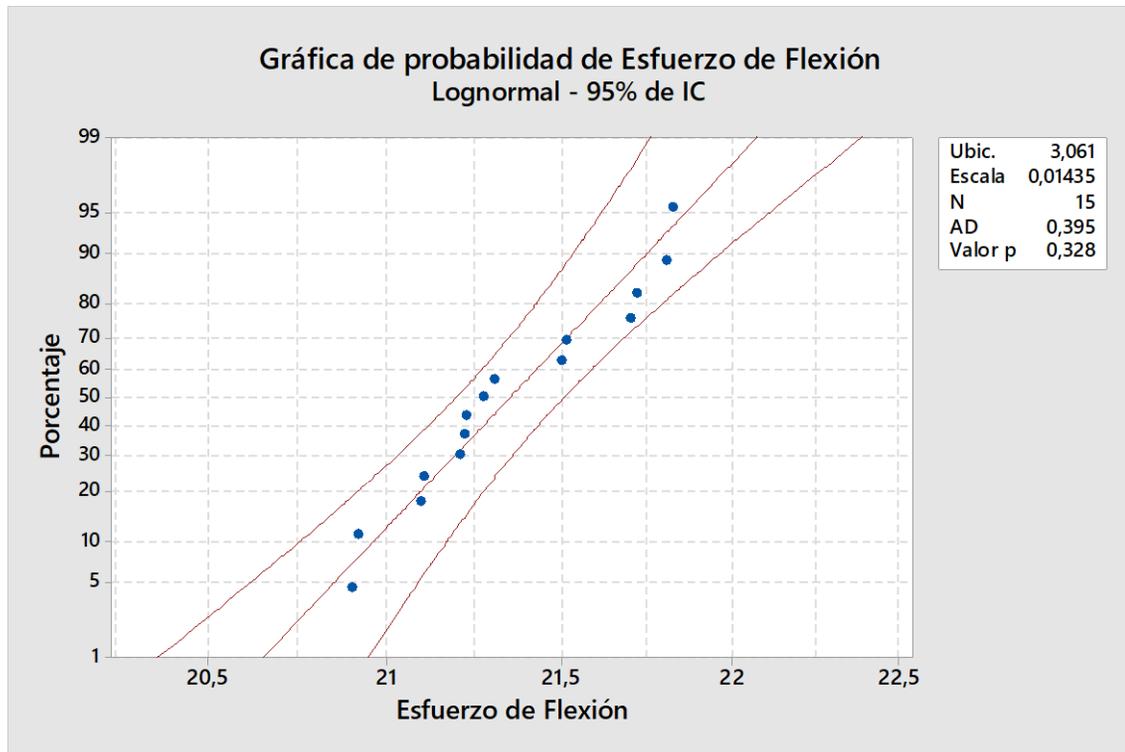


**Figura 100** Gráfica de Resumen estadístico para probetas 85% Plástico – 15% Madera



**Figura 101** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística de probetas 85% Plástico – 15% Madera.

Se puede verificar en la figura 101 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Lognormal con un valor estadístico  $AD = 0,395$  siendo este el menor de todos.



**Figura 102** Gráfico de Distribución Lognormal para probetas 85% Plástico – 15% madera.

Podemos observar en la gráfica 102 que los valores del esfuerzo de flexión están relativamente cerca de la línea de distribución Lognormal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Lognormal.

## 6.2. Esfuerzo Límite de Proporcionalidad por Flexión

### 6.2.1. Probetas de 100% Plásticos

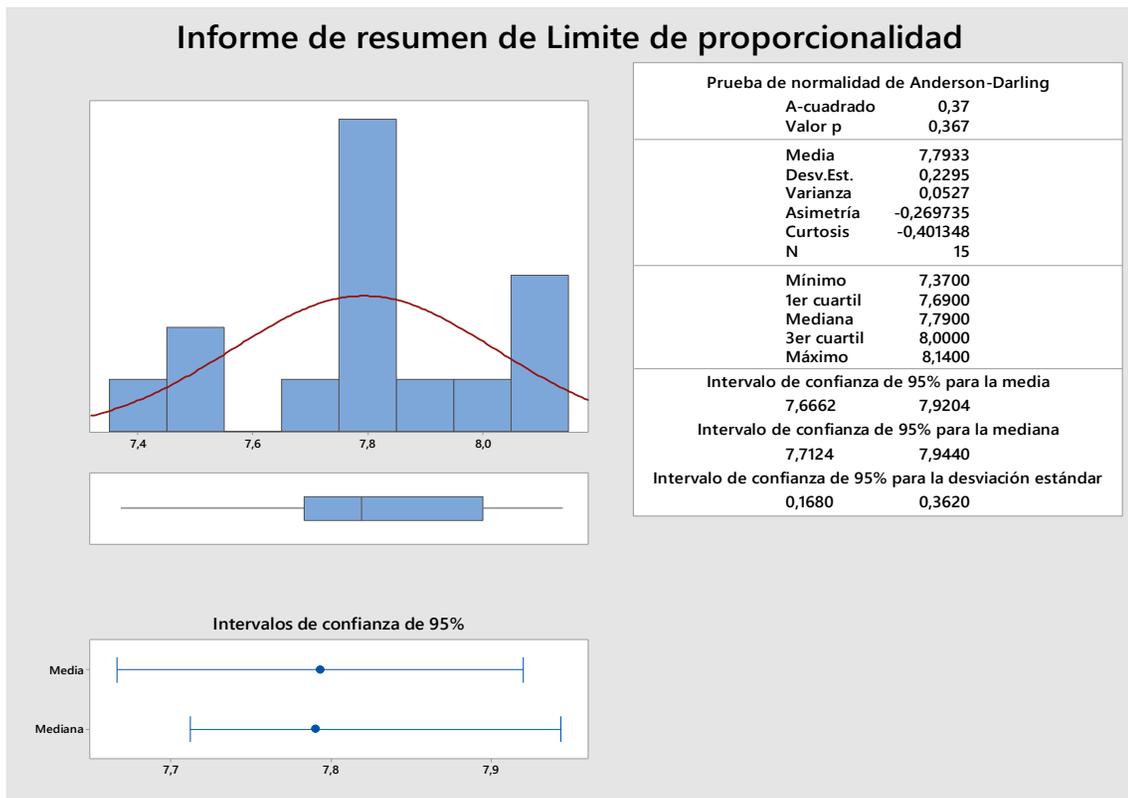
Los valores de límite de proporcionalidad en las probetas cuya composición es 100% plástico se detalla en la tabla 63.

**Tabla 63**

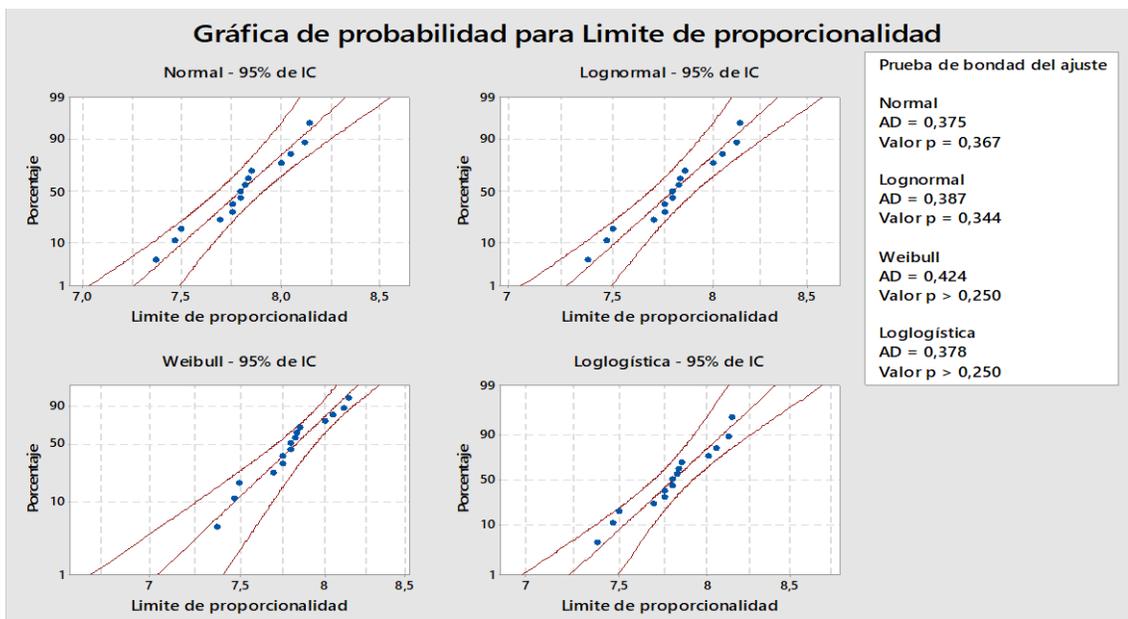
*Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas 100% Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	7,49
<b>2</b>	7,37
<b>3</b>	7,46
<b>4</b>	7,69
<b>5</b>	7,75
<b>6</b>	7,82
<b>7</b>	7,75
<b>8</b>	7,85
<b>9</b>	7,79
<b>10</b>	8
<b>11</b>	7,79
<b>12</b>	8,05
<b>13</b>	8,12
<b>14</b>	8,14
<b>15</b>	7,83

De acuerdo a la figura 103 podemos observar que el valor de límite de proporcionalidad media para probetas de 100 % Plástico es de 7.793 con una desviación estándar de 0.2295. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [7.7124 – 7.9440].

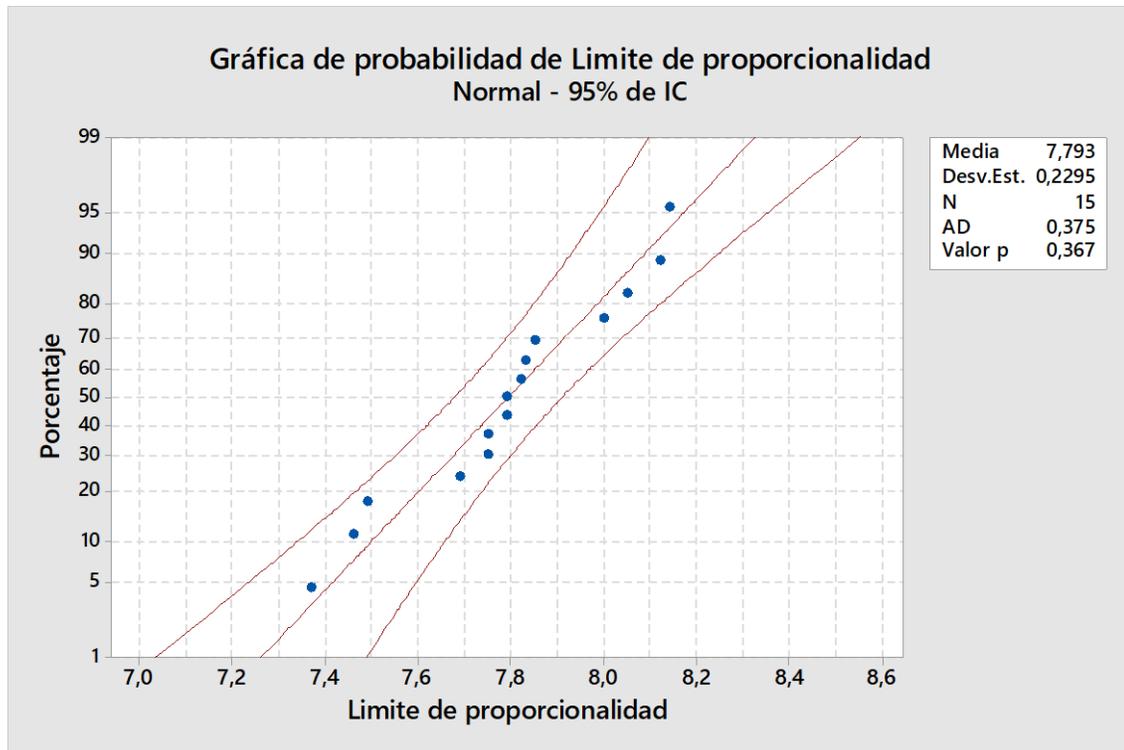


**Figura 103** Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 100% Plástico



**Figura 104** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 100 % Plástico.

Se puede verificar en la figura 104 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución normal con un valor estadístico  $AD = 0,375$  siendo este el menor de todos.



**Figura 105** Gráfico de Distribución normal de Límite de Proporcionalidad para probetas 100% Plástico.

Podemos observar en la gráfica 105 que los valores del Límite de Proporcionalidad están relativamente cerca de la línea de distribución normal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Normal.

### 6.2.2. Probetas de 95% Plástico 5 % Madera

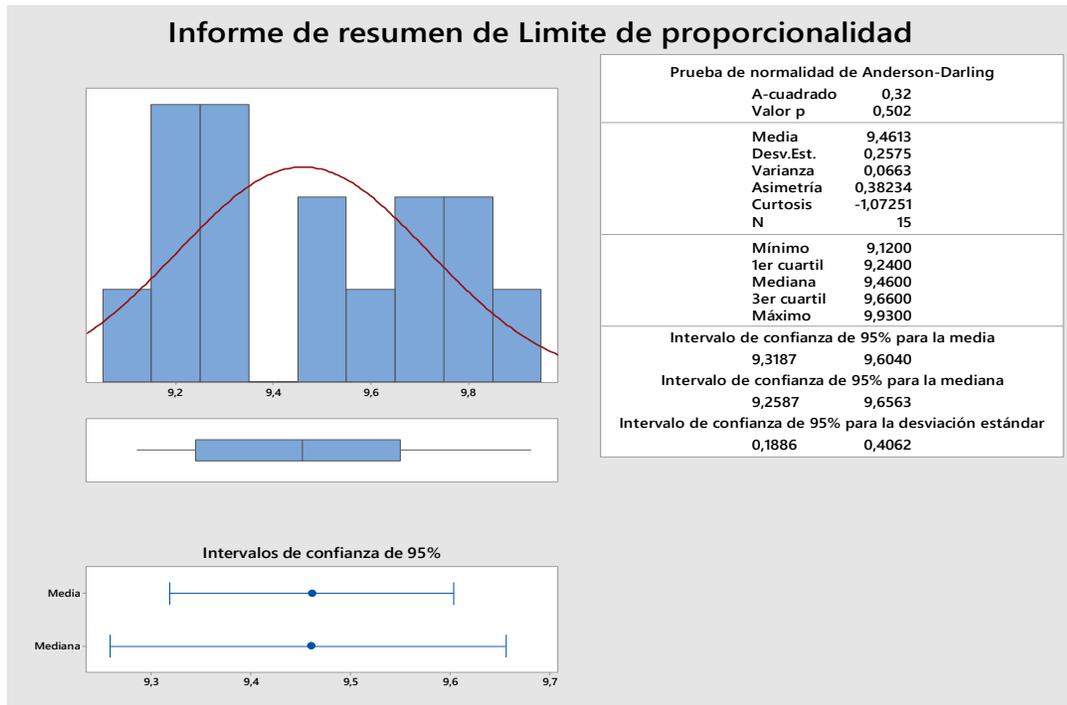
Los valores de límite de proporcionalidad en las probetas cuya composición es 95% plástico – 5% Madera se detalla en la tabla 64.

