

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

" Diseño de paneles para techo a partir de mezclas de reciclado de Polietileno Tereftalato (PET) y Polietileno de alta densidad (HDPE) para un programa de vivienda urbana"

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERA MECÁNICA**

Presentado por:

Julia Desirée Herrera Lossa

María Camila Yerovi Avendaño

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, por su constante e inagotable amor traducido en fuerza, perdón, sabiduría, familia y amigos que son parte de mi formación como persona y profesional. A María, por ser una madre excepcional y guía del mundo. A mis padres, Oswaldo y Mercedes, por su diario apoyo gracias a su amor. A mis hermanos, Oscar y Paula, por sus consejos que ayudaron a pulir lo más importante, mi felicidad. A mis compañeros de la ESPOL, por su gran amistad y ayuda en mi formación académica. A mi tutor, por la oportunidad brindada en trabajar para este gran proyecto. Estoy muy agradecida por su gran apoyo, dedicación y orientación. A todos, les agradezco inmensamente al ser partícipes de mi formación profesional y confío que este trabajo será de gran utilidad para aquellas personas interesadas en las grandes aplicaciones que hoy en día ofrece el reciclaje de los plásticos.

*Julia Herrera Lossa*

Agradezco a Dios, por darme certezas donde el mundo puso incertidumbres.

A Linda Avendaño, mi madre, por su admirable dedicación e incondicional entrega, sin ella este logro no habría sido posible.

A Oswaldo Yerovi, mi padre, por su amor sin medida, sinónimo de fortaleza y abnegación en mi vida.

A Esteban, mi hermano, por ser el motivo de superarme cada día.

A Andrés Rigail, Ph.D, mi tutor, por su invaluable apoyo y excelente guía en este proyecto.

A Emma Mata, mi abuela, por el amor incondicional y los consejos que en vida me dio.

A Zoila Falconí, mi abuela, por ser una mujer implacable, mi ejemplo a seguir en el aspecto profesional.

A todos aquellos que me aconsejaron en temas académicos y fueron parte vital del proceso.

Finalmente, a todos los que cruzaron mi camino en esta travesía de cinco años porque hicieron de mí el ser humano que soy ahora. Gracias por los matices de este lienzo. Gracias por ser los acordes de esta insuperable sinfonía. Gracias por ser y estar.

*Camila Yerovi Avendaño*

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Julia Desirée Herrera Lossa

María Camila Yerovi Avendaño

Andrés Francisco Rigail Cedeño, PhD.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

---

Julia Desirée Herrera  
Lossa

Autor 1

---

María Camila Yerovi  
Avendaño

Autor 2

---

Andrés Francisco Rigail  
Cedeño, PhD.

Tutor de Materia Integradora

## RESUMEN

Hoy en día, el manejo de residuos representa un gran problema, especialmente en países como Ecuador se opta por la disposición final en el relleno sanitario, y en el caso de los plásticos, su venta al extranjero para ser reciclados e incluso su incineración son las opciones de mayor demanda. La ideología del cradle to cradle, presenta soluciones para estos residuos, básicamente incorporándolos nuevamente en alguna etapa del ciclo de vida. Así, surge la idea planteada en este proyecto emplear los desechos plásticos post-industriales de PET y HDPE para formar un nuevo material, el cual servirá de materia prima para elaborar paneles para techo. Evidentemente, sus costos de producción y precio serán menores, apuntando así a un sector social menos favorecido económicamente. El desarrollo de este trabajo se divide en dos grandes partes, la obtención y caracterización del material, y el diseño y análisis estructural del panel. En la primera parte se realizó 4 mezclas, todas teniendo como matriz 70RPET y 30RHDPE, incorporando en algunas, cierto porcentaje de compatibilizador EGMA y arcilla C20A. La fase de mezclado se realizó en una extrusora de un husillo, mientras que para la obtención de probetas de tracción se utilizó una inyectora. La caracterización del material comprende morfología, propiedades mecánicas y térmicas. En la parte del diseño, se planteó 4 alternativas, de las cuales se escogió aquella con mayor manufacturabilidad siendo éste el factor predominante del diseño y en segunda instancia su rigidez. Luego, se analizó los esfuerzos y deformaciones para cinco distintas distancias entre correas, así como el factor de seguridad en cada caso. Finalmente, se presenta el diseño con sus respectivas simulaciones, demostrando su viabilidad y ofreciendo así una idea innovadora en la región, cuya principal característica es ser altamente sostenible.

Palabras claves: organoarcilla, polímeros, techo, sostenibilidad

## **ABSTRACT**

*Nowadays, waste management represents a big issue, especially in countries like Ecuador, where people choose landfills as final disposal for solid wastes, plastics for example are sold abroad to be recycle, or incinerated, which are the most common options. The cradle-to-cradle philosophy gives potential solutions for these wastes, basically reintegrating them into any stage of the life-cycle of a product. Thus, the idea raised in this project is to use post-industrial PET and HDPE to create a new material which would be the feedstock of the new roof panels. Obviously, its production costs and price would be reduced, pointing to a low socioeconomic status. The development of the present graduation work was divided into two parts, the characterization of the new material, and the design and structural analysis of roof panels. In the first part, four blends were obtained, all of them had the same polymer matrix: 70RPET and 30RHDPE, and little percentages of EGMA compatibilizer and Cloisite 20A were added. The mixing phase was carried out in a single-screw extruder, while an injection molding machine was used to obtain tensile specimens. The characterization of the material explained its morphology, mechanical and thermal properties. In the design phase, four options were proposed, but it was chosen the one with the highest manufacturability, which became the most important design criterion, and rigidity was the second one. Then, stresses and deformations were calculated for five different distances between fixed supports, as well as the factor of safety for each case. Finally, we present the final design with the corresponding analysis, proving its viability and offering an innovative idea in this region characterized by being highly sustainable.*

*Keywords: organoclay, polymers, roof panels, sustainability*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VII
SIMBOLOGÍA .....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XVI
ÍNDICE DE PLANOS .....	XIX
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción .....	1
1.1    Descripción del problema .....	1
1.2    Objetivos.....	2
1.2.1    Objetivo General .....	2
1.2.2    Objetivos Específicos .....	3
1.3    Marco teórico .....	3
1.3.1    Historia de los plásticos y su clasificación.....	3
1.3.2    Procesamiento de plásticos .....	4
1.3.3    Reciclaje en la actualidad.....	6
1.3.4    Organoarcillas .....	7
CAPÍTULO 2 .....	8
2.    Metodología .....	8
2.1    Bases y consideraciones .....	10
2.2    Descripción de alternativas de solución.....	11
2.2.1    Materiales de mezcla .....	11

2.2.2	Proceso de manufactura de paneles.....	12
2.3	Matriz Solución .....	14
2.3.1	Materiales de la mezcla.....	14
2.3.2	Proceso de manufactura de paneles.....	16
2.4	Procesamiento de mezclas.....	18
2.4.1	Materiales.....	18
2.4.2	Lavado y secado .....	19
2.4.3	Proceso de mezclado.....	19
2.5	Ensayos.....	21
2.5.1	Difractometría de rayos X.....	21
2.5.2	Análisis Termogravimétrico .....	21
2.5.3	Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....	22
2.5.4	Morfología .....	23
2.5.5	Ensayo de tracción.....	23
2.6	Modelado y simulación .....	24
2.6.1	Especificaciones de diseño .....	24
2.6.2	Diseño de forma .....	25
2.6.3	Análisis de cargas .....	34
2.6.4	Análisis de esfuerzos .....	46
2.6.5	Factor de seguridad .....	47
2.6.6	Simulación.....	49
CAPÍTULO 3.....		51
3.	Resultados .....	51
3.1	Caracterización del material .....	51
3.1.1	Difractometría de Rayos X .....	52
3.1.2	TGA.....	58



3.1.3	DSC.....	62
3.1.4	SEM .....	67
3.1.5	Ensayo de Tracción.....	69
3.2	Diseño del panel .....	78
3.2.1	Cargas.....	78
3.2.2	Simulación.....	94
3.2.3	Análisis de resultados .....	105
3.3	Análisis de costos .....	107
CAPÍTULO 4.....		114
4.	Discusión y Conclusiones .....	114
4.1	Conclusiones .....	114
4.2	Recomendaciones .....	116
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		
APÉNDICE A		
PLANOS ESQUEMÁTICOS		
APÉNDICE B		
CÓDIGO MATLAB CON SUS RESPECTIVOS RESULTADOS		
APÉNDICE C		
DIFRACTOMETRÍA DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON rPET/rHDPE		
APÉNDICE D		
TERMOGRAMAS TGA DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON rPET/rHDPE		
APÉNDICE E		
TERMOGRAMAS DSC DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON rPET/rHDPE		
APÉNDICE F		

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN EN PROBETAS CON  
rPET/rHDPE

APÉNDICE G

SIMULACIÓN ANSYS

APÉNDICE H

FICHAS TÉCNICAS

## ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
C20A	Cloisite 20A
CAD	Computer Aided Design
CIS	Inspección pasó a paso, medición de potenciales de encendido
CSE	Electrodo de Cobre Sulfato de Cobre
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EGMA	Ethylene Glycidyl Methacrylate
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HWL	High Water Level
HDPE	High Density Polyethylene
LWL	Low Water Level
MFI	Melt Flow Index
MPY	Milésimas de pulgadas por año
NACE	National Association of Corrosion Engineer
PET	Polyethylene terephthalate
SSC	Electrodo de Plata Cloruro de Plata
TA	Thermal Analyzers
TGA	Thermogravimetric Analysis
XRD	X-Ray Diffraction

## SIMBOLOGÍA

A	Amperios
Å	Armstrong
°C	Celsius
C	Carbono
Cu	Cobre
J	Joules
Mn	Manganeso
mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
m	Metro
mm	Milímetro
mV	Milivoltio
Ni	Níquel
N	Newton
pH	Potencial de Hidrógeno
P	Fósforo
Pa	Pascales

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Desperdicio Plástico.....	1
Figura 1.2	Pellets de PET.....	2
Figura 1.3	Puente de polímero reforzado con fibras en Rotterdam.....	2
Figura 1.4	Diagrama de flujo de polímeros.....	5
Figura 1.5	Esquema de una inyectora.....	6
Figura 1.6	Esquema de una extrusora.....	6
Figura 2.1	Modelo de proceso de diseño de Pahl y Beitz.....	9
Figura 2.2	Diagrama de Metodología de diseño para el diseño de paneles para techo a partir de PET y HDPE reciclados.....	10
Figura 2.3	Vista isométrica parcial del panel alternativa 1.....	26
Figura 2.4	Vista isométrica parcial del panel alternativa 2.....	28
Figura 2.5	Vista isométrica del panel alternativa 3.....	30
Figura 2.6	Vista isométrica parcial del panel alternativa 4.....	31
Figura 2.7	Diagrama de cuerpo libre simplificado para configuración 1.....	35
Figura 2.8	Diagrama de cuerpo libre para configuración 2.....	35
Figura 2.9	Valores de $\frac{6A\bar{a}}{L}$ y $\frac{6A\bar{b}}{L}$ en función del tipo de carga .....	38
Figura 2.10	Diagrama de cuerpo libre para reacciones.....	40
Figura 2.11	Diagrama de cuerpo libre para tramo 2.....	40
Figura 2.12	Diagrama de cuerpo libre para momento en el centro de la viga.....	41
Figura 2.13	Diagrama de cuerpo libre para tramo 2.....	41
Figura 2.14	Diagrama empleado para determinar la deflexión en el centro de la viga.....	42
Figura 2.15	Diagrama de cuerpo libre para hallar reacciones en tramo 1.....	44
Figura 2.16	Diagrama de cuerpo libre para hallar reacciones en tramo 2.....	44
Figura 2.17	Diagrama de cuerpo libre para hallar momento en secciones intermedia en el tramo 1.....	45
Figura 2.18	Diagrama empleado para determinar la deflexión en el centro de la viga.....	46

Figura 2.19	Factores de seguridad recomendados de acuerdo a la información del material.....	48
Figura 2.20	Mallado del ensamble para distancia entre correas de 600 mm..	49
Figura 2.21	Aplicación de carga y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 600 mm.....	50
Figura 3.1	Difractogramas de los materiales puros: PET reciclado (rPET) y HDPE reciclado (rHDPE).....	53
Figura 3.2	Difractogramas de las mezclas 1, 2, 3 y 4 en referencia con el difractograma de la organoarcilla Cloisite 20A .....	54
Figura 3.3	Difractogramas de las mezclas 7 y 8 en referencia con el difractograma del rHDPE.....	55
Figura 3.4	Difractogramas de las mezclas 5 y 6 en referencia con el difractograma del rPET.....	56
Figura 3.5	Termogramas de Peso (%) vs Temperatura de los sistemas correspondientes a las mezclas 5,6,7 y 8.....	58
Figura 3.6	Derivada de la descomposición térmica de las mezclas 5, 6, 7 y 8.....	60
Figura 3.7	Curvas de Peso (%) vs Temperatura de las cuatro configuraciones principales.....	61
Figura 3.8	Derivada de la descomposición térmica de las mezclas principales.....	62
Figura 3.9	Curvas DSC en la fase de enfriamiento de las cuatro mezclas principales.....	63
Figura 3.10	Curvas DSC en la fase de enfriamiento de las 4 mezclas complementarias.....	64
Figura 3.11	Curvas DSC en la fase de calentamiento de las cuatro mezclas principales.....	65
Figura 3.12	Curvas DSC en la segunda fase de calentamiento de las cuatro mezclas complementarias.....	66
Figura 3.13	Microscopía SEM de la organoarcilla Cloisite 20 A a) a una magnificación de 1000X y b) a una magnificación de 5000X.....	68

Figura 3.14	Micrografía SEM de a) Mezcla 1 70rPET/30rHDPE b) Mezcla 2 70rPET/30rHDPE/5EGMA.....	68
Figura 3.15	Micrografía SEM a una magnificación de 2000X de a) Mezcla 3 70rPET/30rHDPE/3C20A y d) Mezcla 4 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A.....	69
Figura 3.16	Curva Esfuerzo-Deformación para mezcla 70rPET/30rHDPE...	71
Figura 3.17	Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE con Back-pressure 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	72
Figura 3.18	Curva esfuerzo deformación de mezcla 70RPET/30HDPE/5EGMA.....	73
Figura 3.19	Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/3C20A.....	74
Figura 3.20	Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/3C20A con back-pressure 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	75
Figura 3.21	Curva esfuerzo deformación de mezcla de 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A.....	76
Figura 3.22	Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A con back-pressure de 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	77
Figura 3.23	Curva momento flector vs. posición para distancia entre correas de 600 mm.....	81
Figura 3.24	Curva deflexión vs. posición para distancia entre correas de 600 mm.....	82
Figura 3.25	Curva momento flector vs. posición en secciones medias para distancia entre correas de 700 mm.....	84
Figura 3.26	Curva deflexión vs. posición para distancia entre correas de 700 mm.....	85
Figura 3.27	Curva de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 800 mm.....	87
Figura 3.28	Curva deformación vs. posición para distancia entre correas de 800 mm.....	88

Figura 3.29	Gráfica de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 900 mm.....	90
Figura 3.30	Curva de deformación vs. posición para una distancia entre correas de 900 mm.....	91
Figura 3.31	Curva de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 1000 mm.....	93
Figura 3.32	Curva de deflexión vs. posición para distancia entre correas de 1000 mm.....	94
Figura 3.33	Distribución de Esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 600 mm.....	95
Figura 3.34	Valores de deflexiones admitidas en construcción.....	95
Figura 3.35	Análisis de deformación total en el panel para distancia entre correas de 600 mm.....	96
Figura 3.36	Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 600 mm.....	96
Figura 3.37	Distribución de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 700 mm.....	97
Figura 3.38	Análisis de deformación total en el panel para una distancia entre correas de 700 mm.....	98
Figura 3.39	Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 700 mm.....	98
Figura 3.40	Análisis de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 800 mm.....	99
Figura 3.41	Análisis de la deflexión total en el panel para distancia entre correas de 800 mm.....	100
Figura 3.42	Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 800 mm.....	100
Figura 3.43	Distribución de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 900 mm.....	101
Figura 3.44	Análisis de deformación total en el panel para una distancia entre correas de 900 mm.....	102



Figura 3.45	Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 900 mm.....	102
Figura 3.46	Análisis de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 1000 mm.....	103
Figura 3.47	Análisis de deformación total en el panel para distancias entre correas de 1000 mm.....	104
Figura 3.48	Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 1000 mm.....	104
Figura 3.49	Panel sándwich.....	107
Figura C.1	Difractograma del material puro rPET.....	144
Figura C.2	Difractograma del material puro rHDPE.....	145
Figura C.3	Difractograma de la mezcla 1: 100rPET/30rHDPE.....	146
Figura C.4	Difractograma de la mezcla 2: 100rPET/30rHDPE/5EGMA.....	147
Figura C.5	Difractograma de la mezcla 3: 100rPET/30rHDPE/3C20A.....	148
Figura C.6	Difractograma de la mezcla 4: 100rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA.....	149
Figura C.7	Difractograma de la mezcla 5: 100rPET/3C20A.....	150
Figura C.8	Difractograma de la mezcla 6: 100rPET/3C20A/5EGMA.....	151
Figura C.9	Difractograma de la mezcla 7: 100rHDPE/3C20A.....	151
Figura C.10	Difractograma de la mezcla 8: 100rHDPE/3C20A/5EGMA.....	153
Figura C.11	Difractogramas superpuestos de los materiales puros.....	154
Figura C.12	Difractogramas superpuestos de las mezclas 7 y 8 en referencia con el difractograma del material puro rHDPE.....	155
Figura C.13	Difractogramas superpuestos de las mezclas 5 y 6 en referencia con el difractograma del rPET.....	156
Figura C.14	Difractogramas superpuestos de las mezclas 1,2,3, y 4 en referencia con el difractograma de la organoarcilla Cloisite 20A.	157
Figura D.1	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE.....	159

Figura D.2	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 2: 70rPET/30rHDPE/5EGMA.....	160
Figura D.3	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A.....	161
Figura D.4	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA.....	162
Figura D.5	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 1, 2, 3 y 4.....	163
Figura D.6	Termogramas TGA de la primera derivada del Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 1, 2, 3 y 4.....	164
Figura D.7	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 5: 100rPET/3C20A.....	165
Figura D.8	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 6: 100rPET/3C20A/5EGMA.....	166
Figura D.9	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 7: 100rHDPE/3C20A.....	167
Figura D.10	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 8: 100rHDPE/3C20A/5EGMA.....	168
Figura D.11	Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 5,6,7 y 8.....	169
Figura D.12	Termogramas TGA de la primera derivada del Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 5,6,7 y 8.....	170
Figura E.1	Termograma DSC de la Mezcla 5 correspondiente a 100rPET/3C20A.....	172

Figura E.2	Termograma DSC de la Mezcla 6 correspondiente a 100rPET/3C20A/5EGMA.....	173
Figura E.3	Termograma DSC de la Mezcla 7 correspondiente a 100rHDPE/3C20A.....	174
Figura E.4	Termograma DSC de la Mezcla 8 correspondiente a 100rHDPE/3C20A/5EGMA.....	175
Figura E.5	Termograma DSC de la Mezcla 1 correspondiente a 70rPET/30rHDPE.....	176
Figura E.6	Termograma DSC de la Mezcla 2 correspondiente a 70rPET/30rHDPE/5EGMA.....	177
Figura E.7	Termograma DSC de la Mezcla 3 correspondiente a 70rPET/30rHDPE/3C20A.....	178
Figura E.8	Termograma DSC de la Mezcla 3 correspondiente a 70rPET/30rHDPE/3C20A.....	179
Figura G.1	Mallado del ensamble para distancia entre correas de 700 mm..	183
Figura G.2	Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 700 mm.....	183
Figura G.3	Mallado del ensamble para distancia entre correas de 800 mm...	184
Figura G.4	Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 800 mm.....	184
Figura G.5	Mallado del ensamble para distancia entre correas de 900 mm...	185
Figura G.6	Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 1000 mm.....	185
Figura G.7	Mallado del ensamble para distancia entre correas de 1000 mm	186
Figura G.8	Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 1000 mm.....	186

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Ventajas y desventajas de PET/PP vs PET/HDPE.....	12
Tabla 2.2	Ventajas y desventajas del proceso de compresión e inyección...	14
Tabla 2.3	Calificación de criterios.....	15
Tabla 2.4	Matriz de decisión del material.....	16
Tabla 2.5	Calificación de criterios.....	17
Tabla 2.6	Matriz de decisión del proceso de manufactura.....	18
Tabla 2.7	Proporciones de las mezclas realizadas.....	19
Tabla 2.8	Perfil de temperaturas de extrusión.....	20
Tabla 2.9	Perfil de temperaturas del Moldeo por Inyección.....	20
Tabla 2.10	Dimensiones de panel alternativa 1.....	26
Tabla 2.11	Variables involucradas en el cálculo de inercia.....	27
Tabla 2.12	Dimensiones de panel de alternativa 2.....	29
Tabla 2.13	Dimensiones de panel de alternativa 3.....	30
Tabla 2.14	Dimensiones de panel de alternativa 4.....	32
Tabla 2.15	Números de Biot para cada alternativa.....	34
Tabla 3.1	Proporciones de las mezclas realizadas para su respectiva caracterización.....	51
Tabla 3.2	Espaciamiento interplanar e intercalación relativa para los sistemas que contienen arcilla.....	57
Tabla 3.3	Especificación de picos y temperaturas de descomposición al 5% y 50% de pérdida de masa de las mezclas 5,6,7 y 8.....	59
Tabla 3.4	Especificación de picos y temperaturas de descomposición al 5% y 50% de pérdida de masa de las 4 mezclas principales.....	61
Tabla 3.5	Temperaturas y entalpías de cristalización ( $T_c$ y $\Delta H_c$ ) de los componentes de las mezclas principales.....	64
Tabla 3.6	Temperaturas y entalpías de cristalización ( $T_c$ y $\Delta H_c$ ) de los componentes de las mezclas complementarias.....	65

Tabla 3.7	Temperaturas de fusión ( $T_m$ ), entalpías de fusión ( $\Delta H_m$ ) y porcentaje de cristalinidad ( $\%X_c$ ) de los componentes de las mezclas principales.....	66
Tabla 3.8	Temperaturas de fusión ( $T_m$ ), entalpías de fusión ( $\Delta H_m$ ) y porcentaje de cristalinidad ( $\%X_c$ ) de los componentes de las mezclas complementarias.....	67
Tabla 3.9	Propiedades mecánicas promedio de todas las mezclas de rPET y Rhdpe.....	70
Tabla 3.10	Resultados de carga distribuida total para cada combinación.....	78
Tabla 3.11	Propiedades mecánicas de la mezcla seleccionada.....	79
Tabla 3.12	Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 600 mm.....	79
Tabla 3.13	Reacciones en las correas distanciadas 600 mm.....	80
Tabla 3.14	Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 700 mm.....	83
Tabla 3.15	Reacciones en correas distanciadas 700 mm.....	83
Tabla 3.16	Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 800 mm.....	85
Tabla 3.17	Reacciones en correas distanciadas 800 mm.....	86
Tabla 3.18	Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 900 mm.....	89
Tabla 3.19	Reacciones en las correas distanciadas 900 mm.....	89
Tabla 3.20	Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 1000 mm.....	91
Tabla 3.21	Reacciones en correas distanciadas 1000 mm.....	92
Tabla 3.22	Comparación entre resultados obtenidos por distintos métodos....	105
Tabla 3.23	Comparación entre panel sándwich y panel de rPET/rHDPE.....	107
Tabla 3.24	Desglose de cantidad de materia prima para producción mensual	108
Tabla 3.25	Costo de materia prima para producción mensual.....	108
Tabla 3.26	Costo de servicios de mantenimiento e instalación.....	109

Tabla 3.27	Costo de equipos.....	109
Tabla 3.28	Costo por mano de obra directa.....	109
Tabla 3.29	Consumo total de equipos por hora.....	110
Tabla 3.30	Costo de consumo energético.....	111
Tabla 3.31	Costos de suministros de seguridad.....	111
Tabla 3.32	Presupuesto total.....	112
Tabla 3.33	Desglose de costo de producción mensual.....	112
Tabla B.1	Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 600 mm	127
Tabla B.2	Momentos para distancia entre correas de 700 mm.....	130
Tabla B.3	Deflexiones para distancia entre correas de 700 mm.....	132
Tabla B.4	Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 800 mm	135
Tabla B.5	Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 900 mm	137
Tabla B.6	Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 1000 mm	140
Tabla F.1	Propiedades mecánicas de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE.....	178
Tabla F.2	Propiedades mecánicas de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE con Backpressure de 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	178
Tabla F.3	Propiedades mecánicas de la mezcla 2: 70rPET/30rHDPE/5EGMA.....	179
Tabla F.4	Propiedades mecánicas de la mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A	179
Tabla F.5	Propiedades mecánicas mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A con Backpressure de 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	180
Tabla F.6	Propiedades mecánicas mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A.....	180
Tabla F.7	Propiedades mecánicas mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A con Backpressure de 90 kg/cm <sup>2</sup> .....	181

## ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Panel para techo: Alternativa 4 (Seleccionada) Vista Frontal
- PLANO 2 Panel para techo: Alternativa 4 Vista Superior
- PLANO 3 Panel para techo: Alternativa 4 Vista Lateral Derecha
- PLANO 4 Panel para techo: Alternativa 4 Vista Isométrica
- PLANO 5 Panel para techo: Ensamble 1 Vista Frontal
- PLANO 6 Panel para techo: Ensamble 1 Vista Superior
- PLANO 7 Panel para techo: Ensamble 1 Vista Lateral Derecha
- PLANO 8 Panel para techo: Ensamble 1 Vista Isométrica

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Descripción del problema

Actualmente en nuestro país los desechos plásticos no presentan utilidad significativa después de haber cumplido su función, así, un alto porcentaje de éstos se venden al extranjero donde son reciclados y el resto se incinera, lo cual constituye un perjuicio para el ambiente.