**Tabla 64**

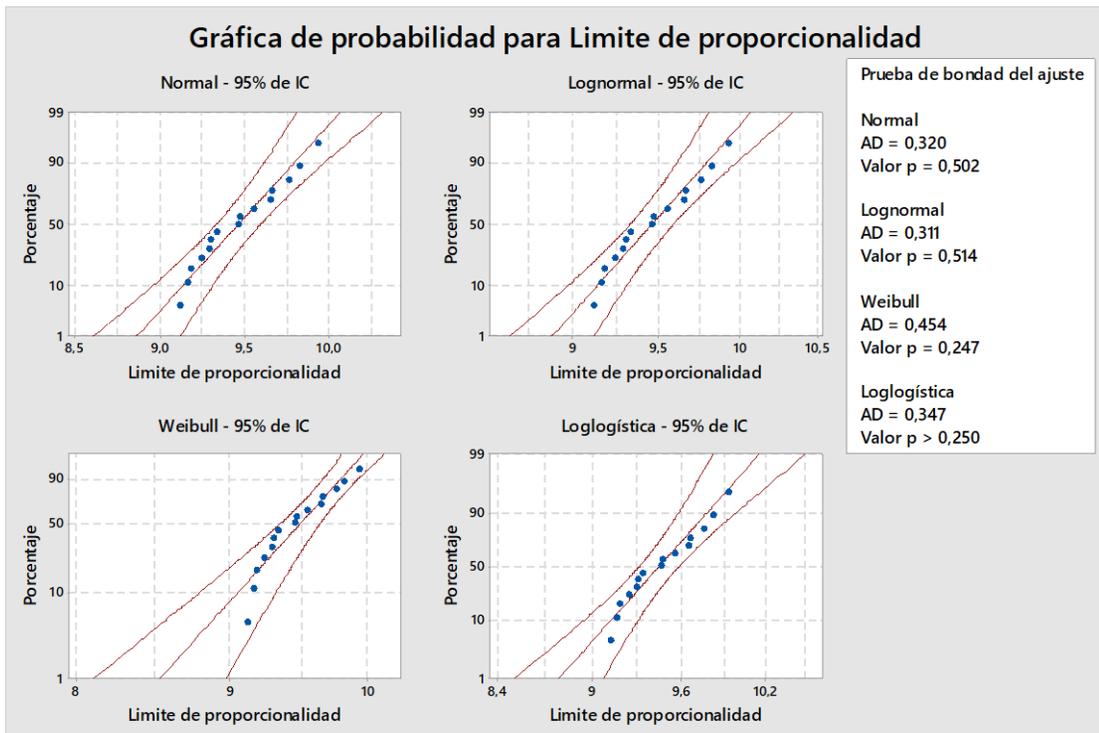
*Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas  
95% Plástico – 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	9,16
<b>2</b>	9,66
<b>3</b>	9,76
<b>4</b>	9,82
<b>5</b>	9,29
<b>6</b>	9,3
<b>7</b>	9,18
<b>8</b>	9,33
<b>9</b>	9,12
<b>10</b>	9,55
<b>11</b>	9,93
<b>12</b>	9,46
<b>13</b>	9,24
<b>14</b>	9,47
<b>15</b>	9,65

De acuerdo a la gráfica 106 podemos observar que el valor de límite de proporcionalidad media para probetas de 95 % Plástico - 5% Madera es de 9.4613 con una desviación estándar de 0.2575. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [9.3187 – 9.6040].

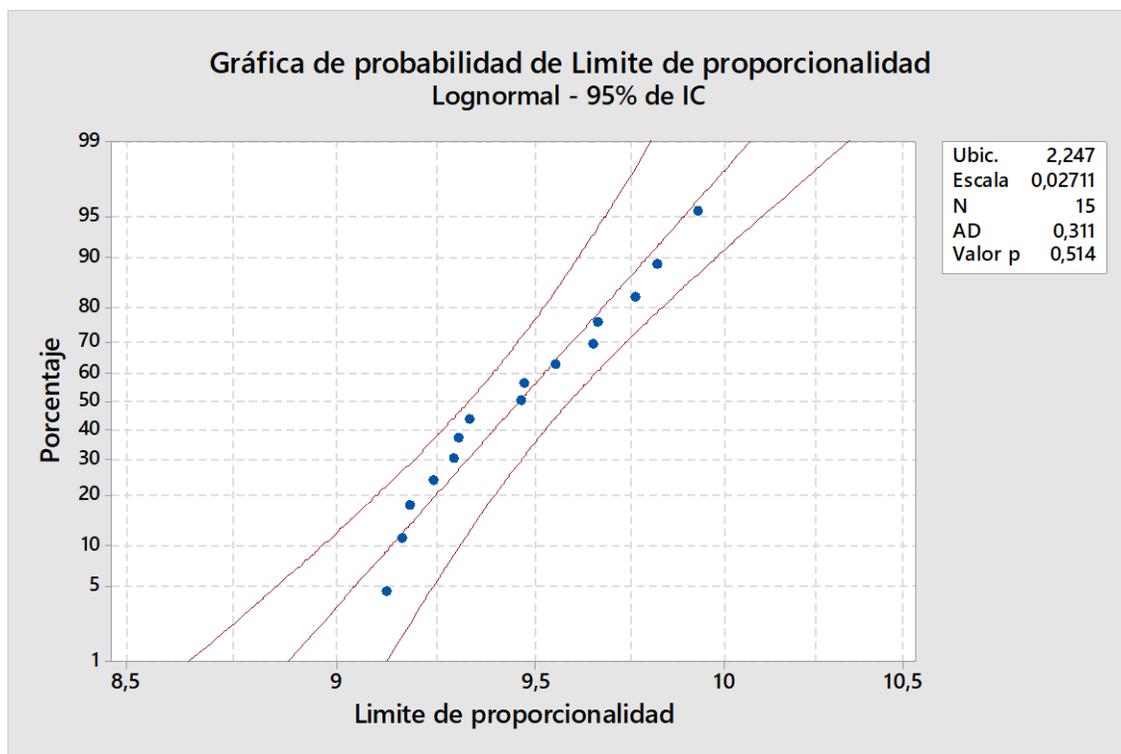


**Figura 106** Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera



**Figura 107** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 95 % Plástico – 5% Madera.

Se puede verificar en la figura 107 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución normal con un valor estadístico  $AD = 0,311$  siendo este el menor de todos.



**Figura 108** Gráfico de Distribución Lognormal de Límite de Proporcionalidad para probetas 95% Plástico 5% Madera.

Podemos observar en la gráfica 108 que los valores del límite de Proporcionalidad están relativamente cerca de la línea de distribución Lognormal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Lognormal.

### 6.2.3. Probetas de 90% Plástico 10 % Madera

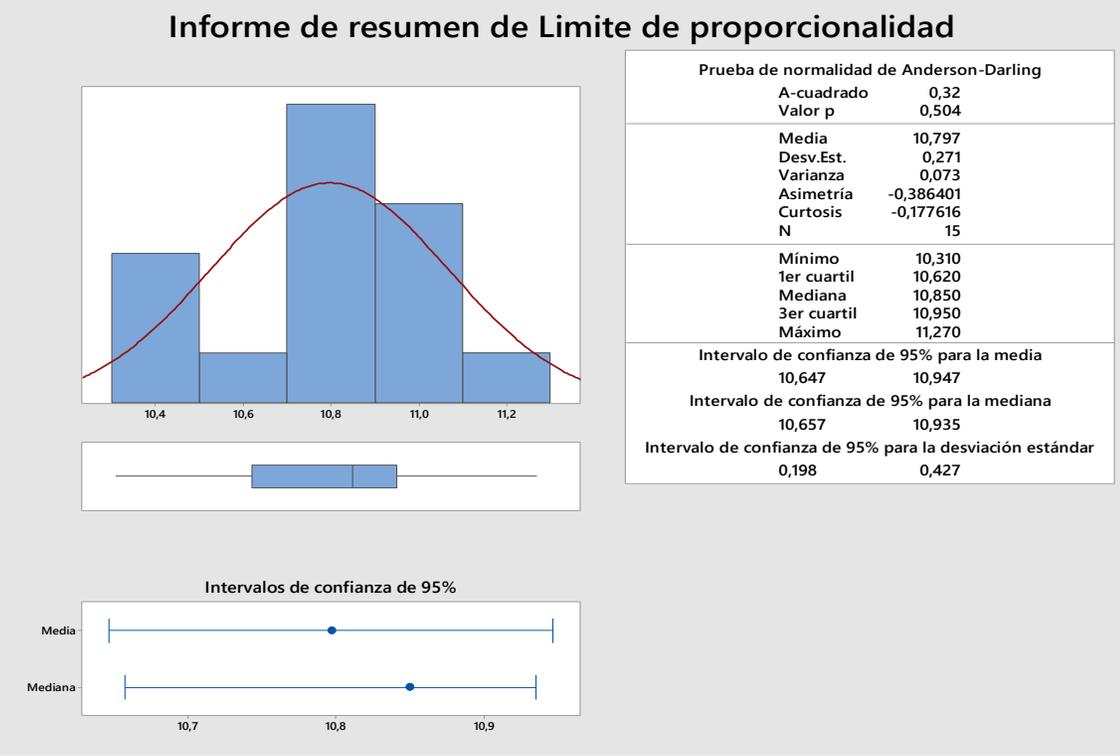
Los valores de límite de proporcionalidad en las probetas cuya composición es 90% plástico – 10% Madera se detalla en la tabla 65.

**Tabla 65**

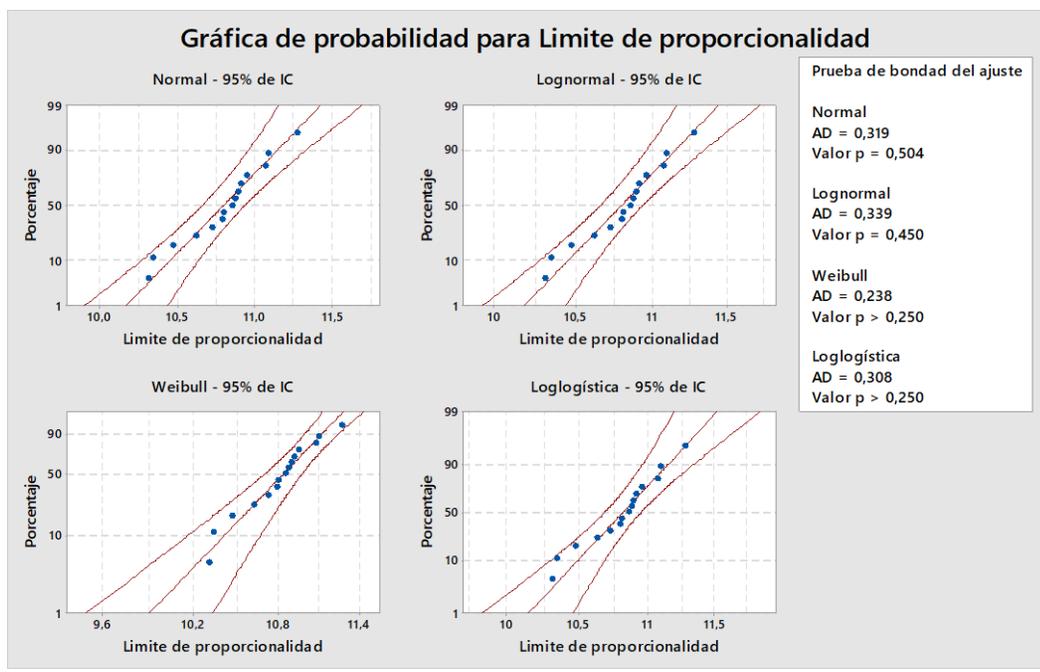
*Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas  
90% Plástico – 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	10,31
<b>2</b>	10,79
<b>3</b>	10,8
<b>4</b>	10,34
<b>5</b>	10,62
<b>6</b>	10,72
<b>7</b>	11,27
<b>8</b>	10,89
<b>9</b>	10,87
<b>10</b>	10,91
<b>11</b>	10,47
<b>12</b>	10,85
<b>13</b>	10,95
<b>14</b>	11,09
<b>15</b>	11,07

De acuerdo a la gráfica 109 podemos observar que el valor de límite de proporcionalidad media para probetas de 90 % Plástico - 10% Madera es de 10.797 con una desviación estándar de 0.271. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [10.647 – 10.947].