En Ecuador el PET y HDPE/LDPE, son los más utilizados para elaborar productos plásticos, por ende, representan los desechos plásticos del país casi en su totalidad. Se tiene como solución la manufactura de productos a partir de estos desechos, teniendo como ventaja una mayor disponibilidad de materia prima. No obstante, la inmiscibilidad de ambos polímeros representa el principal obstáculo en este proceso.

La industria de la construcción requiere innovación en sus componentes, cada vez más los productos elaborados a partir de madera y metal quedan en la obsolescencia en otros países, dando paso a los polímeros. Eventualmente, en los años recientes se ha empezado a buscar en nuestro país también la forma de proyectar una aplicación de los polímeros en este sector ingenieril.



**Figura 1.1 Desperdicio Plástico**

Fuente: (BBC, 2015)





**Figura 1.2 Pellets de PET**

Fuente: (Torres, 2016)



**Figura 1.3 Puente de polímero reforzado con fibras en Rotterdam**

Fuente: (Castillejo, 2016)

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar paneles para techo a partir de una mezcla de PET y HDPE reciclados con organoarcilla y compatibilizador para casas de bajo presupuesto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar nanocompuestos de PET/HDPE reciclados con porcentajes definidos de organoarcilla y compatibilizador.
- Obtener las condiciones óptimas de procesamiento de los diferentes compuestos desarrollados a base de rPET/rHDPE mediante la observación de dispersión de fases.
- Determinar las propiedades mecánicas, térmicas, de cristalinidad y morfología de los diferentes compuestos obtenidos.
- Evaluar el comportamiento del material compuesto a través de la simulación estática del diseño propuesto de techo para su posterior optimización.
- Realizar un prototipo del diseño propuesto mediante impresión 3D.

## 1.3 Marco teórico

### 1.3.1 Historia de los plásticos y su clasificación

Los plásticos son un tipo de polímeros al igual que los cauchos. La palabra polímero se deriva de los vocablos griegos **poly** que significa muchos y **mero** que significa parte, así se podría intuir que los polímeros están conformados por partes mucho más pequeñas. En efecto, un polímero se define como un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, las cuales están conformadas, a su vez, por unidades que se repiten y conectan entre sí (Groover, 2007).

Los polímeros han existido desde que el hombre vio la luz por primera vez sobre la faz de la tierra, estos conforman los organismos y son vitales en muchos procesos biológicos. Sin embargo, estos no se emplean en ingeniería actualmente, sino los polímeros sintéticos. En 1862, Alexander Parkes dio a conocer al mundo el primer termoplástico, la *parkesina* que sería la precursora del celuloide, una mezcla de nitrato de celulosa y alcanfor, sometida a calor y presión, obtenida por John Hyatt en 1870. No obstante, no fue hasta 1900 que apareció el primer plástico sintético,

creado por Baekeland, resultado de una mezcla de fenol y formaldehído, llamada *bakelita*. En 1932 en Inglaterra se sintetizó el polietileno. La década del 40 fue una época dorada para los plásticos, se obtuvo muchos de los principales polímeros que utilizamos hoy en día en la industria como: Teflón, Siliconas, Poliuretanos, Resinas Epóxicas, y ABS, que ha retomado importancia en los últimos años con el boom de la impresión 3D. Posteriormente se obtuvo el Polipropileno, Polietileno de Alta Densidad, entre otros que adquirieron vital importancia en los años ulteriores, teniendo aplicaciones diversas tanto industriales como domésticas hasta el día de hoy.

Los plásticos se clasifican en dos grandes grupos: termofijos y termoplásticos. Los termoplásticos tienen mayor importancia comercial, se caracterizan por ser sólidos a temperatura ambiente y líquidos cuando se calientan a unos cientos de grados, lo que les permite adoptar diversas formas fácilmente y a diferencia de los termofijos, el ciclo de calentamiento y enfriamiento sucesivo no degrada el material. En los termofijos al calentarse nuevamente el material, éste se endurece, haciendo que sea imposible su fundición. Dentro del grupo de termoplásticos tenemos al Polietileno, PVC, Polipropileno, Poliestireno y Nylon. Mientras que los termofijos más comunes son los epóxicos y algunos poliésteres.

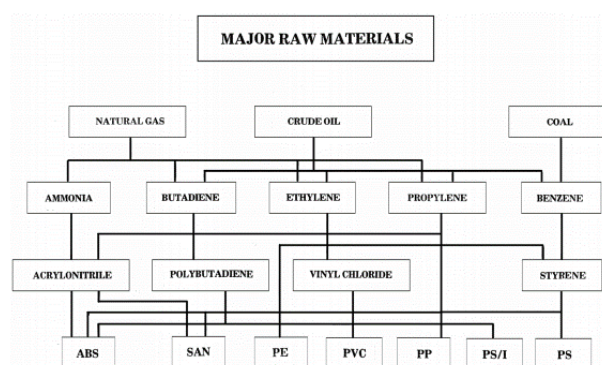
### **1.3.2 Procesamiento de plásticos**

Los puntos de partida de muchos polímeros son generalmente el gas natural, el aceite crudo y el carbón, tal como se muestra en la figura 1.4. A partir de éstos se puede obtener los compuestos precursores de los polímeros (Etileno, Propileno o Benceno) en una primera etapa con procesamientos básicos tales como la destilación, craqueo o extracción líquido-líquido. El proceso de unir monómeros en forma repetitiva para formar grandes moléculas se denomina polimerización. Algunas configuraciones pueden ser lineales y otras pueden formar redes en 3D, estas dependen del material y del proceso de manufactura lo que al final

de cuentas se reflejará en las propiedades del objeto terminado (Chanda, 1987). Este proceso de polimerización suele requerir catalizadores, calor, vacío, entre otros para acelerar o controlar la reacción.

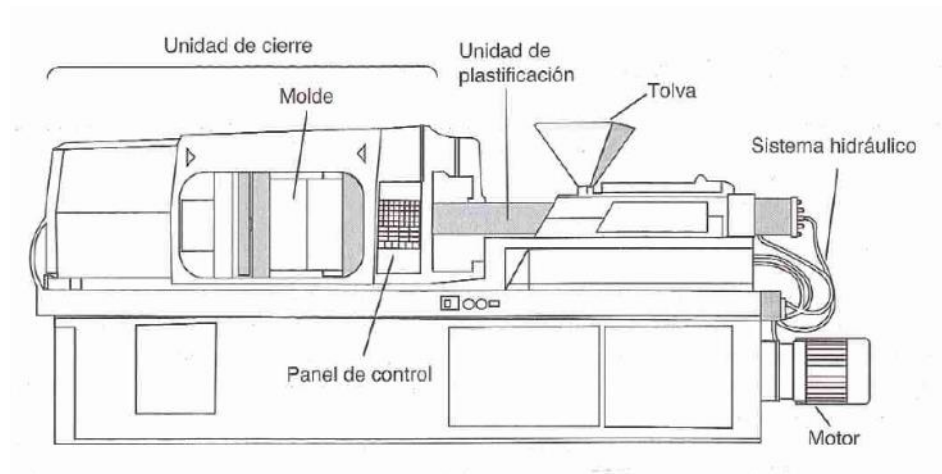
Los procesos de conversión del plástico más importantes son: moldeo por inyección y extrusión.

- Moldeo por inyección: es el proceso más ampliamente empleado en la industria por ser el más versátil. El proceso consiste en colocar los pellets de plástico en la tolva, el cual pasa a través de un depósito con diferentes calentadores con el fin de derretir la resina, luego se ejerce presión sobre el material hacia el molde, una vez que el plástico se ha enfriado, el molde se abre y se retira la pieza. Es muy útil cuando se requiere realizar probetas para someter el material a ensayos y determinar sus propiedades.
- Extrusión: La extrusora de tornillo (simple o doble) es uno de los equipos de plastificación más comunes en la industria. Su principal función es transportar pellets de plástico hasta el canal del husillo, los cuales se funden y forman una mezcla homogénea que es impulsada por el movimiento rotacional del tornillo. El equipo se divide en tres zonas principales: zona de alimentación; zona de fusión, donde el polímero se funde de forma progresiva, creándose una zona donde coexisten su fase líquida y sólida; y zona de dosificación, donde se requiere cierta presión para el bombeo del material.



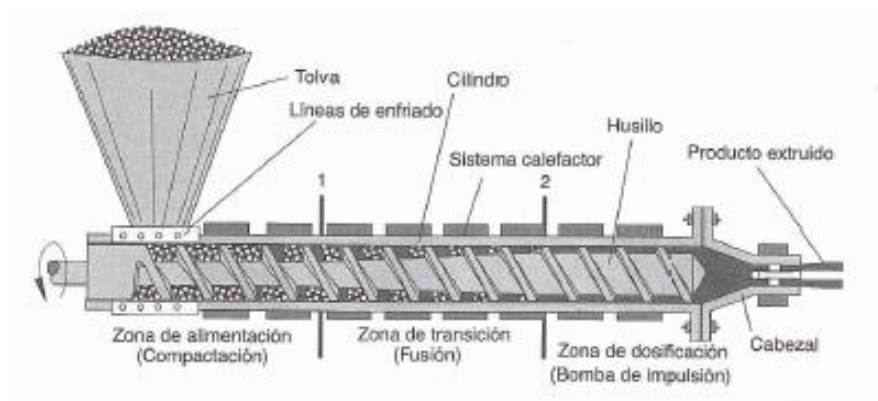
**Figura 1.4 Diagrama de flujo de polímeros**

Fuente: (Chanda, 1987)



**Figura 1.5 Esquema de una inyectora**

Fuente: (Timm Oswald, 2008)



**Figura 1.6 Esquema de una extrusora**

Fuente: (Timm Oswald, 2008)

### 1.3.3 Reciclaje en la actualidad

Hoy en día en Ecuador existen 43 centros de acopio de los cuales 8 pertenecen a la ciudad de Guayaquil acorde al sistema de registros de centros de acopio y recicladoras (SIRCAR) proporcionado por el Ministerio de Industrias y Productividad. Muchas de estas proporcionan más de 300 puestos de empleo directo debido al gran número de plantas que poseen. La recolección de plásticos reciclados exige que las empresas posean certificaciones en gestión de calidad y en gestión ambiental, tales como la ISO 9001 y 14001 respectivamente. El proceso de reciclaje ofrece ventajas en el aspecto social, impulsando la cultura de reciclaje a nivel nacional, donde más de 10000 familias viven de esta actividad. Ambiental, ya que se

incrementa la vida útil de rellenos sanitarios evitando la contaminación del suelo, aire y agua. Finalmente, económico, puesto que los desechos plásticos representan materia prima tanto para industrias nacionales como internacionales. Se estima que el 40% de plásticos reciclados lo constituye el PET, el 50% polietilenos y el 10% polipropilenos.

#### **1.3.4 Organoarcillas**

En la industria de plásticos es de vital importancia el estudio de la mezcla de dos polímeros para obtener un nuevo material con mejoras en sus propiedades mecánicas y térmicas. Nanopartículas sólidas tales como sílica y organoarcillas son empleados para mejorar las propiedades de los enlaces. En este caso particular, la naturaleza del surfactante puede influenciar en la localización de las plaquetas de arcilla en los enlaces, afectando la coalescencia, reduciendo el tamaño de la fase dispersa. Adicionalmente, se reduce la tensión interfacial y mejora la adhesión de ambas fases. La organoarcilla C20A tiene mayor afinidad con polímeros con grupos polares tales como el PET, mientras que el C30B posee mayor afinidad con polímeros con grupos no polares tales como las poliolefinas.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

El proceso de diseño en ingeniería está conformado por múltiples operaciones secuenciales que, durante la realización de un proyecto, requieren de iteración para solucionar con éxito la problemática planteada inicialmente. Partiendo de este criterio, se esbozan las primeras alternativas de solución, las cuales durante el trayecto se analizan minuciosamente para determinar la solución óptima y así proceder a realizar un diseño detallado, incluyendo la selección de materiales y procesos de manufactura más adecuados, así como la simulación de las condiciones de operación del producto final y su respectivo prototipado.

El proceso anteriormente descrito a breves rasgos se concatena con la metodología de diseño mecánico más empleada actualmente, conocida como Modelo de Pahl y Beitz, el cual se adjunta a continuación y sirve de guía para la metodología empleada en este trabajo.

La metodología empieza prácticamente a partir de las especificaciones de diseño, ya que la identificación de la necesidad y definición del problema se realizaron previamente en el capítulo 1.

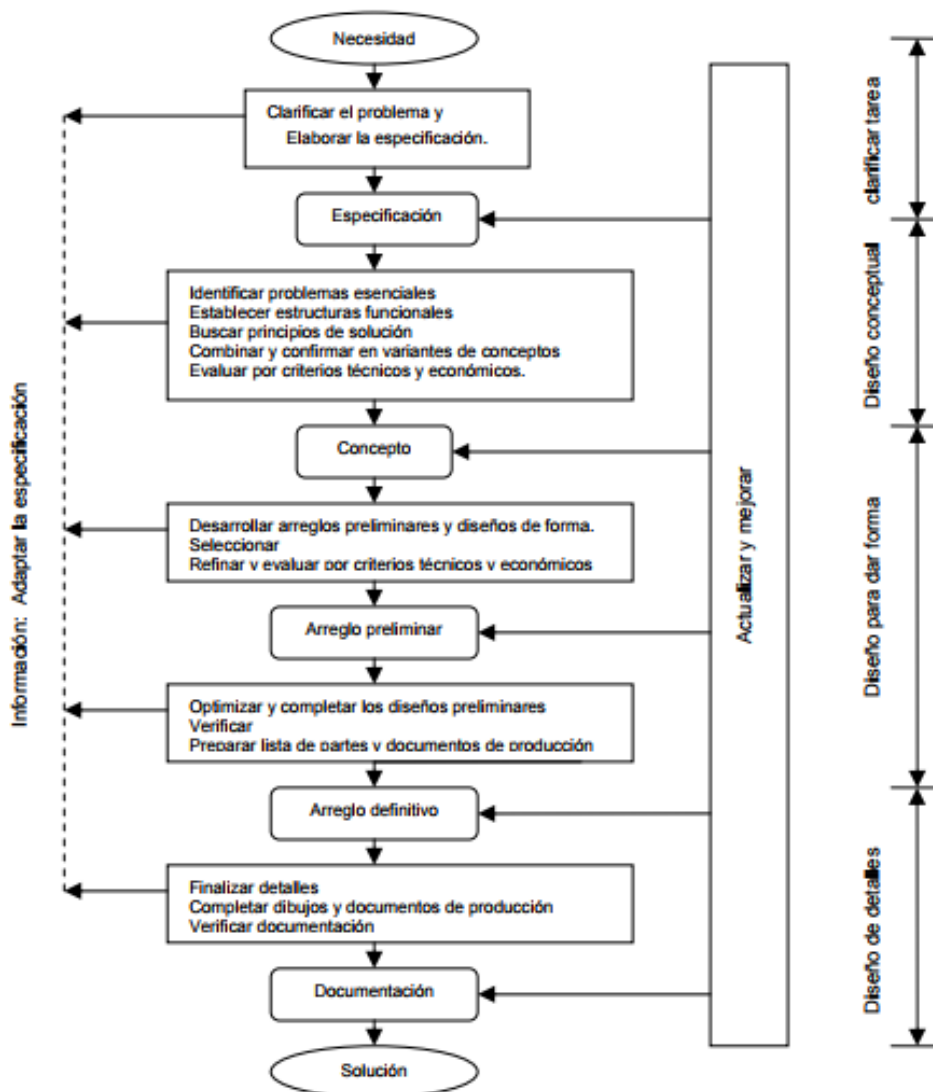
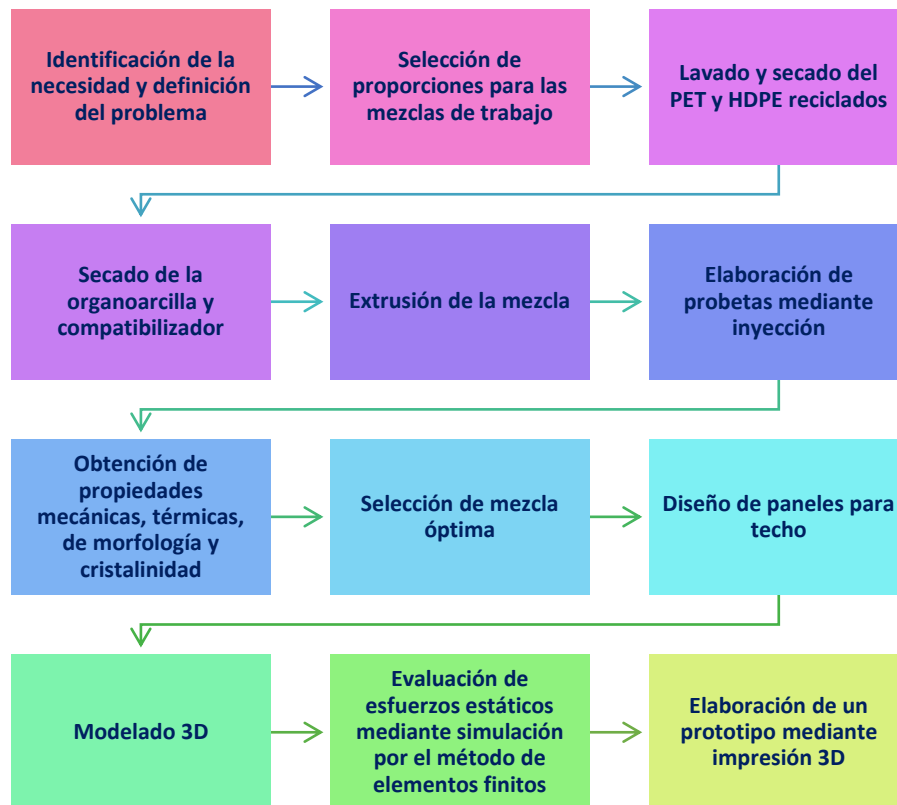


Figura 2.1 Modelo de proceso de diseño de Pahl y Beitz

Fuente: (Cross, 1999)





**Figura 2.2 Diagrama de Metodología de diseño para el diseño de paneles para techo a partir de PET y HDPE reciclados.**

Fuente: Elaboración propia

## 2.1 Bases y consideraciones

Para el manejo y disposición de los desechos plásticos post-industriales, se apoyará en las normas NTE INEN 2634:2012, y aquellos provenientes del sector agrícola NTE INEN 2588:2012.

Para el desarrollo de probetas de ensayos no destructivos de las mezclas realizadas y su correspondiente caracterización se tendrán como apoyo el uso de las siguientes normas y análisis:

- ASTM D3418-15, norma de ensayo para temperaturas de transición y entalpías de fusión y cristalización de polímeros por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC).
- ASTM E1131, norma de ensayo para definir las condiciones de análisis termogravimétricos (TGA) y temperaturas de degradación de polímeros.

- Cristalografía de rayos X para la identificación de fases del material.
- Microscopía electrónica de barrido para la visualización de la dispersión en superficies de fractura.

Por otra parte, para los ensayos destructivos, se utilizarán las siguientes normas:

- ASTM D638-02a, norma de ensayo de tracción para la obtención de propiedades mecánicas de plásticos.

Hay que mencionar, además los análisis que se realizarán para las propiedades reológicas de las muestras:

- Índice de fluidez, como verificación de la capacidad de fluidez de una resina bajo la norma ASMT D1238.

## **2.2 Descripción de alternativas de solución**

En esta sección se presentan todas las alternativas de solución para las áreas de estudio más representativas de este trabajo.

### **2.2.1 Materiales de mezcla**

Inicialmente se propuso dos mezclas poliméricas: polipropileno/PET y HDPE/PET. El elemento común será el PET, por ende, se presentarán a continuación las características del polipropileno y HDPE.

Algunas de las ventajas del polipropileno respecto al HDPE son:

- Mayor rigidez y dureza.
- Mayor resistencia a la fatiga y a altas temperaturas.
- Mayor permeabilidad (gases y humedad).
- Mayor esfuerzo tensil.
- Menor densidad.

Mientras que las ventajas del HDPE respecto al polipropileno son las siguientes:

- Mayor flexibilidad.
- Mayor disponibilidad en el mercado.
- Inerte químicamente.
- Menor costo, tanto de obtención como de producción.

- Mayor resistencia al impacto.
- Menor higroscopicidad.

Algunos puntos comunes es que se mantienen estables a temperatura ambiente, a pesar de que el polipropileno resiste mejor a altas temperaturas y el polietileno a bajas temperaturas. Ambos son buenos para inyección. Y en cuanto a una categoría de toxicidad son similares.

**Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de PET/PP vs PET/HDPE**

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Polipropileno/PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso.</li> <li>• Permeabilidad.</li> <li>• Tenacidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo.</li> <li>• Higroscopicidad.</li> <li>• Disponibilidad.</li> </ul>
HDPE/PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidad.</li> <li>• Costo.</li> <li>• Higroscopicidad.</li> <li>• Tenacidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permeabilidad.</li> <li>• Peso.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## 2.2.2 Proceso de manufactura de paneles

Para el proceso de manufactura de paneles se ha propuesto realizarlo por compresión y moldeo por inyección.

### A. Extrusión

La extrusión es un proceso continuo, ideal para piezas con sección transversal compleja y longitud indefinida. Este proceso consiste en la fundición de pellets por la acción de resistencias ubicadas a lo largo de un barril que contiene un tornillo el cual también contribuye al proceso de fundición y además tiene una acción de transporte de material.

Entre las principales ventajas de este proceso está el costo-beneficio a grandes volúmenes ya que la producción es continua, lo que le vuelve altamente eficiente, de igual forma, los costos son realmente bajos ya

que para mantener la operación continua solo se requiere electricidad y la materia prima, el mantenimiento no es algo complicado en este tipo de máquinas puesto que no contienen gran cantidad de elementos comparadas con inyectoras por ejemplo, en las extrusoras solo se tiene dos etapas de proceso lo que reduce notablemente las variables involucradas. Una desventaja podría ser la antigüedad de este tipo de maquinaria y su menor grado de automatización si se compara con otros tipos de procesamiento de plásticos.

#### B. Moldeo por inyección

Este proceso de manufactura de polímeros consiste en calentar el material hasta conseguir un estado en extremo maleable, el cual fluye al ejercer altas presiones y obligándole a ocupar toda la cavidad del molde, el mismo que puede tener formas muy diversas y complejas, siendo ésta una de las principales ventajas del proceso. El tiempo de fabricación está entre 10 y 30 segundos, además puede tener molduras múltiples lo que le convierte en el principal proceso de transformación en la industria del plástico puesto que sus características apuntan a la producción masiva. La acción del tornillo a más de crear un gradiente de presión y calentamiento uniforme garantiza una mezcla homogénea del material que probablemente no se haya conseguido en la etapa de extrusión, como resultado las propiedades mecánicas se incrementarán. Los costos de un molde para inyección dependiendo de su tamaño pueden llegar a cientos de miles de dólares, sin embargo, se tiene un límite en cuanto al tamaño, manejando únicamente piezas de hasta 25 kg. No obstante, el moldeo por inyección resulta más económico que otros procesos cuando se tiene gran producción de piezas.

**Tabla 2.2 Ventajas y desventajas del proceso de compresión e inyección**

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Extrusión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes dimensiones longitudinales.</li> <li>• Complejas secciones transversales.</li> <li>• Mantenimiento.</li> <li>• Producción continua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatización.</li> </ul>
Inyección	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatización.</li> <li>• Mantenimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limitadas dimensiones longitudinales.</li> <li>• Secciones transversales más simples.</li> <li>• Producción no continua.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## 2.3 Matriz Solución

### 2.3.1 Materiales de la mezcla

La resolución de los materiales principales a emplearse para la preparación de las mezclas que serán la materia prima para la elaboración de las tejas se basará en cinco criterios de selección de la mejor alternativa, los cuales se encuentran definidos a continuación:

- Toxicidad: Implica el impacto ambiental y los daños a la salud del ser humano que el material pueda causar.
- Tenacidad: Definido como la capacidad de absorción de energía del material.
- Densidad: Determinado por la cantidad de masa del material contenido en una unidad de volumen.
- Permeabilidad: Definido como la capacidad de un polímero de absorber gas y humedad.