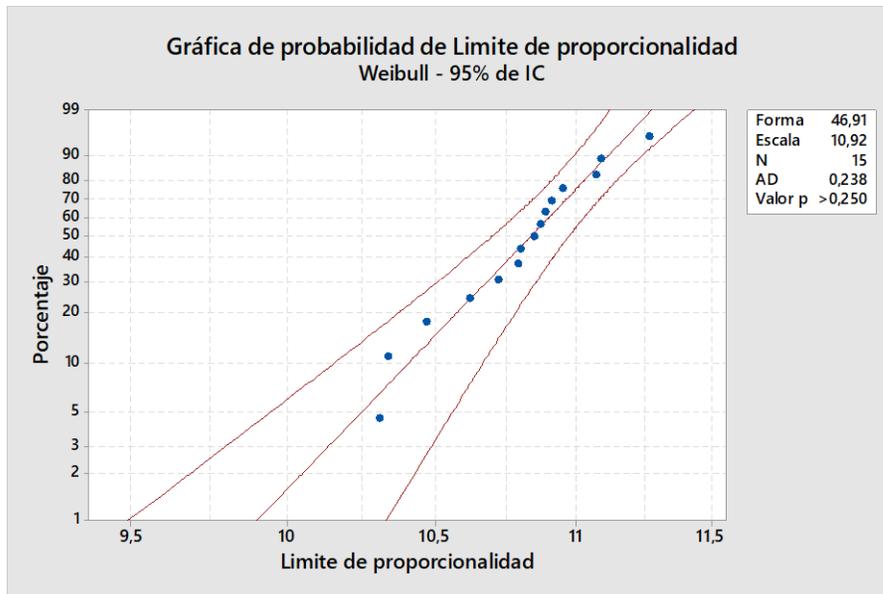


**Figura 109** Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera



**Figura 110** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 90 % Plástico – 10% Madera.

Se puede verificar en la figura 110 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Weibull con un valor estadístico  $AD = 0,238$  siendo este el menor de todos.



**Figura 111** Gráfico de Distribución Weibull de Límite de Proporcionalidad para probetas 90% Plástico - 10% Madera.

Podemos observar en la gráfica 111 que los valores del Límite de Proporcionalidad están relativamente cerca de la línea de distribución Weibull en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución.

#### **6.2.4. Probetas de 85% Plástico 15 % Madera**

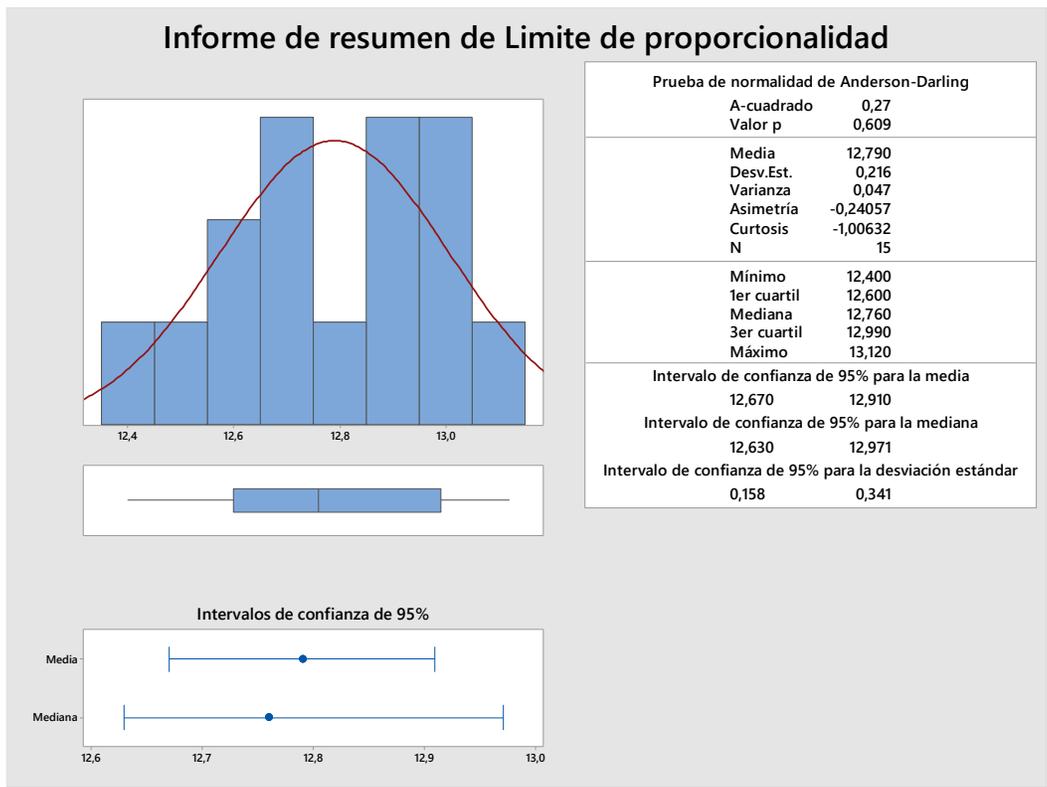
Los valores de límite de proporcionalidad en las probetas cuya composición es 85% plástico – 15% Madera se detalla en la tabla 66.

**Tabla 66**

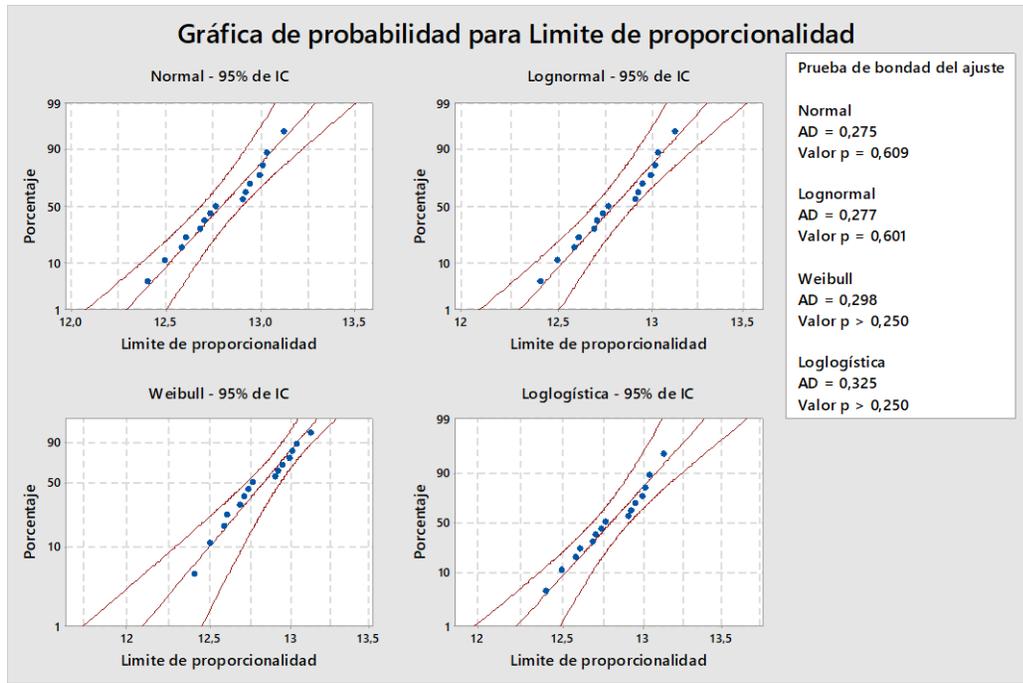
*Valores de Esfuerzo límite de Proporcionalidad para probetas  
85% Plástico – 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Esfuerzo Limite de Proporcionalidad [MPa]</b>
<b>1</b>	12,4
<b>2</b>	12,58
<b>3</b>	12,76
<b>4</b>	13,01
<b>5</b>	12,9
<b>6</b>	12,94
<b>7</b>	13,12
<b>8</b>	12,49
<b>9</b>	12,7
<b>10</b>	12,99
<b>11</b>	12,92
<b>12</b>	12,73
<b>13</b>	13,03
<b>14</b>	12,6
<b>15</b>	12,68

De acuerdo a la gráfica 112 podemos observar que el valor de límite de proporcionalidad media para probetas de 85 % Plástico - 15% Madera es de 12.790 con una desviación estándar de 0.216. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [12.670 – 12.910].

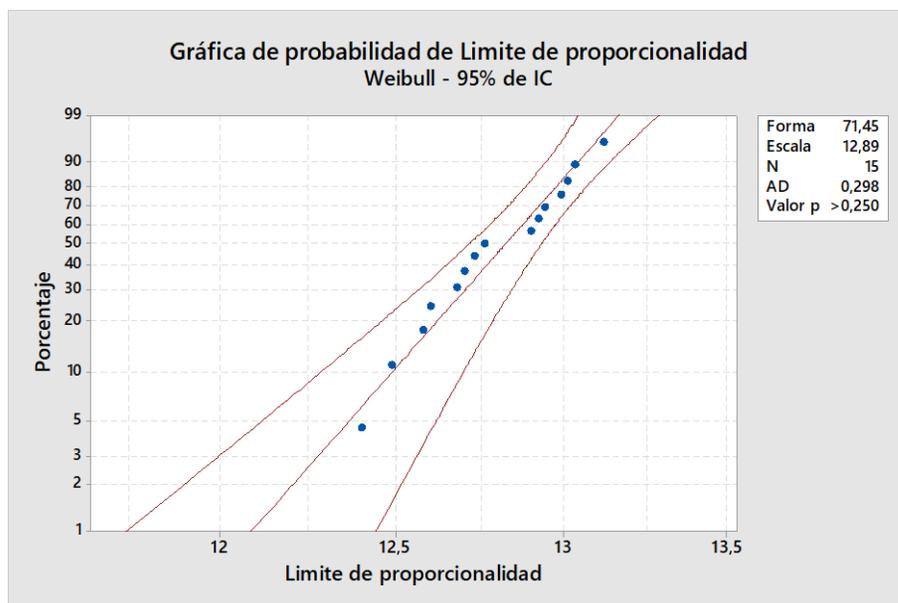


**Figura 112** Gráfica de Resumen estadístico para Límite de Proporcionalidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera



**Figura 113** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Límite de Proporcionalidad de probetas 85 % Plástico – 15% Madera.

Se puede verificar en la figura 113 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Weibull con un valor estadístico  $AD = 0,298$  siendo este el menor de todos.



**Figura 114** Gráfico de Distribución Weibull de Límite de Proporcionalidad para probetas 85% Plástico 15% Madera.

Podemos observar en la gráfica 114 que los valores del Límite de Proporcionalidad están relativamente cerca de la línea de distribución Weibull en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor  $p$  mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Weibull.

### 6.3. Módulo de Elasticidad por Flexión

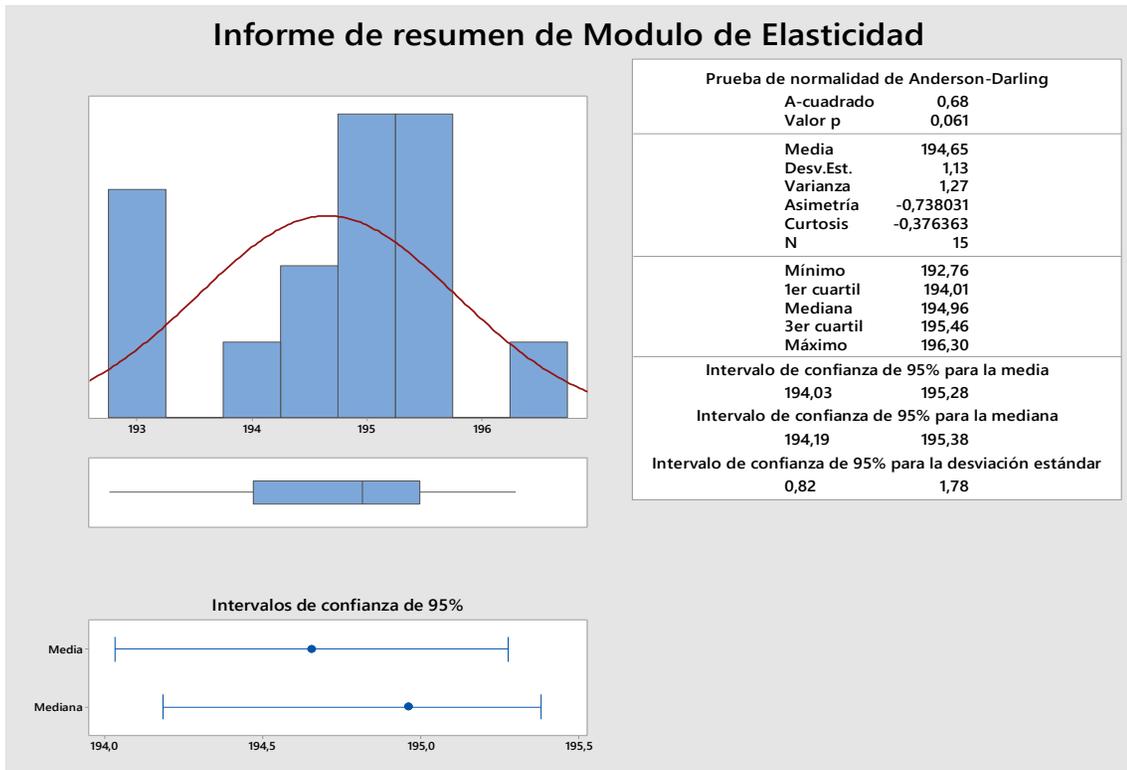
#### 6.3.1. Probetas de 100% plástico

Los valores de Módulo de Elasticidad en las probetas cuya composición es 100% plástico se detalla en la tabla 67.