- Envejecimiento térmico: Efecto de degradación del polímero cuando se le sujeta a temperaturas elevadas por debajo de la  $T_m$ . (Groover, 2007)

**Tabla 2.3 Calificación de criterios**

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

En la tabla 2.4 se muestra la selección de la mejor alternativa de solución. Se presentan los criterios de selección previamente con su respectiva ponderación, de igual forma, se observan las alternativas de solución con su respectiva calificación para cada criterio de acuerdo con la tabla 2.3. Para obtener el puntaje final será el producto entre el porcentaje de ponderación del criterio a analizar y la calificación que se le otorga conforme satisfaga los requerimientos inicialmente planteados para el diseño.

**Tabla 2.4 Matriz de decisión del material**

ALTERNATIVA		Polipropileno		Poliuretano	
		Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
<b>Tenacidad</b>	35%	3	1.05	5	1.75
<b>Toxicidad</b>	25%	4	1	3	0.75
<b>Permeabilidad</b>	20%	4	0.8	3	0.6
<b>Densidad</b>	10%	5	0.5	4	0.4
<b>Envejecimiento térmico</b>	10%	4	0.4	4	0.4
		<b>TOTAL</b>	<b>3.75</b>	<b>TOTAL</b>	<b>3.9</b>

El poliuretano es la alternativa que mejor se ajusta a los requerimientos del material obteniendo un puntaje total de 3.9 frente al polipropileno de 3.75, la pequeña diferencia indica que ambas opciones eran buenas para la aplicación. El factor predominante del poliuretano es su tenacidad lo que representa una gran ventaja si se desea emplearlo luego en paneles para techo.

### **2.3.2 Proceso de manufactura de paneles**

La decisión del proceso a utilizarse para la elaboración de los paneles se basará en cinco criterios de selección que se detallan a continuación con sus respectivas descripciones:

- Automatización: es la capacidad que tiene cada máquina para desenvolverse de manera autónoma, y de esta forma reducir costos por operadores.
- Dimensiones: es la limitante en cuanto a dimensiones que posee cada máquina para el procesamiento del producto.
- Forma: la factibilidad de la máquina de manufacturar formas con compleja sección transversal.

- Producción: un proceso continuo tiene mayor capacidad de producción y por ende mejores rendimientos.
- Mantenimiento: se establece por el grado de dificultad al encontrar repuestos, mano de obra, y control permanente del equipo.

Se considera ahora realizar la respectiva ponderación para cada lineamiento, la cual estará en un rango de 1 a 5 tomando las consideraciones que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 2.5 Calificación de criterios**

<b>Condición</b>	<b>Calificación</b>
Excelente	5
Muy bueno	4
Bueno	3
Regular	2
Malo	1

En la tabla 2.6 se muestra la selección de la mejor alternativa de solución. Se presentan los criterios de selección previamente con su respectiva ponderación, de igual forma, se observan las alternativas de solución con su respectiva calificación para cada criterio de acuerdo con la tabla 2.5. Para obtener el puntaje final será el producto entre el porcentaje de ponderación del criterio a analizar y la calificación que se le otorga conforme satisfaga los requerimientos inicialmente planteados para el diseño.



**Tabla 2.6 Matriz de decisión del proceso de manufactura**

ALTERNATIVA		Extrusión		Moldeo por Inyección	
		Calificación	Puntaje	Calificación	Puntaje
<b>Producción</b>	30%	5	1.5	3	0.9
<b>Dimensiones</b>	25%	5	1.25	2	0.5
<b>Forma</b>	20%	5	1	3	0.6
<b>Mantenimiento</b>	15%	4	0.6	3	0.45
<b>Automatización</b>	10%	3	0.3	5	0.5
		<b>TOTAL</b>	<b>4.65</b>	<b>TOTAL</b>	<b>2.95</b>

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver en la tabla 2.6 la mejor opción de proceso de manufactura para esta aplicación es la extrusión del perfil del panel, superando al moldeo por inyección en casi todos los criterios, excepto el de automatización, que es realmente irrelevante para este caso tal como lo indica su ponderación de apenas el 10%. De esta forma, el proceso seleccionado para la producción de los paneles para techo es la extrusión de perfil.

## 2.4 Procesamiento de mezclas

### 2.4.1 Materiales

Los materiales empleados para el desarrollo de las mezclas fueron PET Y HDPE reciclados, en forma de hojuelas y pellets respectivamente. También, se empleó un copolímero como compatibilizador debido a la inmiscibilidad existente entre el PET y HDPE, el LOTADER AX8840: etileno metacrilato de glicidilo, y la organoarcilla Cloisite 20A.

Las distintas mezclas se realizaron en las siguientes proporciones:

**Tabla 2.7 Proporciones de las mezclas realizadas**

<b>Material</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Condición</b>
<b>rPET</b>	70	Fijo
<b>rHDPE</b>	30	Fijo
<b>EGMA</b>	5	Variable
<b>C20A</b>	3	Variable

Fuente: Elaboración propia

La condición de variabilidad indica que el componente puede estar o no presente en la mezcla.

#### **2.4.2 Lavado y secado**

Tanto el PET como el HDPE reciclados deben ser previamente lavados, con agua y detergente al menos tres veces, hasta que la tonalidad del agua sea cristalina, en esta fase, también se requiere separar etiquetas, restos de polipropileno o de elastómeros que suelen estar incluidos entre los desechos postindustriales de HDPE. Posteriormente, deben ser secados en una mufla en recipientes de aluminio a 100° durante 24 horas para eliminar por completo la humedad. Por otra parte, el compatibilizador y la organoarcilla también deben secarse en una mufla a 60° durante 24 horas.

#### **2.4.3 Proceso de mezclado**

Una vez secadas las materias primas, inmediatamente se procede a pesarlas en los porcentajes indicados en la tabla 2.7. Mezclas de rPET/rHDPE junto con la organoarcilla y compatibilizador en sus distintas configuraciones fueron procesados en 2 pasos: extrusión y moldeo por inyección.

##### ***Extrusión***

Para la primera etapa se empleó una extrusora de tornillo simple con un L/D= 26. El perfil de temperaturas definido para la extrusión puede observarse en la tabla 2.8. Este perfil fue aplicado a todas las mezclas a

una revolución de tornillo de 27 rpm. Las mezclas extruidas fueron enfriadas en una tina, luego peletizadas a través de una picadora para después ser secadas nuevamente a 100°C durante 24 horas, eliminando de esta manera la humedad obtenida durante el proceso de extrusión para posteriormente ser sometidas a la segunda etapa de moldeo por inyección.

**Tabla 2.8 Perfil de temperaturas de extrusión**

Descripción	Alimentación	Compresión		Dosificación	
Zona de extrusión	1	2	3	4	5
Temperatura [°C]	205	245	265	275	270

Fuente: Elaboración propia

### ***Inyección***

Para obtener las probetas de ensayos de tracción, impacto Charpy y Vicat se procedió a inyectar la mezcla. Como se explicó anteriormente, previo a la inyección se tuvo que peletizar los filamentos en un molino y secarlos durante 24 horas a 100°C. Pasado este tiempo, se procedió a depositar los pellets en la inyectora con el perfil de temperaturas que se muestra en tabla 2.9. La velocidad del tornillo fue de 90 rpm lo que optimizó el mezclado que nos permitió obtener una mezcla más homogénea durante este proceso. La temperatura del molde fue de 15°C con el chiller operativo, condición que otorgó resistencia al material, y en un set de muestras se añadió un back pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup>.

**Tabla 2.9 Perfil de temperaturas del Moldeo por Inyección**

Descripción	Dosificación	Compresión		Alimentación
Zona de inyección	1	2	3	4
Temperatura [°C]	280	270	260	250

Fuente: Elaboración propia

## 2.5 Ensayos

### 2.5.1 Difractometría de rayos X

El grado de intercalación de la organoarcilla Cloisite 20A en el material compuesto rPET/rHDPE fue caracterizado a través del método XRD. Esta técnica fue desarrollada a través del difractómetro X'Pert PRO de la marca PANalytical cuyas especificaciones se encuentran en anexos. Las mediciones fueron tomadas a partir de probetas inyectadas de Vicat empleando una fuente de radiación de ánodo de Cu con una longitud de onda  $K\alpha = 1.54060 \text{ \AA}$  a una diferencia de potencial de 40 kV y una corriente de 30 mA. El ángulo inicial detectado por el goniómetro fue de  $2.025^\circ$  y el final de  $11.975^\circ$  a una velocidad de  $0.0025^\circ$  por segundo.

En particular, se tomó como referencia el difractograma de la organoarcilla Cloisite 20A para poder visualizar su dispersión con la muestra que contenía únicamente rPET y luego exclusivamente rHDPE, para posteriormente comparar cómo estaría dispersa una vez mezclados ambos plásticos reciclados en los porcentajes definidos en la tabla 2.7.

### 2.5.2 Análisis Termogravimétrico

La termogravimetría es una técnica empleada para medir la masa de una muestra cuando se calienta, enfría o se encuentra sostenida a una determinada temperatura bajo una atmósfera definida. Se consideró este análisis para el presente proyecto porque nos permitió conocer la estabilidad térmica de cada una de las muestras y corroborar el estado de dispersión y afinidad de la arcilla en cada una ellas a través de la distinción de zonas de degradación en los termogramas generados. Estas zonas presentaron pérdidas en masa por la volatilización de componentes por ejemplo humedad, solventes o monómeros, la descomposición del material y finalmente la presencia de componentes inorgánicos inertes tales como cenizas o residuos de organoarcilla. Los termogramas apropiados para este análisis fueron Peso (%) vs Temperatura y la Derivada del Peso ( $\%/^\circ\text{C}$ ) vs Temperatura. Para llevar a cabo este análisis, cada muestra extruida de

aproximadamente 10 mg fue calentada desde los 30°C hasta los 600°C a una razón de 10°C/min bajo una atmósfera de nitrógeno líquido acorde a la norma ASTM E1131 debido a que el cambio de un ambiente inerte a oxidativo nos ayuda a quemar el carbono para posteriormente determinar la ceniza o contenido de relleno y/o refuerzo existente en la muestra.

Se consideraron como temperaturas de degradación ( $T_d$ ) a aquellas temperaturas correspondientes a la descomposición al 5% y 50% de pérdida de masa. Además, se incluyó aquella temperatura en su máxima rapidez de descomposición al tomar en cuenta el pico desarrollado en la termograma de la primera derivada del peso. El análisis de los termogramas fue obtenida a través del software TA Universal Analysis proporcionado por TA Instruments.

### 2.5.3 Análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Las propiedades térmicas y de cristalinidad se determinaron a partir de un calorímetro de barrido diferencial Q2000 de TA Instruments, donde cada una de las muestras fue sometida a una primera etapa de calentamiento desde la temperatura ambiente hasta los 300°C, para suprimir cualquier historial térmico previo, luego la muestra fue enfriada hasta los 30°C para obtener la temperatura de cristalización ( $T_c$ ) a través del pico exotérmico generado en la curva DSC y finalmente calentada hasta los 300°C para obtener la temperatura de fusión ( $T_m$ ) en este segundo ciclo. Todo esto a una razón de 10°C/min bajo una atmósfera de nitrógeno líquido de acuerdo con la norma ASTM D3418-15. El grado de cristalinidad de los nanocompuestos fue determinado a través de la ecuación 3 donde  $\Delta H_m$  corresponde a la entalpía de fusión obtenida de la curva DSC durante el segundo ciclo de calentamiento  $\Delta H_m^0$  es la entalpía de fusión del polímero 100% cristalino. Para el PET,  $\Delta H_m^0 = 119.8 \frac{\text{J}}{\text{g}}$  y para el HDPE  $\Delta H_m^0 = 293 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ . (Dole & Wunderlich, 1957)

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \quad \text{ec. 1}$$

#### **2.5.4 Morfología**

Para conocer el grado de adhesión y la distribución de los componentes de cada una de las muestras, se empleó la microscopía electrónica de barrido (SEM) el cual se desarrolló a un voltaje de 10 kV, una presión de 22 MPa y una magnificación de 2000X. Previo a su observación, cada una de las muestras extruidas se rompieron bajo una atmósfera de nitrógeno líquido para luego ser recubiertas con una aleación de oro-paladio y así obtener mejores condiciones de imagen.

#### **2.5.5 Ensayo de tracción**

Para el ensayo de tracción de las probetas de diferentes mezclas se necesitó de entre 6 y 7 probetas por cada grupo, siendo de especial interés aquellas que contienen organoarcilla. Todas las probetas fueron inyectadas y cumplían con las dimensiones estandarizadas. Se buscó determinar el esfuerzo último y el módulo de Young del material mediante esta prueba. Siendo éste el parámetro fundamental para escoger la mezcla óptima que será empleada en la fabricación del panel para techo, el cual deberá tener el más alto módulo de Young, ya que en estas estructuras se requiere de la máxima rigidez posible.