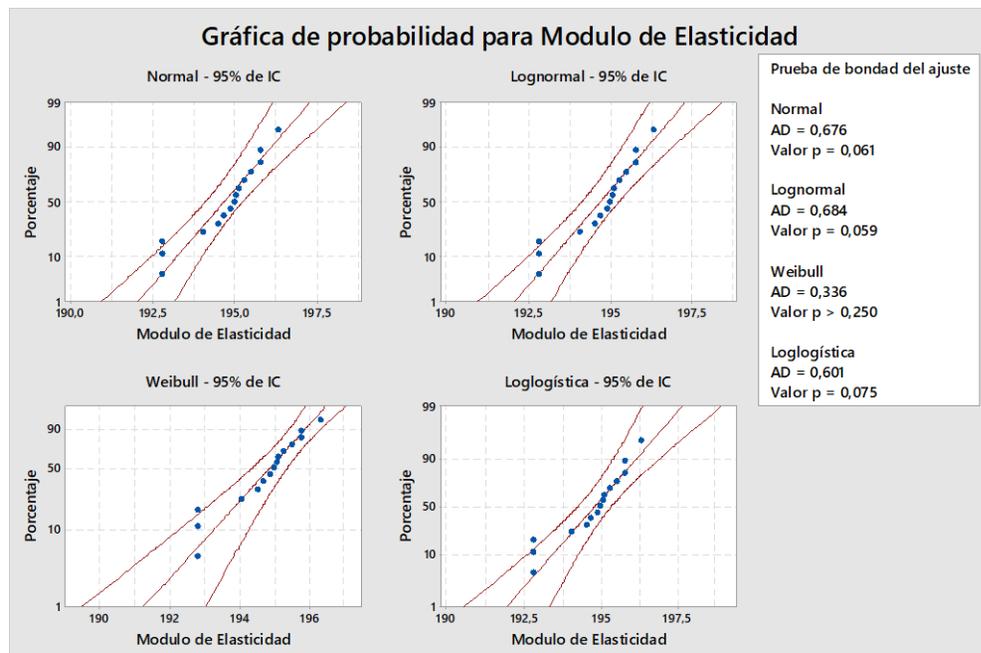
**Tabla 67**  
*Valores de Módulo de Elasticidad para probetas*  
*100% Plástico*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	194,96
<b>2</b>	194,01
<b>3</b>	195,08
<b>4</b>	195,46
<b>5</b>	194,64
<b>6</b>	194,85
<b>7</b>	195,25
<b>8</b>	194,48
<b>9</b>	195,74
<b>10</b>	192,76
<b>11</b>	195,74
<b>12</b>	192,76
<b>13</b>	195,03
<b>14</b>	192,76
<b>15</b>	196,30

De acuerdo a la gráfica 115 podemos observar que el valor de Módulo de Elasticidad media para probetas de 100 % Plástico es de 194.65 [MPa] con una desviación estándar de 1.13. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [194.03 – 195.28].

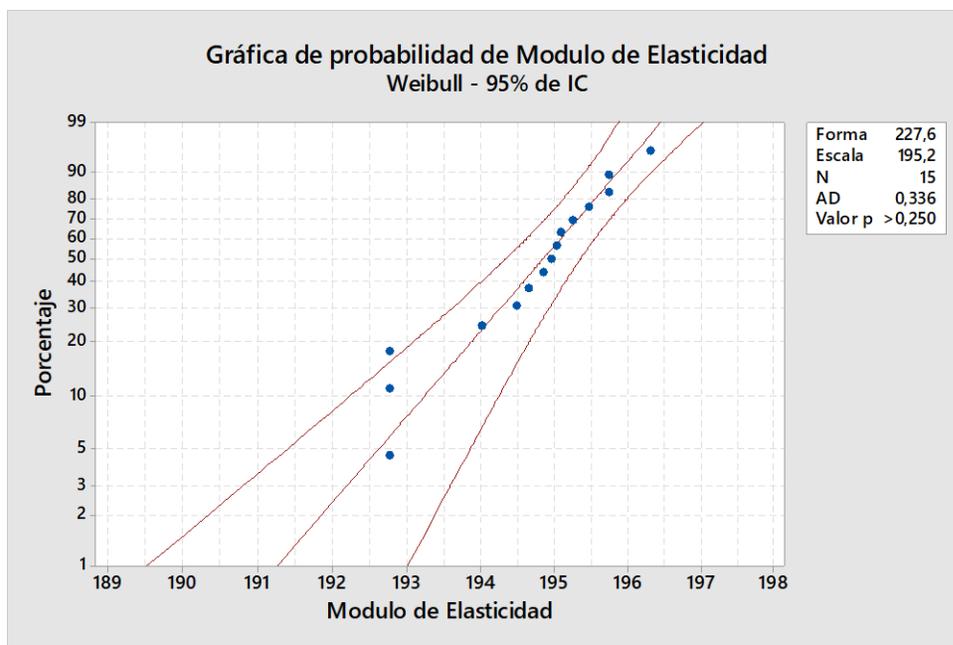


**Figura 115** Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 100% Plástico



**Figura 116** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 100% Plástico.

Se puede verificar en la figura 116 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Weibull con un valor estadístico  $AD = 0,336$  siendo este el menor de todos.



**Figura 117** Gráfico de Distribución Weibull de Módulo de Elasticidad para probetas 100% Plástico.

Podemos observar en la gráfica 117 que los valores del Límite de Proporcionalidad están relativamente cerca de la línea de distribución Weibull en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución Weibull.

### 6.3.2. Probetas de 95% Plástico 5 % Madera

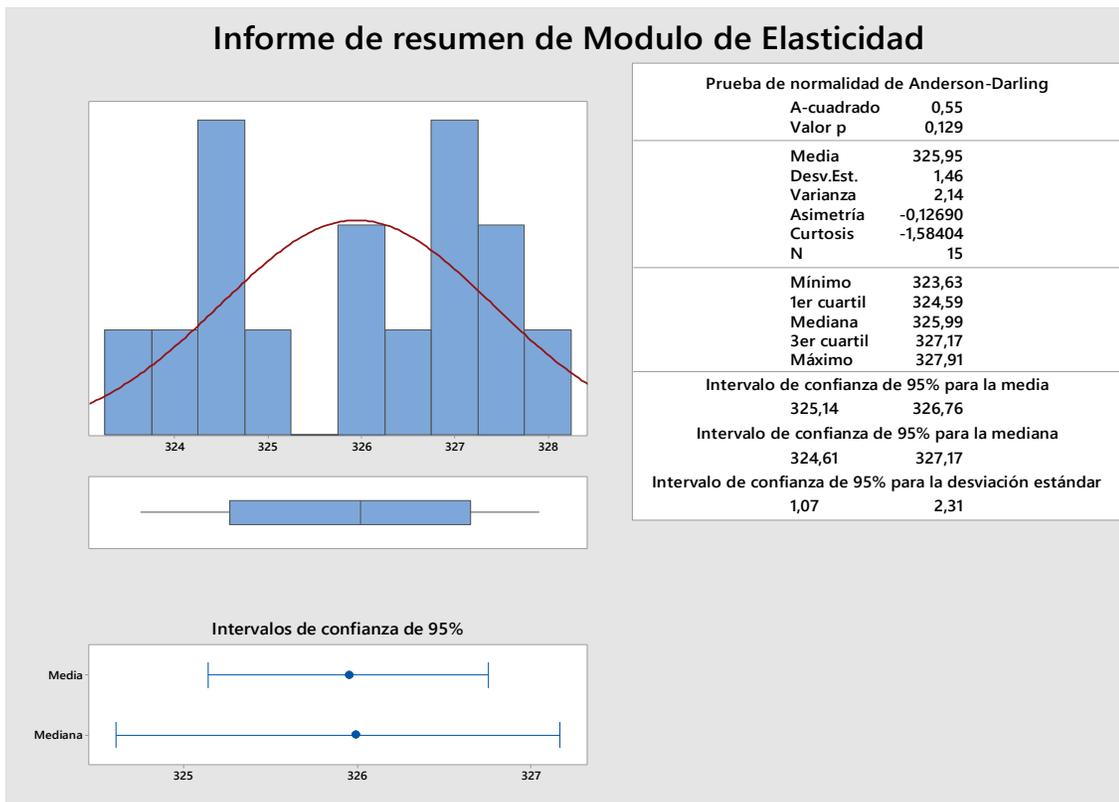
Los valores de Módulo de elasticidad en las probetas cuya composición es 95% plástico – 5% Madera se detalla en la tabla 68.

**Tabla 68**

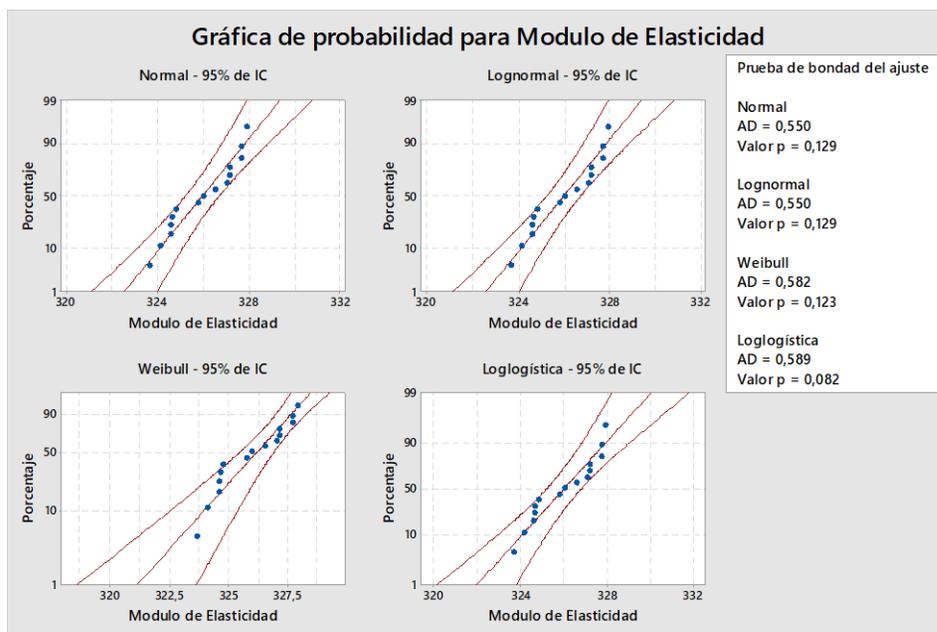
*Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 95% Plástico – 5% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	324,10
<b>2</b>	327,91
<b>3</b>	327,68
<b>4</b>	325,78
<b>5</b>	326,53
<b>6</b>	327,68
<b>7</b>	324,59
<b>8</b>	327,02
<b>9</b>	324,64
<b>10</b>	324,78
<b>11</b>	324,57
<b>12</b>	327,17
<b>13</b>	327,17
<b>14</b>	323,63
<b>15</b>	325,99

De acuerdo a la gráfica 118 podemos observar que el valor de Módulo de Elasticidad media para probetas de 95 % Plástico – 5% Madera es de 325.95 [MPa] con una desviación estándar de 1.46. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [325.14 – 326.76] [MPa].

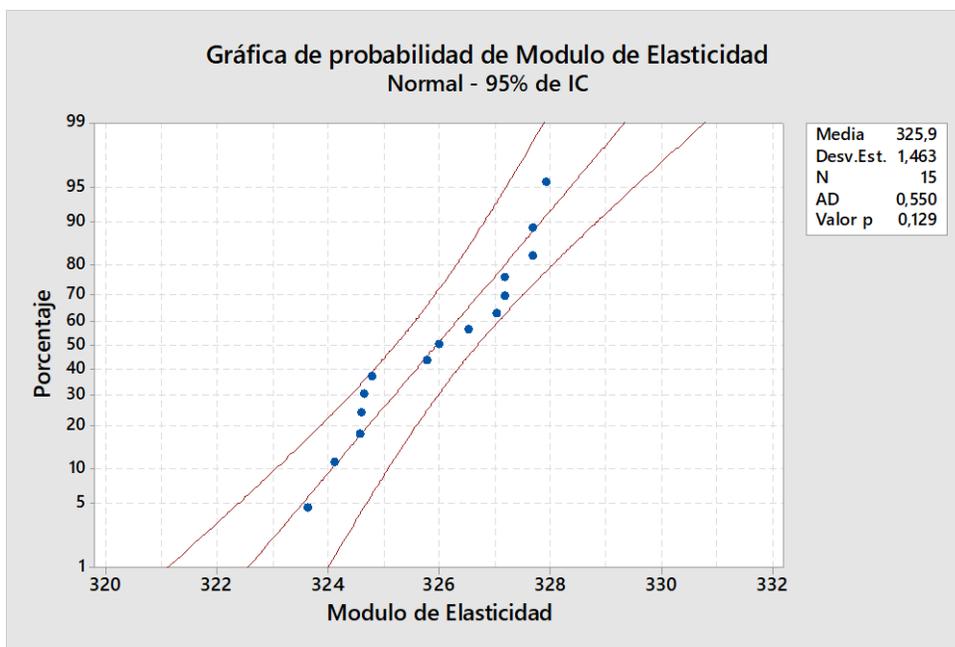


**Figura 118** Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera



**Figura 119** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 95% Plástico – 5% Madera.

Se puede verificar en la figura 119 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución normal con un valor estadístico  $AD = 0,550$  siendo este el menor de todos.



**Figura 120** Gráfico de Distribución Normal de Módulo de Elasticidad para probetas 95% Plástico - 5% Madera.

Podemos observar en la gráfica 120 que los valores del Módulo de Elasticidad están relativamente cerca de la línea de distribución normal en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución.

### 6.3.3. Probetas de 90% Plástico 10 % Madera

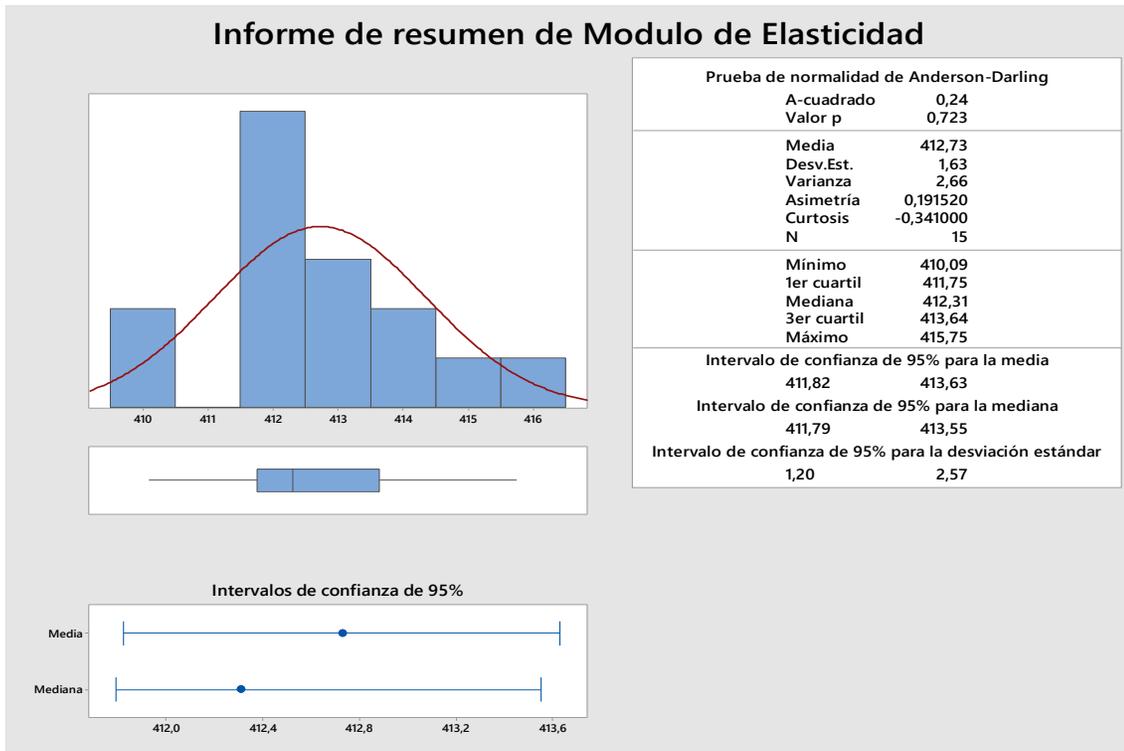
Los valores de Módulo de elasticidad en las probetas cuya composición es 90% plástico – 10% Madera se detalla en la tabla 69.