Ahora bien, el ensayo de tracción es un ensayo destructivo que permite obtener las principales propiedades mecánicas de un material, como los esfuerzos de fluencia y último, la elongación que brinda una idea de cuán dúctil es el material, el módulo de Young que determina la rigidez, y el área bajo la curva representa la tenacidad del material. Este ensayo se rige por la norma ASTM D638 (ASTM, 2003), en la cual se establece velocidades bajas para materiales rígidos y velocidades altas para materiales no rígidos. Las mezclas por ensayar contienen mayor cantidad de rPET, lo cual las vuelve considerablemente rígidas, inicialmente se consideró trabajar con una velocidad de 50 mm/min, pero la probeta no cumplió el tiempo de fractura establecido mínimo por la norma de 30 s, por esta razón se optó por hacer la prueba a 5 mm/min fracturándose la probeta a 34 s aproximadamente y cumpliendo así con los requerimientos de la norma.

## **2.6 Modelado y simulación**

### **2.6.1 Especificaciones de diseño**

En el presente proyecto se ha optado por darle una aplicación al material a obtener. Esta aplicación debe ser sostenible, implicando así una responsabilidad ambiental, económica y social. Contribuye al concepto de economía circular por la reutilización de desechos al emplearlos como materia prima en procesos industriales con el fin de obtener un nuevo producto, mucho más económico, pero de una calidad similar o superior a los productos que se encuentran actualmente en el mercado, beneficiando así a los sectores más pobres de la sociedad. Bajo esta premisa se establecen a continuación los factores de influencia a considerar en el diseño de paneles para techo.

- **Peso:** se requiere que los paneles sean lo más ligeros posibles para facilitar su transporte en grandes cantidades.
- **Tamaño:** los paneles no deben medir más de 3 m de largo y su ancho no debe exceder de 1.2 m, de tal forma que sean fácilmente manipulables.
- **Costo:** el costo de fabricación de los paneles no debe ser elevado ya que va orientado a programas gubernamentales de vivienda.
- **Mantenimiento:** al ser de plástico su limpieza se puede realizar incluso con chorros de agua. Fácil cambio de piezas por deterioro.
- **Instalación:** la instalación debe ser sencilla y rápida, para ello debe tener partes que encajen unas con otras en todas las direcciones, como si de un rompecabezas se tratase.
- **Permeabilidad:** debe tener sellos que eliminen la posibilidad de filtrado de agua de lluvia u otras sustancias del medio ambiente.
- **Acabado:** debe poseer un buen acabado superficial, ya que estos paneles irán montados directamente sobre las vigas.

- Resistencia: debe tener alta resistencia a esfuerzos estáticos y dureza considerable para evitar que cualquier agente externo pueda penetrar en la vivienda.
- Aislante: el diseño debe contribuir en las propiedades aislantes del producto para mantener climatizada la vivienda.

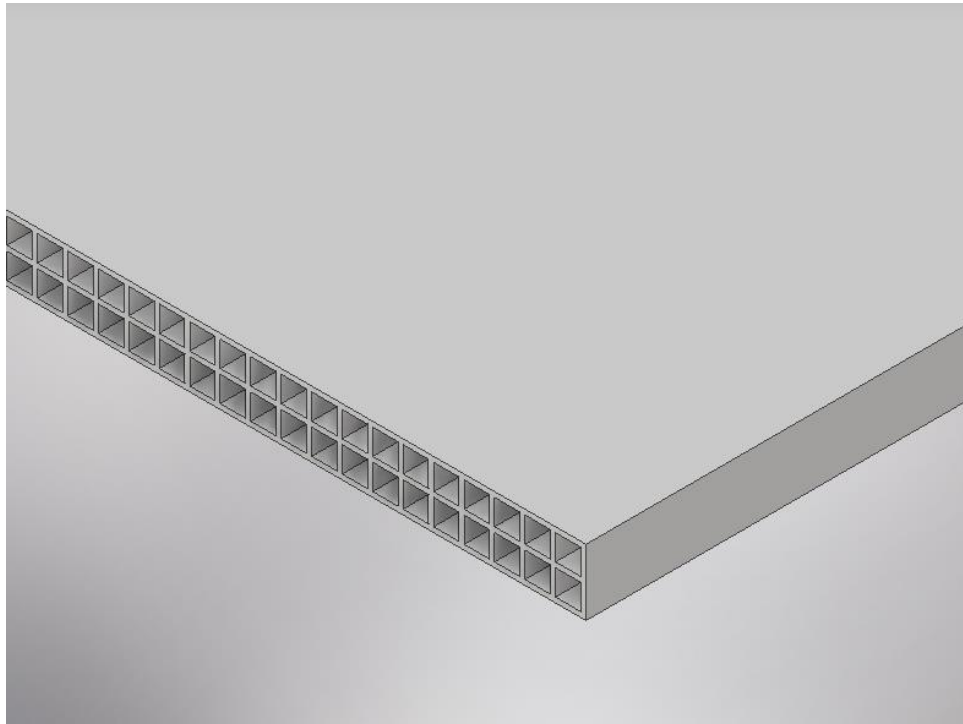
### **2.6.2 Diseño de forma**

Establecidos todos los factores de influencia y con base en diseños de productos similares se procedió a realizar cuatro alternativas de diseño en un software CAD, del cual se elegirá el diseño óptimo tomando como puntos principales la rigidez y la facilidad de manufactura. Para todos los modelos se tienen secciones huecas con el objetivo de aumentar el aislamiento y reducir el peso, mientras que la doble fila tiene como objetivo brindarle robustez al diseño. A continuación, se detalla cada alternativa con sus respectivas dimensiones.

#### **Alternativa 1**

Dado que para el proceso de extrusión que se eligió para la manufactura del panel, es aconsejable usar espesores de pared de 2 a 4 mm, por ende, las cuatro características oscilarán entre este par de valores. La primera tendrá 2 mm de espesor de pared y sección hueca cuadrada, tal como se muestra en la en la figura 2.3:





**Figura 2.3 Vista isométrica parcial del panel alternativa 1**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.10 Dimensiones de panel alternativa 1**

<b>Sección sólida</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Ancho	962
Altura	26
Profundidad	3000
Espesor de pared	2
<b>Sección hueca</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Altura	10
Ancho	10

Fuente: Elaboración propia

Para calcular la inercia del panel se emplearán las siguientes ecuaciones donde se incluye el cálculo de inercia mediante el teorema de ejes paralelos

o Steiner. Es importante aclarar que para esta configuración el número de secciones huecas son 160 en total, 80 en la primera fila y 80 en la segunda.

**Tabla 2.11 Variables involucradas en el cálculo de inercia**

Variabes	Símbolo
Inercia sección hueca	$I_{SH}$
Inercia total sección hueca	$I_{TSH}$
Inercia sección sólida	$I_{SS}$
Inercia total	$I_T$
Base de sección hueca	$b$
Altura de sección hueca	$h$
Base de sección sólida	$B$
Altura de sección sólida	$H$

Fuente: Elaboración propia

Inercia sección hueca:

$$I_{SH} = \frac{bh^3}{12} \quad ec.2$$

$$I_{SH} = \frac{10 * 10^3}{12} = 833.33 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = n * I_{SH} \quad ec.3$$

$$I_{TSH} = 160 * I_{SH} = 160 * 833.33 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 133333.33 \text{ mm}^4$$

Inercia sección sólida:

$$I_{SS} = \frac{BH^3}{12} \quad ec.4$$

$$I_{SS} = \frac{962 * 26^3}{12} = 1409009.33 \text{ mm}^4$$

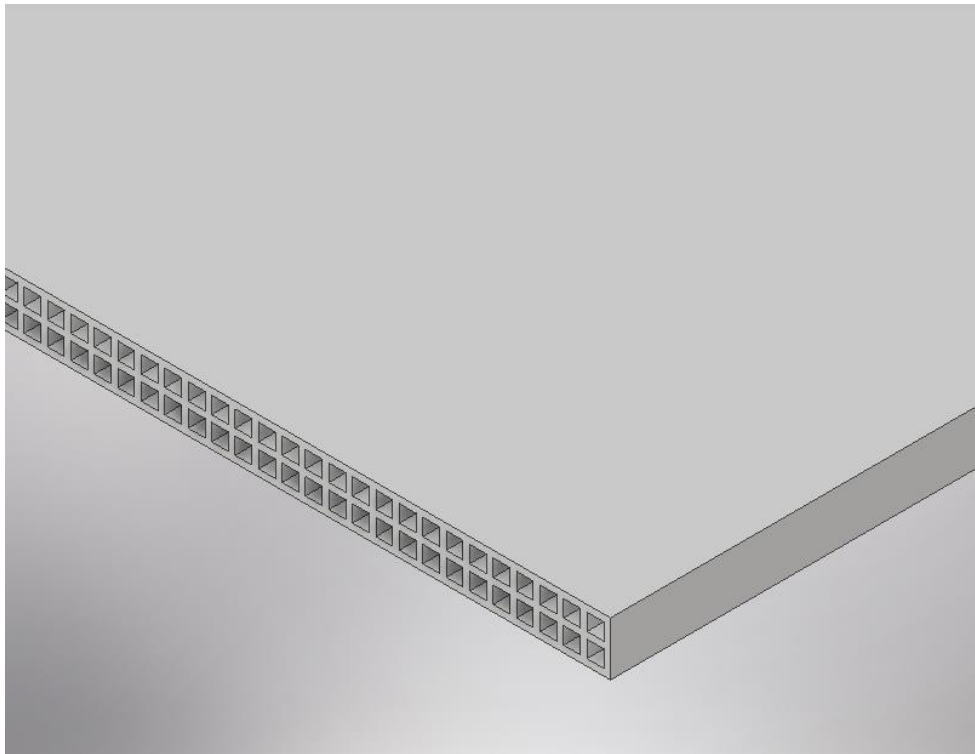
Inercia total

$$I_T = I_{SS} - I_{TSH} \quad ec. 5$$

$$I_T = 1409009.33 - 133333.33 = 1275676 \text{ mm}^4$$

### Alternativa 2

La segunda opción tiene también sección cuadrada de las mismas dimensiones que la anterior, con la diferencia de que el espesor de pared será de 4mm. El número de elementos huecos sigue siendo 160.



**Figura 2.4 Vista isométrica parcial del panel alternativa 2**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.12 Dimensiones de panel de alternativa 2**

<b>Sección sólida</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Ancho	1124
Altura	32
Profundidad	3000
Espesor de pared	4
<b>Sección hueca</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Altura	10
Ancho	10

Fuente: Elaboración propia

Inercia sección hueca:

$$I_{SH} = \frac{bh^3}{12} = \frac{10 * 10^3}{12} = 833.33 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 160 * I_{SH} = 160 * 833.33 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 133333.33 \text{ mm}^4$$

Inercia sección sólida:

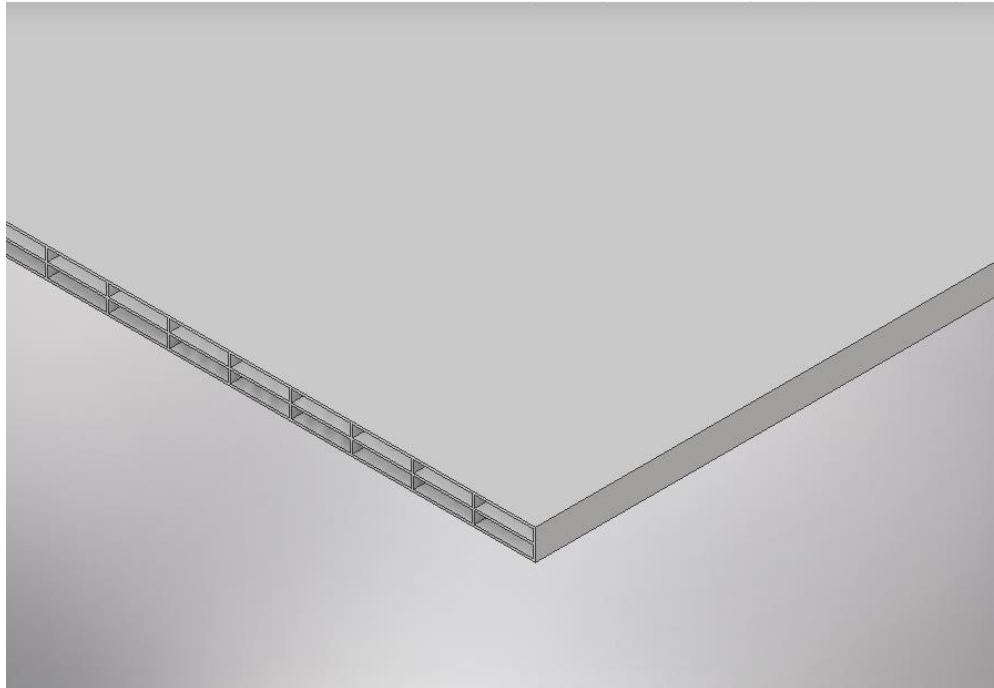
$$I_{SS} = \frac{BH^3}{12} = \frac{1124 * 32^3}{12} = 3069269.33 \text{ mm}^4$$

Inercia total

$$I_T = I_{SS} - I_{TSH} = 3069269.33 - 133333.33 = 2935936 \text{ mm}^4$$

### **Alternativa 3**

La alternativa 3 tiene como sección hueca a una sección rectangular y un espesor de pared de 2 mm. El número de elementos es 40, 20 en la fila de arriba y 20 en la de abajo.