**Tabla 69**

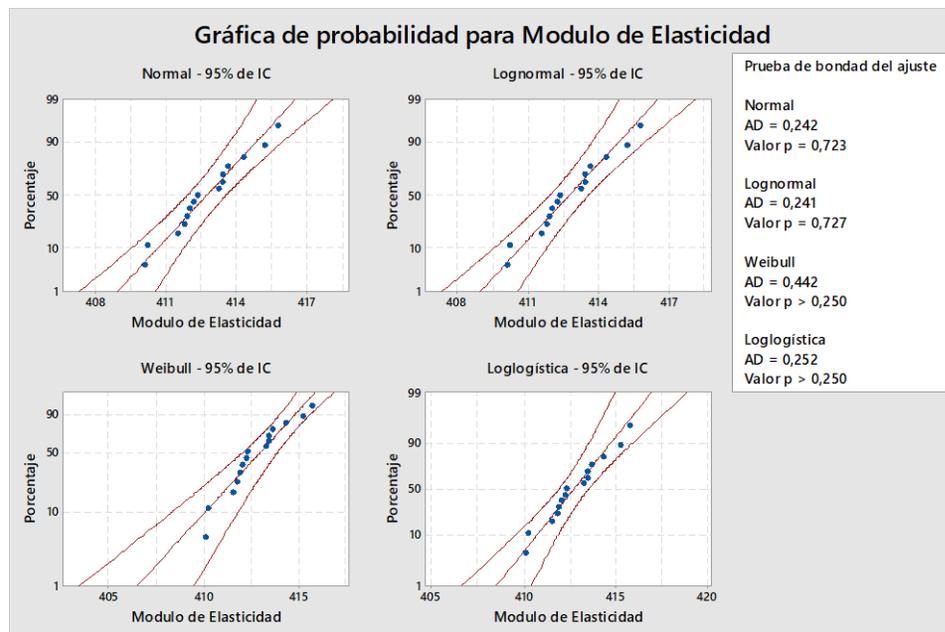
*Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 90% Plástico – 10% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	413,25
<b>2</b>	415,21
<b>3</b>	413,41
<b>4</b>	410,21
<b>5</b>	410,09
<b>6</b>	411,52
<b>7</b>	415,75
<b>8</b>	414,32
<b>9</b>	412,31
<b>10</b>	411,86
<b>11</b>	412,19
<b>12</b>	412,01
<b>13</b>	413,64
<b>14</b>	411,75
<b>15</b>	413,41

De acuerdo a la gráfica 121 podemos observar que el valor de Módulo de Elasticidad media para probetas de 90 % Plástico – 10% Madera es de 412.73 [MPa] con una desviación estándar de 1.63. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [411.82 – 413.63] [MPa].

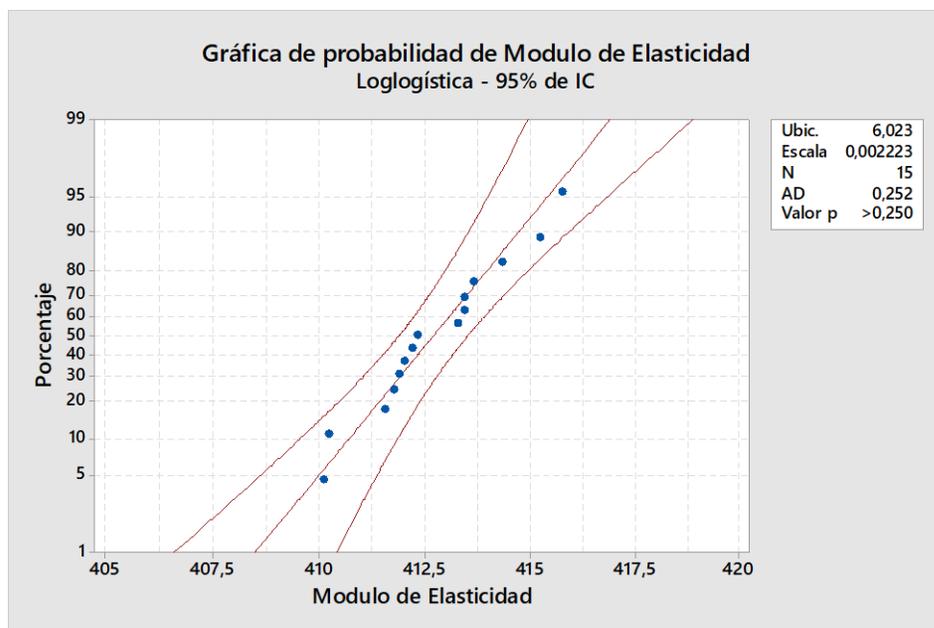


**Figura 121** Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera



**Figura 122** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 90% Plástico – 10% Madera.

Se puede verificar en la figura 122 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Loglogística con un valor estadístico  $AD = 0,252$  siendo este el menor de todos.



**Figura 123** Gráfico de Distribución Log Logística de Módulo de Elasticidad para probetas 90% Plástico - 10% Madera.

Podemos observar en la gráfica 123 que los valores del Módulo de Elasticidad están relativamente cerca de la línea de distribución Loglogística en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución.

#### 6.3.4. Probetas de 85% Plástico 15 % Madera

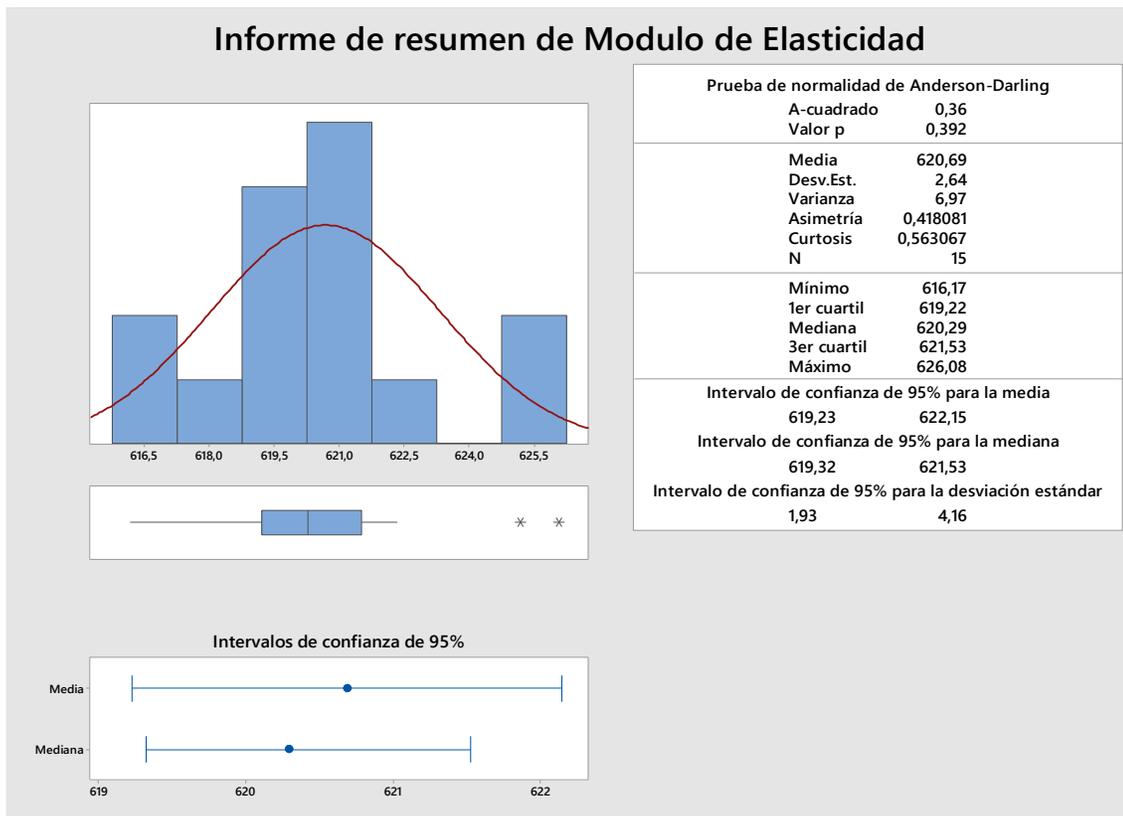
Los valores de Módulo de elasticidad en las probetas cuya composición es 85% plástico – 15% Madera se detalla en la tabla 70.

**Tabla 70**

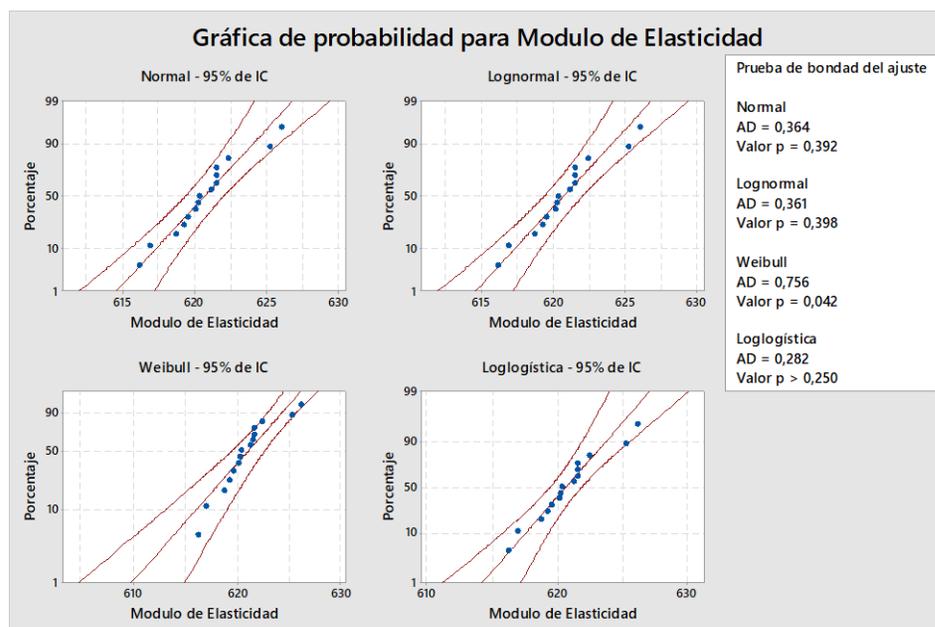
*Valores de Módulo de Elasticidad para probetas 85% Plástico – 15% Madera*

<b>Probetas</b>	<b>Módulo de Elasticidad [Mpa]</b>
<b>1</b>	619,22
<b>2</b>	621,48
<b>3</b>	625,19
<b>4</b>	620,20
<b>5</b>	620,29
<b>6</b>	621,53
<b>7</b>	619,50
<b>8</b>	621,53
<b>9</b>	618,70
<b>10</b>	616,87
<b>11</b>	626,08
<b>12</b>	621,13
<b>13</b>	616,17
<b>14</b>	622,35
<b>15</b>	620,08

De acuerdo a la gráfica 124 podemos observar que el valor de Módulo de Elasticidad media para probetas de 85 % Plástico – 15% Madera es de 620.69 [MPa] con una desviación estándar de 2.64. El intervalo de confianza de 95% para la media es: [619.23 – 622.15] [MPa].

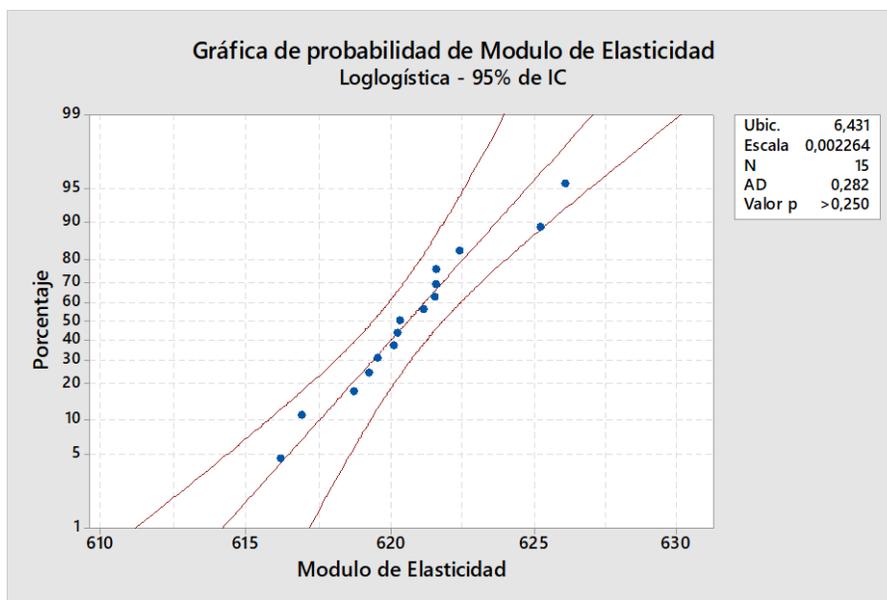


**Figura 124** Gráfica de Resumen estadístico para Módulo de Elasticidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera



**Figura 125** Estadígrafos Anderson – Darling de distribución Probabilística para Módulo de Elasticidad de probetas 85% Plástico – 15% Madera.

Se puede verificar en la figura 125 que de acuerdo a los valores de Anderson- Darling los datos se ajustan a una distribución Loglogística con un valor estadístico  $AD = 0,282$  siendo este el menor de todos.



**Figura 126** Gráfico de Distribución Normal de Módulo de Elasticidad para probetas 85% Plástico - 15% Madera.

Podemos observar en la gráfica 126 que los valores del Módulo de Elasticidad están relativamente cerca de la línea de distribución Loglogística en la cual los datos son más ajustados, confirmando que al tener un valor p mayor al nivel de confianza de 0.05 los datos siguen la distribución.

#### 6.4. Resultados Análisis DSC

Se realizó mediante convenio con el Centro de Investigaciones Aplicado a Polímeros (CIAP) de la Escuela Politécnica Nacional el análisis DSC para diferentes muestras obtenidas por extrusión en el presente proyecto.

Los equipos y materiales utilizados para este análisis se presentan en la tabla 71.

**Tabla 71**

*Materiales y Equipos Utilizados en Análisis DSC*

<b>Materiales y Equipos</b>	<b>Ilustración</b>
<p><b>Máquina de Análisis DSC:</b>            Marca: NETZSCH            Modelo: DSC 204 F1 Phoenix</p>	
<p><b>Sensor Tau:</b>            Ofrece una alta sensibilidad            Calorimétrica para efectos            térmicos.</p>	
<p><b>Balanza Analítica de Laboratorio:</b>            Marca: Shimadzu            Modelo: AEL 40-SM</p>	
<p><b>PAN:</b>            Porta Muestras de Aluminio            Hermético utilizado para análisis            DSC.</p>	
<p><b>Muestra de Material Extruido:</b>            El tamaño de la muestra para            análisis debe ser al menos del            diámetro de la base del PAN            aproximadamente 5mm.</p>	

Para el cálculo del Porcentaje de Cristalinidad de la muestra se utiliza la ecuación descrita en el libro “THERMAL ANALYSIS OF PLASTICS”. (Gottfried, Riedel, & Trawiel, 1999)

***Ecuación 11 Porcentaje de Cristalización***

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \text{ [%]}$$

Donde:

$W_c$ : *Porcentaje de Cristalinidad*

$\Delta H_m$ : *Calor de Fusión experimental*

$\Delta H_m^0$  = *Calor de fusión para el material 100% Cristalino*

En el proyecto se utilizó Polietileno de alta densidad por lo que el valor de calor de fusión en un porcentaje 100% cristalino es:  $293 \frac{J}{g}$  (Gottfried, Riedel, & Trawiel, 1999).

El valor experimental del calor de fusión se identifica en un termograma de análisis DSC, siendo este el área bajo la curva del pico de cristalización.

#### **6.4.1. Muestras 100% Plástico**

Para las muestras de 100% Plástico se puede observar en la figura 127 que existen dos picos de cristalización en  $114.2^\circ C$  y  $133.9^\circ C$  correspondientemente, el primero se atribuye a que puede existir en la muestra un porcentaje de polietileno de baja densidad debido a que el material utilizado en la extrusión es reciclado, el pico más pronunciado corresponde al polietileno de alta densidad.

El área bajo la curva tiene un valor de  $79.97 \left[ \frac{J}{g} \right]$ , los límites para poder determinar el área bajo la curva se toman en distintos puntos en donde la línea de análisis se estabiliza.

<b>Instrument:</b>	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	<b>Sample name:</b>	PE 100
<b>Project:</b>		<b>Sample Mass:</b>	10.70 mg
<b>Filename:</b>	DC-OOTI0386-2018 PE100.ngb-sd7	<b>Reference name:</b>	
<b>Sample identity:</b>	DC-OTI0386	<b>Reference Mass:</b>	0 mg
<b>Date/Time:</b>	26/11/2018 10:14:32	<b>Reference Crucible Mass:</b>	39.42 mg
<b>End Date/Time:</b>	26/11/2018 10:34:37	<b>Material:</b>	
<b>Laboratory:</b>	CIAP	<b>Temp.Calib.:</b>	Cal sep 2016.ngb-td7
<b>Operator:</b>	Iván Ch	<b>Sensitivity:</b>	Cal marzo 2012 entalpia.ngb-ed7
<b>Mode:</b>	DSC	<b>Crucible:</b>	Pan Al, open
<b>Measurement Type:</b>	Sample		

**Remark:**

<b>Furnace:</b>	Standard DSC 204F1	<b>Furnace TC:</b>	E
<b>Sample carrier:</b>	DSC 204F1 t-sensor	<b>Sample TC:</b>	E
<b>Measurement End:</b>	External reset	<b>Crucible Mass:</b>	39.59 mg

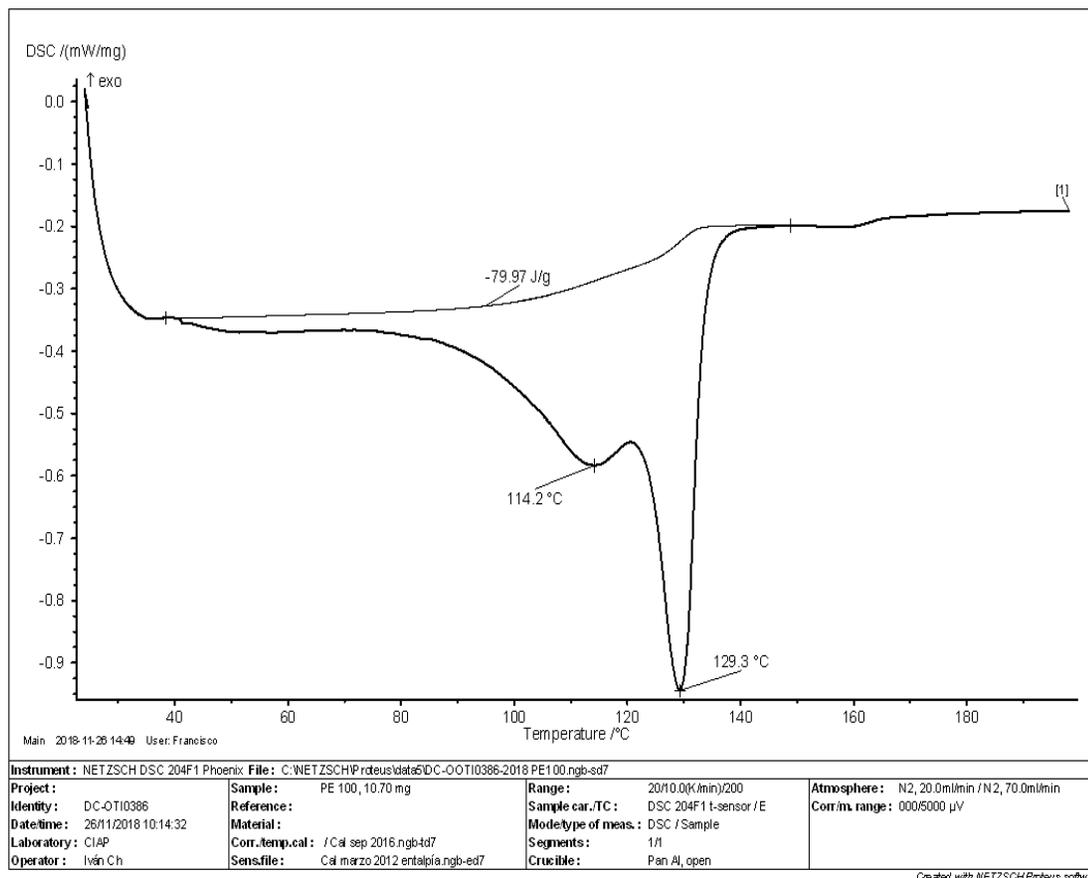
**Purge 2 MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**  
**Protective MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

## Start criteria

**Reset after maximum standby time:** No

## List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:18	1	20.0	70.0	1	0
2	Isothermal	200.0		50.00	00:05	1	20.0	70.0	1	0
3	Dynamic	50.0	10.000	300.00	00:15	1	20.0	70.0	1	0
4	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:15	1	20.0	70.0	1	0
---	Emergency	210.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:04	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0



**Figura 127** Resultados Análisis DSC para Muestras 100% Plástico  
Fuente: CIAP – EPN

El porcentaje de Cristalización de una muestra 100% Plástico es:

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 [\%]$$

$$W_c = \frac{79.97}{293} \times 100 [\%] = 27.29\%$$

De acuerdo con el valor de cristalinidad calculado se puede evidenciar que es un 27.29% Cristalino con respecto a un polietileno de alta densidad puro.

### 6.4.2. Muestras 95% Plástico – 5% Madera

Para las muestras de 95% Plástico – 5% Madera se puede observar en la figura 128 que el pico de cristalización es  $131.3^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al polietileno de alta densidad.

El área bajo la curva tiene un valor de  $88.76 \left[ \frac{\text{J}}{\text{g}} \right]$ , los límites para poder determinar el área

bajo la curva se toman en distintos puntos en donde la línea de análisis se estabiliza.

<b>Instrument:</b>	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	<b>Sample name:</b>	PE M5 REP
<b>Project:</b>		<b>Sample Mass:</b>	14.16 mg
<b>Filename:</b>	DC-OTI0368-2018 PE M5 REP.ngb-sd7	<b>Reference name:</b>	
<b>Sample identity:</b>	DC-OTI0368-2018	<b>Reference Mass:</b>	0 mg
<b>Date/Time:</b>	26/11/2018 12:07:56	<b>Reference Crucible Mass:</b>	39.42 mg
<b>End Date/Time:</b>	26/11/2018 12:25:45	<b>Material:</b>	
<b>Laboratory:</b>	CIAP	<b>Temp.Calib.:</b>	Cal sep 2016.ngb-td7
<b>Operator:</b>	Iván Ch	<b>Sensitivity:</b>	Cal marzo 2012 entalpia.ngb-ed7
<b>Mode:</b>	DSC	<b>Crucible:</b>	Pan Al, open
<b>Measurement Type:</b>	Sample		

#### Remark:

<b>Furnace:</b>	Standard DSC 204F1	<b>Furnace TC:</b>	E
<b>Sample carrier:</b>	DSC 204F1 t-sensor	<b>Sample TC:</b>	E
<b>Measurement End:</b>	Normal end	<b>Crucible Mass:</b>	39.98 mg

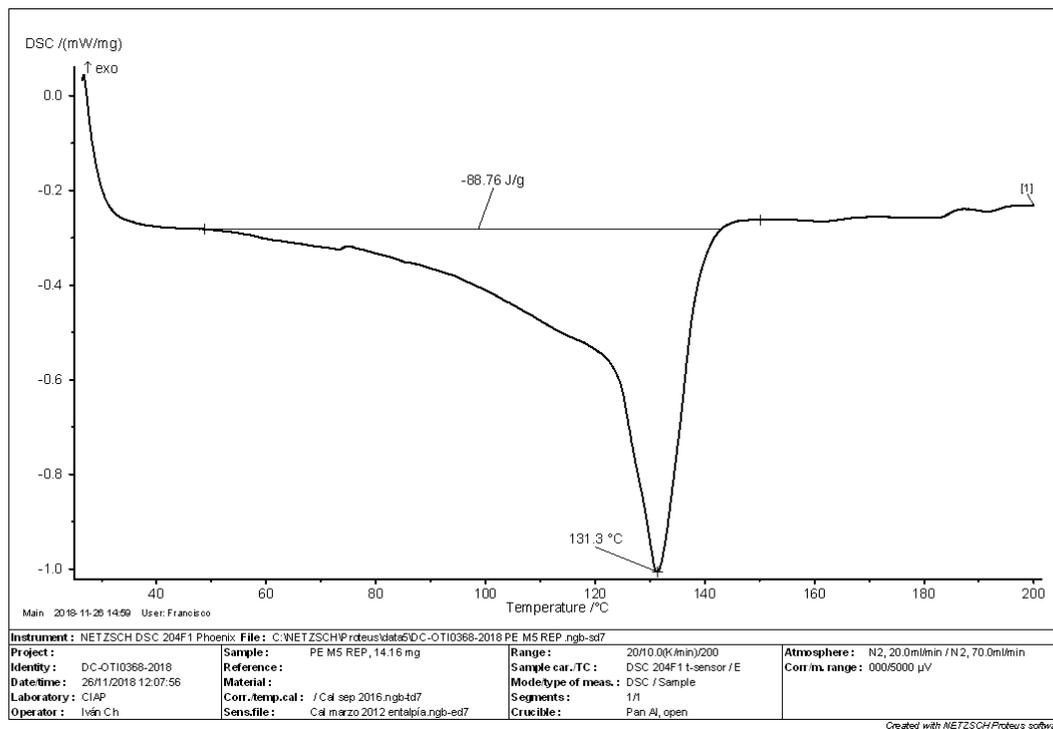
**Purge 2 MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**  
**Protective MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

#### Start criteria

**Reset after maximum standby time:** No

#### List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:18	1	20.0	70.0	0	0
---	Emergency	210.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:04	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0



**Figura 128** Resultados Análisis DSC para Muestras 95% Plástico – 5% Madera  
Fuente: CIAP – EPN

El porcentaje de Cristalización de una muestra 95% Plástico – 5% Madera es:

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 [\%]$$

$$W_c = \frac{88.76}{293} \times 100 [\%] = 30.29\%$$

De acuerdo con el valor de cristalinidad calculado se puede evidenciar que tiene un mayor porcentaje con respecto a una muestra de 100% plástico esto se debe a que al existir en la composición una cierta cantidad de madera el proceso de enfriamiento permite que las partículas puedan ordenarse de mejor forma y aumentar su cristalinidad.

### 6.4.3. Muestras 90% Plástico – 10% Madera

Para las muestras de 90% Plástico – 10% Madera se puede observar en la figura 129 que el pico de cristalización es  $131.3^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al polietileno de alta densidad.

El área bajo la curva tiene un valor de  $62.83 \left[ \frac{\text{J}}{\text{g}} \right]$ , los límites para poder determinar el área

bajo la curva se toman en distintos puntos en donde la línea de análisis se estabiliza.