**Figura 2.5 Vista isométrica del panel alternativa 3**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.13 Dimensiones de panel de alternativa 3**

Sección sólida	Dimensiones (mm)
Ancho	1042
Altura	26
Profundidad	3000
Espesor de pared	2
Sección hueca	Dimensiones (mm)
Altura	10
Ancho	50

Fuente: Elaboración propia

Inercia sección hueca:

$$I_{SH} = \frac{bh^3}{12} = \frac{50 * 10^3}{12} = 4166.66 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 40 * I_{SH} = 40 * 4166.66 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 166666.66 \text{ mm}^4$$

Inercia sección sólida:

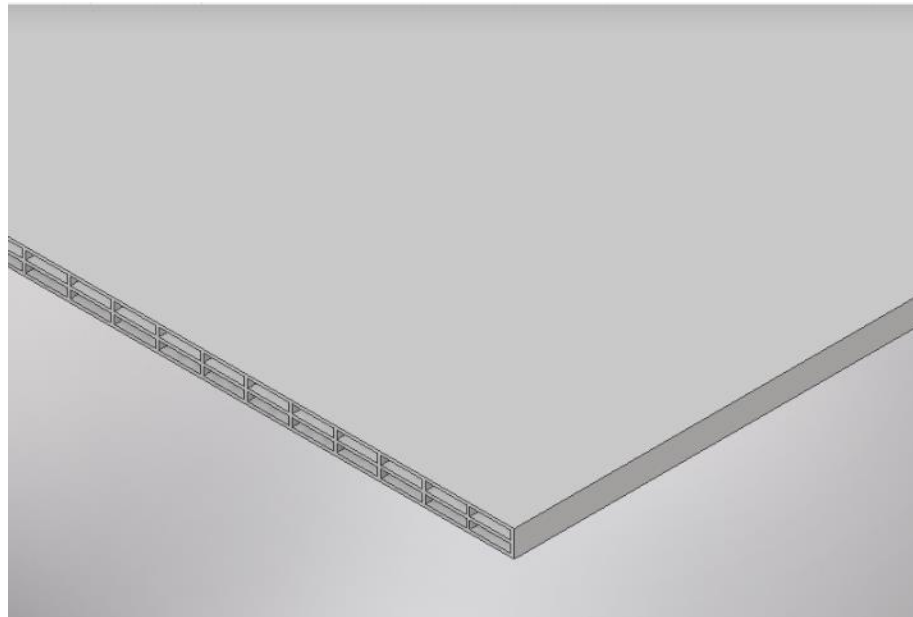
$$I_{SS} = \frac{BH^3}{12} = \frac{1042 * 26^3}{12} = 1526182.66 \text{ mm}^4$$

Inercia total

$$I_T = I_{SS} - I_{TSH} = 1526182.66 - 166666.66 = 1359516 \text{ mm}^4$$

#### **Alternativa 4**

La cuarta y última alternativa tiene también sección hueca rectangular de las mismas dimensiones que la alternativa anterior, pero con un espesor de pared de 4 mm. El número de elementos huecos sigue siendo de 40



**Figura 2.6 Vista isométrica parcial del panel alternativa 4**

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 2.14 Dimensiones de panel de alternativa 4**

<b>Sección sólida</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Ancho	1084
Altura	32
Profundidad	3000
Espesor de pared	4
<b>Sección hueca</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
Altura	10
Ancho	50

Fuente: Elaboración propia

Inercia sección hueca:

$$I_{SH} = \frac{bh^3}{12} = \frac{50 * 10^3}{12} = 4166.66 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 40 * I_{SH} = 40 * 4166.66 \text{ mm}^4$$

$$I_{TSH} = 166666.66 \text{ mm}^4$$

Inercia sección sólida:

$$I_{SS} = \frac{BH^3}{12} = \frac{1084 * 32^3}{12} = 2960042.66 \text{ mm}^4$$

Inercia total

$$I_T = I_{SS} - I_{TSH} = 2960042.66 - 166666.66 = 2793376 \text{ mm}^4$$

Como se puede observar, la alternativa con mayor inercia es la segunda opción de 4 mm de espesor y sección cuadrada, seguida de la opción 4 con sección rectangular. Sin embargo, se debe considerar además qué tan factible resulta manufacturar cualquiera de estas dos alternativas, sin que luego de ser extruidas sufran deformaciones debido a los gradientes de temperatura internos. Así, el factor predominante en la selección del diseño sería la manufacturabilidad.

### Número de Biot

Para determinar el gradiente de temperatura interno en cada alternativa se debe hallar el coeficiente de transferencia de calor  $U_o$  y con éste el número Bi. Se dice que un producto con un número Biot menor a 1 tiene un pequeño gradiente de temperatura interno, lo que implica que se enfriará como un cuerpo uniforme y será menos propenso a deformarse, mientras que si el número de Biot es más grande que 1 este tendrá un gran gradiente de temperatura interno y no se enfriará de manera uniforme lo que podría afectar las dimensiones finales del producto.

Para hallar la razón de transferencia de calor del proceso, se tiene k, la conductividad térmica, propiedad del material que no se tiene, pero se utilizará los datos del PET para fines prácticos, A el área de sección transversal, t el espesor de pared y  $\Delta T$  la diferencia entre la temperatura de fundición y la temperatura de salida.

$$Q_k = \frac{kA}{t} \Delta T \quad ec.6$$

A su vez la razón de transferencia de calor también viene dado por  $U_o$  el coeficiente de transferencia de calor, A la sección transversal del producto extruido y  $\Delta T$  ya definido previamente.

$$Q_h = U_o A \Delta T \quad ec.7$$

El número de Biot es la relación entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción. El número de Biot se calcula de la siguiente manera:

$$Bi = \frac{U_o * t}{k} \quad ec.8$$

La geometría es el factor determinante en este parámetro.

Asumiendo un  $U_o$  de  $500 \frac{W}{m^2 * K}$  para convección natural del agua, puesto que el sistema de enfriamiento será una tina de agua a  $15^\circ$  aproximadamente y una conductividad térmica de  $0.24 \frac{W}{m * K}$  del PET:



**Tabla 2.15 Números de Biot para cada alternativa**

<b>Alternativa</b>	<b><i>Bi</i></b>
<b>1</b>	4.166
<b>2</b>	8.333
<b>3</b>	4.166
<b>4</b>	8.333

Fuente: Elaboración propia

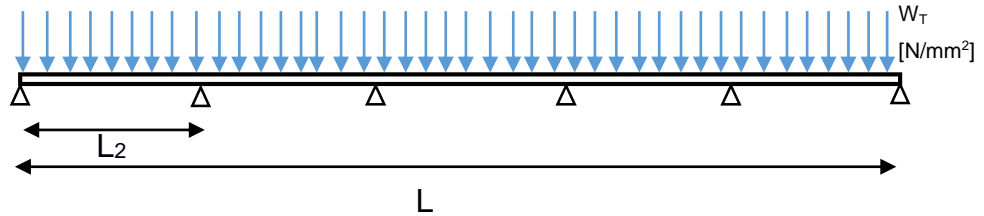
De aquí se tiene 2 opciones, la primera y tercera alternativa que tienen el número de Biot más pequeño, sin embargo, de estas dos la tercera alternativa es la que tiene mayor inercia, por ende, el diseño seleccionado para esta aplicación principalmente por su facilidad de manufactura y su rigidez es la alternativa 3.

### **2.6.3 Análisis de cargas**

#### **Diagrama de Cuerpo Libre**

Las cargas que soportará el panel son netamente estáticas, en este caso solo se considerará la carga de una persona haciendo mantenimiento y una carga de granizo en caso de que el panel sea empleado en la región sierra, todos estos valores están normalizados por la NEC (Norma Ecuatoriana de la Construcción). El modelo será de una “viga” (panel) con soportes fijos, los cuales representan a las correas (vigas de sección C) a las cuales se les aplica cargas de flexión. Por ende, mediante un código en el programa Matlab se hallará la máxima fuerza cortante, momento flector y deflexión. La longitud de la “viga” será variable, ya que representa la distancia entre correas, teniendo distintos valores de deflexión para cada caso.

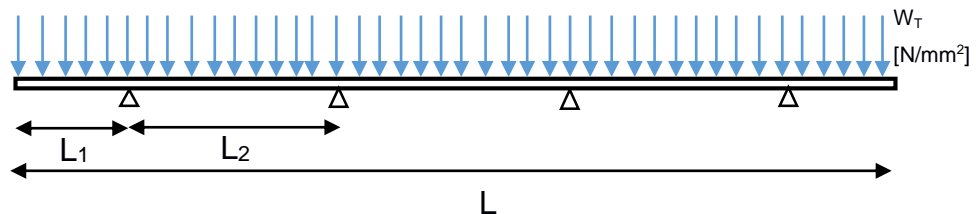
Para mostrar el esquema básico se empleará la configuración cuando la distancia entre correas es de 600 mm.



**Figura 2.7 Diagrama de cuerpo libre simplificado para configuración 1**

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 2.8 el panel va a estar sometido a cargas distribuidas que resultan de seleccionar la combinación más crítica entre carga viva y carga muerta según la NEC, como se detallará más adelante. Sin embargo, este DCL, se cumple solo cuando la distancia entre correas es múltiplo de la distancia L total del panel que sería su profundidad de 3000 mm. Caso contrario, el esquema cambia ligeramente:



**Figura 2.8 Diagrama de cuerpo libre para configuración 2**

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver el cambio no es drástico, sin embargo, esto cambiará las condiciones de frontera.  $L_1$  dependerá de la longitud L y  $L_2$ , puesto que el número de apoyos será la parte entera de la división entre L y  $L_2$ , mientras que  $L_1$  sería la diferencia de éstas partida en 2, la principal razón por la cual se diseña de esta forma es debido a que se busca simetría en el modelo para efectos de simplificar las ecuaciones, y en el diseño por cuestiones de estabilidad y estética.

## Carga Distribuida

La carga distribuida que soportará el panel viene dada por la carga muerta y la carga viva de la cubierta. Se sabe que la carga muerta para un peso aproximado de 225.4 N (m=23 kg) del panel y  $0.7 \frac{kN}{m^2}$  de carga viva de cubierta (NEC). No obstante, existen algunas combinaciones de éstas estipuladas por la NEC, de las cuales solo se escogen las tres primeras por ser las únicas que incluyen ambas cargas sin repetir su configuración, estas combinaciones se detallan como sigue:

- Combinación 1

Para la combinación 1 es necesario llevar el peso a unidades de fuerza por metro cuadrado, por lo tanto, se dividirá este valor para el área normal a la línea de acción de la fuerza.

$$P = \frac{W}{A} \quad ec. 9$$
$$P = \frac{23 * 9.8}{1.042 * 3} = 72.1 \frac{N}{m^2}$$

Ahora bien, la combinación 1 viene dada por la siguiente expresión:

$$W_T = 1.2 D + 0.5L_r \quad ec. 10$$

De donde,  $W_T$  será la carga distribuida total,  $D$  la carga muerta y  $L_r$  la carga viva de cubierta.

- Combinación 2

La combinación 2 viene dada por la siguiente expresión:

$$W_T = 1.2 D + 1.6L_r \quad ec. 11$$

- Combinación 3

La combinación 3 se obtiene de la siguiente manera:

$$W_T = 1.4 D \quad ec. 12$$

## Ecuaciones

El análisis es netamente estático y como tendrá al menos 3 apoyos para las distancias entre correas previamente establecidas: 600, 700, 800, 900 y 1000 mm, se empleará el teorema de los tres momentos, con el fin de hallar una matriz que satisfaga a todos los casos. Por ende, se analizará la configuración 2 por ser la situación más extrema.