<b>Instrument:</b>	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	<b>Sample name:</b>	PE M10
<b>Project:</b>		<b>Sample Mass:</b>	17.37 mg
<b>Filename:</b>	DC-OTI0368-2018 PE M10.ngb-sd7	<b>Reference name:</b>	
<b>Sample identity:</b>	DC-OTI0368-2018	<b>Reference Mass:</b>	0 mg
<b>Date/Time:</b>	26/11/2018 12:35:34	<b>Reference Crucible Mass:</b>	39.42 mg
<b>End Date/Time:</b>	26/11/2018 12:53:25	<b>Material:</b>	
<b>Laboratory:</b>	CIAP	<b>Temp.Calib.:</b>	Cal sep 2016.ngb-td7
<b>Operator:</b>	Iván Ch	<b>Sensitivity:</b>	Cal marzo 2012 entalpia.ngb-ed7
<b>Mode:</b>	DSC	<b>Crucible:</b>	Pan Al, open
<b>Measurement Type:</b>	Sample		

#### Remark:

<b>Furnace:</b>	Standard DSC 204F1	<b>Furnace TC:</b>	E
<b>Sample carrier:</b>	DSC 204F1 t-sensor	<b>Sample TC:</b>	E
<b>Measurement End:</b>	Normal end	<b>Crucible Mass:</b>	39.48 mg

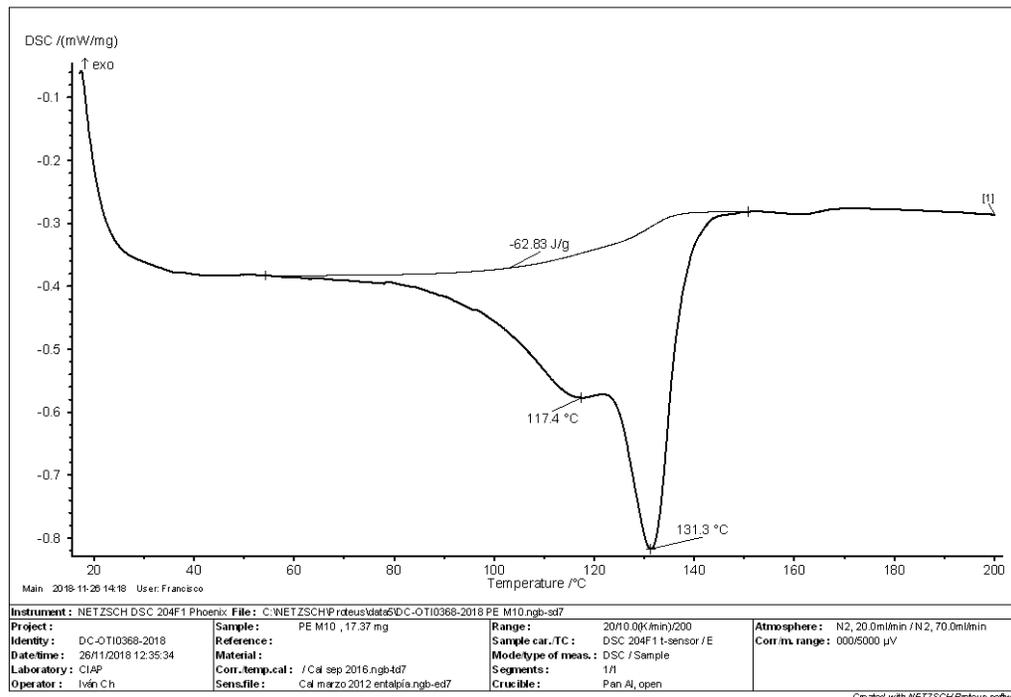
**Purge 2 MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**  
**Protective MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

#### Start criteria

**Reset after maximum standby time:** No

#### List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:18	1	20.0	70.0	0	0
---	Emergency	210.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:04	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0



**Figura 129** Resultados Análisis DSC para Muestras 90% Plástico – 10% Madera  
Fuente: CIAP - EPN

El porcentaje de Cristalización de una muestra 90% Plástico – 10% Madera es:

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 [\%]$$

$$W_c = \frac{62.83}{293} \times 100 [\%] = 21.44\%$$

De acuerdo con el valor de cristalinidad calculado se puede evidenciar que tiene un menor porcentaje con respecto a las muestras anteriores, esto se debe a que el momento de tomar la muestra se tomó una sección en donde existía mayor porcentaje de fibras que de plástico, dando lugar a que el pico de cristalinidad sea menor, en comparación con las muestras anteriormente ensayadas.

#### 6.4.4. Muestras 85% Plástico – 15% Madera

Para las muestras de 85% Plástico – 15% Madera se puede observar en la figura 130 que el pico de cristalización es  $131.9^{\circ}\text{C}$ , correspondiente al polietileno de alta densidad.

El área bajo la curva tiene un valor de  $109 \left[ \frac{\text{J}}{\text{g}} \right]$ , los límites para poder determinar el área

bajo la curva se toman en distintos puntos en donde la línea de análisis se estabiliza.

<b>Instrument:</b>	NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix	<b>Sample name:</b>	PE M15 REP
<b>Project:</b>		<b>Sample Mass:</b>	26.66 mg
<b>Filename:</b>	DC-OTI0368-2018 M15 REP.ngb-sd7	<b>Reference name:</b>	
<b>Sample identity:</b>	DC-OTI01368-2018	<b>Reference Mass:</b>	0 mg
<b>Date/Time:</b>	26/11/2018 15:15:37	<b>Reference Crucible Mass:</b>	39.42 mg
<b>End Date/Time:</b>	26/11/2018 15:33:27	<b>Material:</b>	
<b>Laboratory:</b>	CIAP	<b>Temp.Calib.:</b>	Cal sep 2016.ngb-td7
<b>Operator:</b>	Iván Ch	<b>Sensitivity:</b>	Cal marzo 2012 entalpia.ngb-ed7
<b>Mode:</b>	DSC	<b>Crucible:</b>	Pan Al, open
<b>Measurement Type:</b>	Sample		

#### Remark:

<b>Furnace:</b>	Standard DSC 204F1	<b>Furnace TC:</b>	E
<b>Sample carrier:</b>	DSC 204F1 t-sensor	<b>Sample TC:</b>	E
<b>Measurement End:</b>	Normal end	<b>Crucible Mass:</b>	39.53 mg

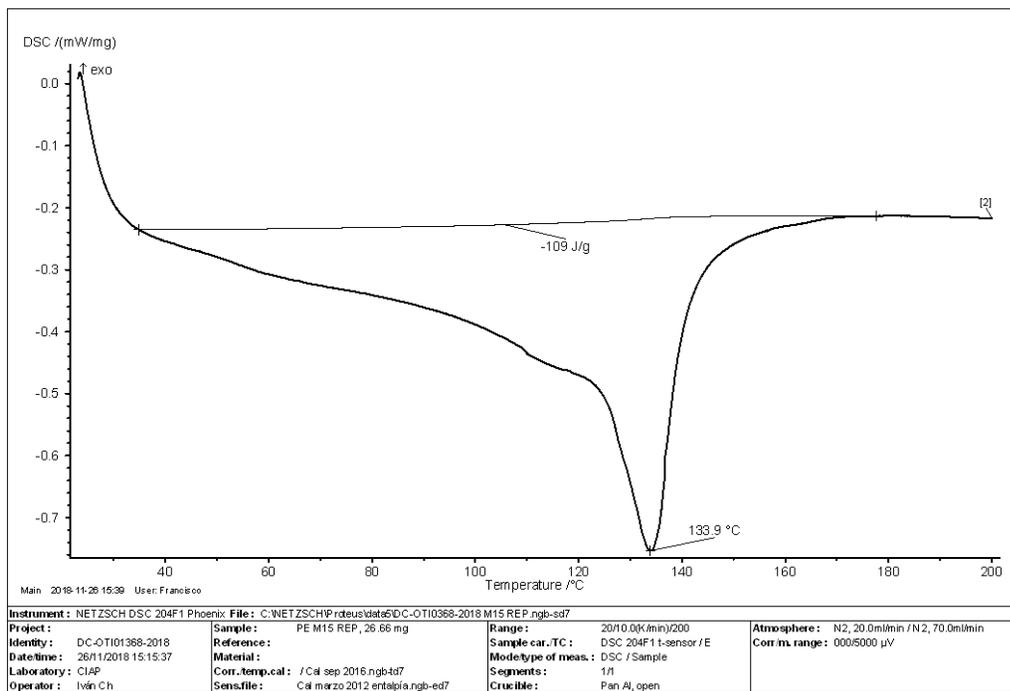
**Purge 2 MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**  
**Protective MFC:** NITROGEN **Flow range:** 250.0 ml/min **predefined**

#### Start criteria

**Reset after maximum standby time:** No

#### List of temperature steps:

Num	Mode	Temp. °C	HR K/min	Acq.Rate pts/min	Duration hh:mm	STC	P2:N2	PG:N2	IC	BC
---	Stand-by heating	20.0	40.000			1	20.0	70.0	1	0
---	Stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0
1	Dynamic	200.0	10.000	300.00	00:18	1	20.0	70.0	0	0
---	Emergency	210.0					20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by heating	20.0	40.000		00:04	1	20.0	70.0	1	0
---	Final stand-by isothermal	20.0			02:00	1	20.0	70.0	1	0



**Figura 130** Resultados Análisis DSC para Muestras 85% Plástico – 15% Madera  
Fuente: CIAP – EPN

El porcentaje de Cristalización de una muestra 85% Plástico – 15% Madera es:

$$W_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100 \text{ [%]}$$

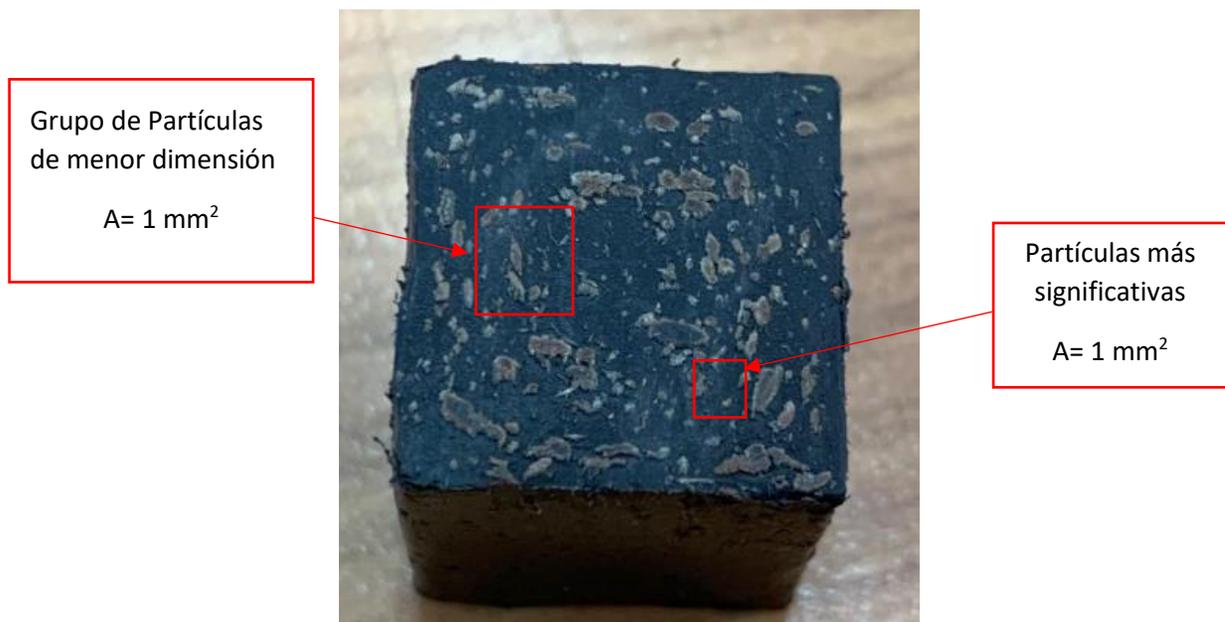
$$W_c = \frac{109}{293} \times 100 \text{ [%]} = 37.201\%$$

De acuerdo con el valor de cristalinidad calculado se puede evidenciar que tiene un porcentaje de cristalinidad mucho más alto con respecto a las muestras anteriores, al tener mayor porcentaje de madera se puede tener un mejor enfriamiento favoreciendo a que las partículas de polietileno se puedan organizar mejor.

## 6.5. Distribución de las partículas en la matriz polimérica

Para determinar el porcentaje de área de partículas distribuidas en la matriz polimérica se obtuvo una aproximación de las dimensiones de las partículas más significativas mediante el uso de fotografías en las cuales se pudo evidenciar que las partículas con mayor dimensión tiene un área promedio de  $1\text{mm}^2$

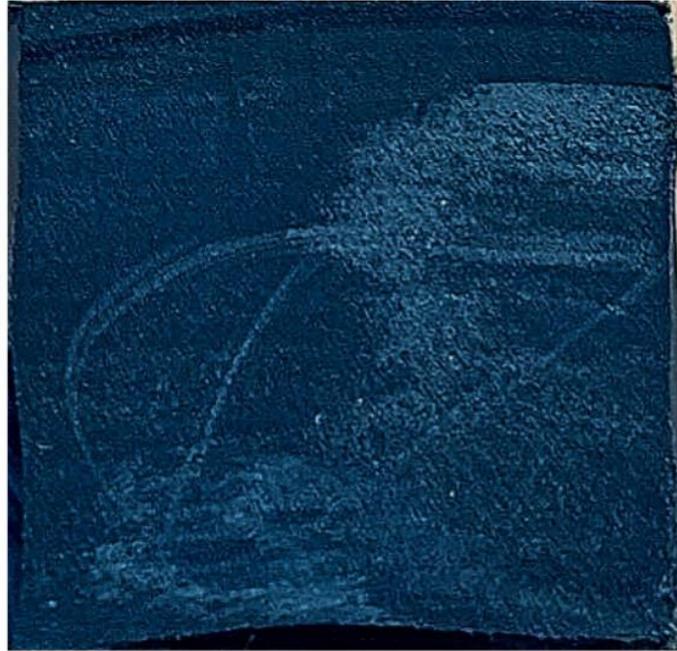
Sin embargo, no todas tienen el mismo tamaño por lo cual se asume grupos de pequeñas partículas que sumando su área se asemejen al área establecida de  $1\text{mm}^2$  para el análisis como se muestra en la figura 131.



**Figura 131** Fotografía de la sección de la probeta 100% Plástico

### 6.5.1. Muestras 100% Plástico

En el caso de la probeta de 100% plástico se tiene un área sin distribución de partículas de eucalipto como se muestra en la figura 132.



*Figura 132* Fotografía de la sección de la probeta 100% Plástico

#### **6.5.2. Muestras 95% Plástico – 5% Madera**

Para la muestra se contabilizó en la figura 133 un total de 19 partículas entre las cuales están las significativas y los grupos de partículas menores, teniendo un área de partículas de eucalipto de  $19\text{mm}^2$ .

$$\text{Área de la sección} = 289 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área del Eucalipto} = 19 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área del Polietileno} = \text{Área de la Sección} - \text{Área del Eucalipto}$$

$$\text{Área del Polietileno} = 270 \text{ mm}^2$$

$$\text{Porcentaje de área de polietileno} = \frac{270}{289} * 100 = 93.43\%$$

$$\text{Porcentaje de área de partículas de Eucalipto} = \frac{19}{289} * 100 = 6.57\%$$



*Figura 133* Fotografía de la sección de la probeta  
95% Plástico – 5% Madera

### **6.5.3. Muestras 90% Plástico – 10% Madera**

Para la muestra se contabilizó en la figura 134 un total de 34 partículas entre las cuales están las significativas y los grupos de partículas menores, teniendo un área de partículas de eucalipto de  $34\text{mm}^2$ .

$$\text{Área de la sección} = 289 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área del Eucalipto} = 34 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área del Polietileno} = \text{Área de la Sección} - \text{Área del Eucalipto}$$

$$\text{Área del Polietileno} = 255 \text{ mm}^2$$

$$\text{Porcentaje de \u00e1rea de polietileno} = \frac{255}{289} * 100 = 88.23\%$$

$$\text{Porcentaje de \u00e1rea de part\u00edculas de Eucalipto} = \frac{34}{289} * 100 = 11.77\%$$



**Figura 134** Fotograf\u00eda de la secci\u00f3n de la probeta 90% Pl\u00e1stico – 10% Madera

#### **6.5.4. Muestras 85% Pl\u00e1stico – 15% Madera**

Para la muestra se contabiliz\u00f3 en la figura 135 un total de 56 part\u00edculas entre las cuales est\u00e1n las significativas y los grupos de part\u00edculas menores, teniendo un \u00e1rea de part\u00edculas de eucalipto de  $56\text{mm}^2$ .

$$\text{\u00c1rea de la secci\u00f3n} = 289 \text{ mm}^2$$

$$\text{\u00c1rea del Eucalipto} = 56 \text{ mm}^2$$

*Área del Polietileno = Área de la Sección – Área del Eucalipto*

$$\text{Área del Polietileno} = 233 \text{ mm}^2$$

$$\text{Porcentaje de área de polietileno} = \frac{233}{289} * 100 = 80.63\%$$

$$\text{Porcentaje de área de partículas de Eucalipto} = \frac{56}{289} * 100 = 19.37\%$$



**Figura 135** Fotografía de la sección de la probeta 85% Plástico – 15% Madera

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1. Conclusiones

- Como resultado del proceso de enfriamiento posterior a la extrusión se pudo endurecer probetas conformadas de material 100% plástico y de material compuesto con matriz de refuerzo de madera con porcentajes de 5%, 10% y 15%.
- Con el propósito de evidenciar las mejoras en las propiedades mecánicas del material obtenido por extrusión se lo caracterizó mecánicamente a flexión en el Laboratorio de Mecánica de Materiales ESPE.
- Se comprendió las causas y efectos que sufren los plásticos a nivel molecular durante un proceso de conformado mediante el estudio del comportamiento mecánico y térmico
- El acero estructural ASTM A36, material del cual está fabricado el calibrador de extrusión, presentó características térmicas adecuadas para la transferencia de calor facilitando el endurecimiento del material extruido.
- Se evidenció que las probetas extruidas tienen un mejor acabado superficial debido al acabado tipo espejo en el canal de extrusión del calibrador.
- Se realizó una mezcla porcentual máxima en el material compuesto de 15 % aserrín de eucalipto y 85 % polietileno de alta densidad dado que la extrusora utilizada no tiene la capacidad de procesar un alto porcentaje de madera.
- Se evidenció según el diseño de experimentos que los parámetros más relevantes a controlar en el proceso de extrusión fueron la temperatura de extrusión y el caudal de enfriamiento con valores de 135 °C y 38,5 Kg/s respectivamente con los cuales se obtuvo

mejores resultados con respecto a la máxima carga aplicada a demás el material fluye de mejor manera y no se genera presiones excesivas que puedan generar daños en la máquina.

- Mediante la mezcla manual de aserrín y plástico se pudo homogenizar de mejor manera y tener la mejor distribución matriz – refuerzo en las probetas obtenidas por extrusión.
- El ensamble del calibrador y el cañón de extrusión generó durante el conformado del WPC una buena presión permitiendo que el paso del material por el canal de extrusión sea adecuado y obtenga la forma geométrica deseada.
- Se pudo corroborar que existe un aumento en el porcentaje de cristalinidad de cada muestra conforme cambia su composición mediante análisis DSC.
- Se corroboró experimentalmente mediante la caracterización a flexión que al aumentar el porcentaje en peso de partículas de madera las propiedades mecánicas con respecto a un material 100% plástico presentan un incremento.
- Se evidenció que existe una distribución uniforme de partículas de madera en las secciones transversales de las probetas analizadas favoreciendo así al aumento en las características mecánicas del material.

## **7.2. Recomendaciones**

- Se recomienda realizar el mantenimiento preventivo del canal de extrusión del calibrador, dando un pulido para mantener su acabado superficial cada vez que sea utilizado.
- Utilizar materia prima de un mismo lote para evitar tener variaciones en el comportamiento del mismo al ser analizado.

- Tamizar el aserrín hasta obtener partículas con un diámetro semejante a los pellets de Polietileno de alta densidad.
- Mantener iguales los parámetros de extrusión en las diferentes composiciones de probetas ensayadas para evitar variabilidad en los resultados.
- Analizar diferentes parámetros de control con el fin de tener un diseño experimental mas robusto que reduzca en un mayor porcentaje la variabilidad de resultados.
- Para el análisis DSC se recomienda analizar la zona central de la muestra ya que el enfriamiento en esta zona no tiene un choque térmico tan brusco.
- El análisis DSC para materiales compuestos es mucho más eficiente si la muestra se toma de una zona donde las partículas matriz y fibra tengan mejor distribución.

## BIBLIOGRAFÍA

AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico. (2006). *Ensayo de flexión: EN ISO 178*. Obtenido de <https://www.aimplas.es/analisis-ensayos/tipos-de-ensayos/propiedades-mecanicas/ensayo-flexion>

Amigo, V., Salvador, M., Nuez, A., Sahuquillo, O., & Martín, F. (2008). *Caracterización de fibras vegetales utilizadas como refuerzo en matrices termoplásticas*. In *X-Congreso nacional de Materiales. Mondragón Unibertsitatea-Kursaal. Donostia-San Sebastián*. Valencia: Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera.

ASTM-D790. (2003). D790-03 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. *ASTM*, 1-11.

Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2010). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante.

Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2018). *Tecnología de Polímeros*. España: Universidad de Alicante.

Blanco, F. (2008). *Cristalización Polímeros Cristalinos*. Oviedo: Universidad de Oviedo.

Bouza, R. (2008). *Diseño y caracterización de nuevos materiales compuestos polipropileno y madera: estudio del viniltrimetoxisilano como agente de acoplamiento*. Coruña: Universidade da Coruña. Departamento de Física.

Calisto Zurita, J. A., & Suárez Bastidas, H. F. (2009). *Estudio experimental del comportamiento mecánico a la flexión de materiales compuestos en base de fibra de pet reciclado y fibra de vidrio*. Sangolqui, Ecuador: Facultad de Ingeniería Mecánica.

Castro Zuluaga, J. F. (2010). *Diseño de un molde para el formado continuo del perfil utilizado en la elaboración de tablas de madera plastica en la empresa plasmaco*. Medellín: Universidad EAFIT.

Cengel, Y. A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones*. Mexico D.F: Mc Graw Hill.

Ecuador Forestal . (22 de Octubre de 2012). *Ficha Técnica N 10 Eucalipto* . Obtenido de <http://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-10-eucalipto/>

Ecuador Terra Incognita. (Octubre de 2005). *Dos cajones con semillas de eucalipto*. Obtenido de [http://www.terraecuador.net/revista\\_37/37\\_eucalipto.htm](http://www.terraecuador.net/revista_37/37_eucalipto.htm)

El Comercio. (24 de Febrero de 2017). *El Eucalipto genera impactos sobre la naturaleza*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/tendencias/eucalipto-impactos-naturaleza-incendios-fuego.html>

El Telegrafo . (24 de Mayo de 2015). *En Defensa del Eucalipto*. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/columnistas/1/en-defensa-del-eucalipto>

Espert Bernia, A. (2011). *Proceso de Extrusión de Plásticos*. Valencia, España: AIMPLAS Instituto Tecnológico de Plásticos.

- Garrain, D., Vidal, R., & Franco, V. (2008). *Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad*. Valencia: Universidad Jaume I.
- Gottfried, E., Riedel, G., & Trawiel, P. (1999). *Thermal Analysis of Plastics*. Hanser.
- Granados, Y. A. (2015). *Importancia De Los Ensayos TGA y DSC en el Estudio de las Propiedades Térmicas de Mezclas Asfálticas*. Bogotá D.C: Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V.
- Jara Salme, M. V. (2015). *Diseño de una Planta Piloto para la Obtención de Granza de Madera Plástica a Partir de Polietileno Reciclado con Partículas Lignocelulósicas (Aserrín)*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Jurado, J. L. (2016). *Diseño de un molde para extrusión de piezas plásticas, el cual consiste en un dado y sistema de enfriamiento (calibrador y tina), para caso de estudio de una canaleta*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Made-in-China.com. (2010). *Made-in-China.com*. Obtenido de Made-in-China.com: [https://es.made-in-china.com/co\\_china-tongdi/product\\_Steel-Forged-Block-Forging-4140-N-T\\_euonennog.html](https://es.made-in-china.com/co_china-tongdi/product_Steel-Forged-Block-Forging-4140-N-T_euonennog.html)
- Medina Cajas, C. G., & Maldonado Castro, M. A. (2008). *Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1 kg/h, diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del PET*. Sangolquí: Facultad de Ingeniería Mecánica. ESPE.

Michaeli, W. (2003). *Extrusion dies for plastics and rubber*. Alemania: Hanser Publisher.

Ministerio de Industrias y Productividad . (Mayo de 2015). *Industria de transformación de plásticos en Ecuador*. Obtenido de [http://servicios.industrias.gob.ec/siipro/downloads/temporales/21\\_1\\_Industria%20de%20transformacion%20de%20plasticos%20en%20Ecuador.compressed.pdf](http://servicios.industrias.gob.ec/siipro/downloads/temporales/21_1_Industria%20de%20transformacion%20de%20plasticos%20en%20Ecuador.compressed.pdf)

Ospina Jimenez, & Rondón Arciniegas . (2006). *Guia Metodológica Para Realizar Analisis Mediante el Calorimetro de Barrido Diferencial (DSC Q10), Como Servicio de Extension ala Industria Nacional Por Parte de la Escuela de Ingenieria Quimica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Ospina Restrepo, C. A. (2014). *Evaluación de las propiedades mecánicas de los perfiles extruidos a partir de mezclas de polimeros reciclados para la fabricacion de estibas de maderas plasticas en maderpol S.A.S*. Medellín: Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería.

Pahl, G., & Beitz, W. (1977). *Engineering Design*. Berlin: Springer.

Roca Girón , I. E. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.

Roymaplast. (21 de Enero de 2015). *Reciclaje del Polietileno de Alta Densidad*. Obtenido de <http://roymaplast.com/reciclaje-del-polietileno-de-alta-densidad/>

Roymaplast. (14 de Enero de 2016). *Tipos de Reiclaje del Polietileno de Alta Densidad*. Obtenido de <http://roymaplast.com/tipos-reciclaje-del-polietileno-alta-densidad/>

S. Kalpakjian, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Quinta edición* . Mexico: Pearson Educacion.

Schwarzkopf, & M.D. Burnard. (2016). Wood Plastic Composites - Performance and Environmental Impacts. *Springer*, 1,26.

Skoog, D., Holler, J., & Crouch, S. (2001). *Principios de analisis instrumental*. Mexico D.F.: CENGAGE Learning.

Timberplan. (2018). *Que es el material WPC*. Obtenido de <http://timberplan.es/que-es-el-wpc/>

Universidad de la Laguna. (16 de Junio de 2014). *docsity*. Obtenido de

[https://www.docsity.com/es/materiales-opticos/3166908/?fbclid=IwAR1vWM7-RdrhFDAYxr9ZCLy77nJz1R5KyG\\_IqI19EnKpLZEtZ6UBzjogZqk](https://www.docsity.com/es/materiales-opticos/3166908/?fbclid=IwAR1vWM7-RdrhFDAYxr9ZCLy77nJz1R5KyG_IqI19EnKpLZEtZ6UBzjogZqk)

Vicuña Vicuña, D. D. (2016). *Obtencion de biocompuestos a partir de residuos de madera (sawdust) y resina termoplastica* . Cuenca: Universidad politécnica salesiana; Cuenca.

Vinueza, M. (22 de Octubre de 2012). *Ecuador Forestal* . Obtenido de

<http://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-10-eucalipto/>

Yáñez, A. E. (2016). *Tratamiento superficial de materiales compuestos de madera y plástico (WPCs) para mejorar sus propiedades de adhesión*. Alicante: Universidad de Alicante .