La ecuación general del teorema de los tres momentos es la que se muestra a continuación:

$$M_1L_1 + 2M_2(L_1 + L_2) + M_3L_2 + \frac{wL_1^3}{4} + \frac{wL_2^3}{4} = 6EI \left( \frac{Y_1}{L_1} + \frac{Y_2}{L_2} \right) \quad ec. 13$$

- **Primer tramo**

Para el primer tramo se tiene las siguientes condiciones iniciales:

$$M_1 = 0 \text{ y } Y_2 = 0$$

Para calcular  $M_2$  y considerando positivo el sentido antihorario:

$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \\ M_2 + wL_1 \frac{L_1}{2} &= 0 \\ M_2 &= -w \frac{L_1^2}{2} \end{aligned} \quad ec. 14$$

Reemplazando la ecuación 6 en la ecuación 5:

$$2 \left( -w \frac{L_1^2}{2} \right) (L_1 + L_2) + M_3L_2 + \frac{wL_1^3}{4} + \frac{wL_2^3}{4} = 6EI \left( \frac{Y_1}{L_1} \right) \quad ec. 15$$

Donde  $M_1$  es el momento en el extremo libre,  $L_1$  la distancia del extremo libre al primer apoyo,  $M_2$  el momento en el primer apoyo y  $M_3$  consecuentemente el momento en el apoyo contiguo. El término  $\frac{wL^3}{4}$  proviene del tipo de carga, tal como se muestra en el caso 2 de la figura 2.9:

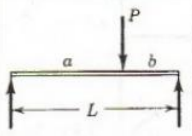
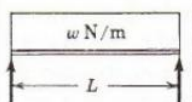
CASO No.	TIPO DE CARGA SOBRE EL TRAMO	$\frac{6A\bar{a}}{L}$	$\frac{6A\bar{b}}{L}$
1		$\frac{Pa}{L}(L^2 - a^2)$	$\frac{Pb}{L}(L^2 - b^2)$
2		$\frac{wL^3}{4} = \frac{WL^2}{4}$	$\frac{wL^3}{4} = \frac{WL^2}{4}$

Figura 2.9 Valores de  $\frac{6A\bar{a}}{L}$  y  $\frac{6A\bar{b}}{L}$  en función del tipo de carga

Fuente: (Ferdinand L. Singer, 2008)

Despejando las incógnitas:

$$M_3L_2 - 6EI \left( \frac{Y_1}{L_1} \right) = -\frac{wL_1^3}{4} - \frac{wL_2^3}{4} + 2 \left( w \frac{L_1^2}{2} \right) (L_1 + L_2) \quad ec. 16$$

• **Tramo 2 hasta tramo n**

Ahora bien, para los tramos siguientes se tienen las siguientes condiciones:

$$Y_1 = 0 \text{ y } Y_2 = 0$$

Para el tramo 2 se analizan los apoyos 2, 3 y 4, por lo que las incógnitas serán justamente los momentos en estos puntos. Cabe recalcar que  $L_2=L_3=L_4=\dots=L_{n-1}$ .

$$M_2L_2 + 2M_3(L_3 + L_2) + M_4L_3 + \frac{wL_2^3}{4} + \frac{wL_3^3}{4} = 0$$

$$4M_3L_2 + M_4L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} + \frac{wL_1^3}{2} * L_2 \quad ec. 17$$

Para el tramo 3 se analizan los apoyos 3, 4 y 5.

$$M_3L_3 + 2M_4(L_4 + L_3) + M_5L_4 + \frac{wL_3^3}{4} + \frac{wL_4^3}{4} = 0$$

$$M_3L_2 + 4M_4L_2 + M_5L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 18$$

Para el tramo 4 de igual forma, se analizan los apoyos contiguos, 4, 5 y 6.

$$M_4L_4 + 2M_5(L_5 + L_4) + M_6L_5 + \frac{wL_4^3}{4} + \frac{wL_5^3}{4} = 0$$

$$M_4L_2 + 4M_5L_2 + M_6L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 19$$

De este último par de ecuaciones se percibe un patrón que incluye un vector [1 4 1], por ello se presenta la ecuación para el apoyo n-3:

$$M_{n-3}L_2 + 4M_{n-2}L_2 + M_{n-1}L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec.20$$

La ecuación en el apoyo n por el contrario será muy parecida a la ecuación 2 con las siguientes condiciones:

$$M_n = 0 \text{ y } Y_1 = 0$$

Para calcular  $M_n$  y considerando positivo el sentido horario:

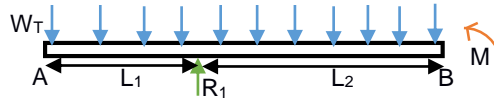
$$\begin{aligned} \sum M &= 0 \\ M_{n-2} + wL_1 \frac{L_1}{2} &= 0 \\ M_{n-2} &= -w \frac{L_1^2}{2} \end{aligned} \quad ec.21$$

$$M_{n-1}L_2 - 6EI \left( \frac{Y_1}{L_1} \right) = -\frac{wL_2^3}{2} + 2 \left( w \frac{L_1^2}{2} \right) (L_1 + L_2) \quad ec.22$$

Con estas ecuaciones se puede obtener su representación matricial e ingresarla a un programa en MATLAB como se muestra en el APÉNDICE B que entregue los resultados para cualquiera de las distancias entre correas seleccionadas.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & & 0 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_3 \\ M_4 \\ M_5 \\ M_6 \\ \vdots \\ M_{n-3} \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \\ Y_1 \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{wL_2^3}{2} + 2 \left( w \frac{L_1^2}{2} \right) (L_1 + L_2) \\ -\frac{wL_2^3}{2} + \frac{wL_1^3}{2} * L_2 \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ \vdots \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} + \frac{wL_1^3}{2} * L_2 \\ -\frac{wL_2^3}{2} + 2 \left( w \frac{L_1^2}{2} \right) (L_1 + L_2) \end{bmatrix} \quad ec.23$$

Mediante estática se puede obtener las reacciones, las cuales son necesarias para poder hallar los esfuerzos en el centro de cada tramo.



**Figura 2.10 Diagrama de cuerpo libre para reacciones**

Fuente: Elaboración propia

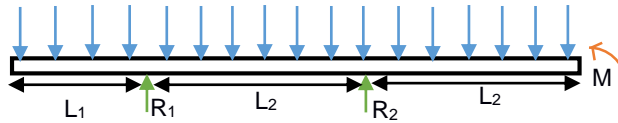
De tal forma que la sumatoria de momentos en el punto B es como sigue:

$$\sum M = 0$$

$$M_3 + w \frac{(L_1 + L_2)^2}{2} = R_1 L_2$$

$$R_1 = \frac{M_3 + w \frac{(L_1 + L_2)^2}{2}}{L_2} \quad \text{ec. 24}$$

Para el siguiente tramo:



**Figura 2.11 Diagrama de cuerpo libre para tramo 2**

Fuente: Elaboración propia

$$\sum M = 0$$

$$M_4 + w \frac{(L_1 + L_2 + L_2)^2}{2} - 2R_1 L_2 = R_2 L_2$$

$$R_2 = \frac{M_4 + w \frac{(L_1 + 2L_2)^2}{2} - 2R_1 L_2}{L_2} \quad \text{ec. 25}$$

Se puede deducir que los tramos siguientes tendrán la forma siguiente:

$$R_n = \frac{M_{n+2} + w \frac{(L_1 + n * L_2)^2}{2} - n * R_1 L_2}{L_2} \quad \text{ec. 26}$$

De igual forma, se realiza un código en MATLAB para obtener las reacciones en los apoyos, las cuales permitirán hallar los esfuerzos en el centro de cada tramo.

## Momento en las secciones intermedias

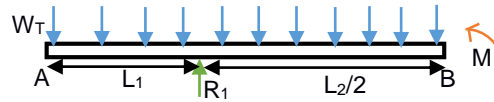


Figura 2.12 Diagrama de cuerpo libre para momento en el centro de la viga

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, la sumatoria de momentos, positivo en sentido antihorario, en el punto B es:

$$\sum M = 0$$

$$M_{12} + w \frac{\left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right)^2}{2} = \frac{R_1 L_2}{2}$$

$$M_{12} = -w \frac{\left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right)^2}{2} + \frac{R_1 L_2}{2} \quad \text{ec. 27}$$

Para el segundo tramo:

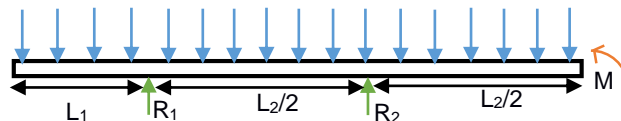


Figura 2.13 Diagrama de cuerpo libre para tramo 2

Fuente: Elaboración propia

$$\sum M = 0$$

$$M_{12} + w \frac{\left(L_1 + \frac{L_2}{2}\right)^2}{2} = \frac{R_1 L_2}{2}$$

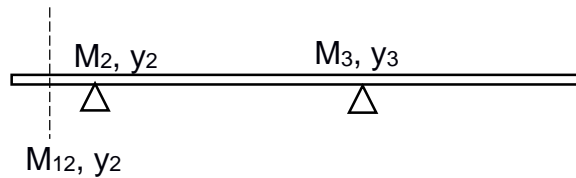
$$M_{22} = -w \frac{\left(L_1 + \frac{L_2}{2} + \frac{L_2}{2}\right)^2}{2} + 2 \frac{R_1 L_2}{2} + \frac{R_2 L_2}{2} \quad \text{ec. 28}$$

Una vez más a partir de estas ecuaciones se puede deducir la ecuación general:



$$M_{n2} = -w \frac{(L_1 + n \frac{L_2}{2})^2}{2} + n \frac{R_1 L_2}{2} + (n-1) \frac{R_2 L_2}{2} + (n-2) \frac{R_3 L_2}{2} + \dots + \frac{R_n L_2}{2} \quad ec. 29$$

Para hallar las deflexiones es necesario aplicar nuevamente la ecuación de los 3 momentos, sabiendo que se partirán ahora en  $2n+5$  pedazos, la deformación inicial  $y_1$  y la deformación  $y_{2n+5}$  son resultado de resolver la ecuación matricial (ec.25) se debe hallar por lo tanto todas las demás deformaciones sabiendo que en puntos impares la deformación es igual a cero y que los valores de momento y deflexión par son los del punto medio de cada tramo, se realiza un cálculo demostrativo:



**Figura 2.14 Diagrama empleado para determinar la deflexión en el centro de la viga**

De aquí se escoge como puntos para realizar el teorema de los tres momentos: 1, 2 y 3. Las condiciones son que  $y_2$  y  $y_3$  tienen un valor de cero, por ser apoyos fijos, mientras que la única incógnita en este caso será  $y_{12}$ :

$$\frac{M_{12} L_1}{2} + 2M_2 \left( \frac{L_1}{2} + L_2 \right) + M_3 L_2 + \frac{w \left( \frac{L_1}{2} \right)^2}{4} + \frac{w (L_2)^2}{4} = 6EI \left( \frac{y_{12}}{\frac{L_1}{2}} \right) \quad ec. 30$$

$$y_{12} = \left( \frac{L_1}{6EI} \right) \left( \frac{M_{12} L_1}{2} + 2M_2 \left( \frac{L_1}{2} + L_2 \right) + M_3 L_2 + \frac{w \left( \frac{L_1}{2} \right)^2}{4} + \frac{w (L_2)^2}{4} \right) \quad ec. 31$$

Esta ecuación es válida hasta la deformación  $y_{2n}$ , para  $y_{2n+2}$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{M_{2n+2} L_2}{2} + 2M_{2n+3} \left( \frac{L_2}{2} + L_1 \right) + M_{2n+5} L_1 + \frac{w \left( \frac{L_2}{2} \right)^2}{4} + \frac{w (L_1)^2}{4} = 6EI \left( \frac{y_{2n+2}}{\frac{L_2}{2}} + \frac{y_{2n+5}}{L_1} \right) \quad ec. 32$$

$$y_{2n+2} = \left( \frac{\left( \frac{M_{2n+2} L_2}{2} + 2M_{2n+3} \left( \frac{L_2}{2} + L_1 \right) + M_{2n+5} L_1 + \frac{w \left( \frac{L_2}{2} \right)^2}{4} + \frac{w (L_1)^2}{4} \right)}{6EI} - \frac{y_{2n+5}}{L_1} \right) \frac{L_2}{2} \quad ec. 33$$

De igual forma, se requiere de una expresión distinta para  $y_{2n+4}$ , en la cual se tomarán como soportes fijos los puntos  $2n+3$  y  $2n+1$ .

$$y_{2n+4} = \left( M_{2n+1}L_2 + 2M_{2n+3} \left( \frac{L_1}{2} + L_2 \right) + \frac{M_{2n+4}L_1}{2} + \frac{w \left( \frac{L_1}{2} \right)^2}{4} + \frac{w(L_2)^2}{4} \right) \frac{L_1}{6EI} \quad ec. 34$$

### Distancia entre correas de 600 y 1000 mm

Para este análisis se emplea el diagrama de la figura 2.7. A continuación, se presenta el teorema de los 3 momentos aplicado al primer tramo:

$$M_1L_1 + 2M_2(L_1 + L_2) + M_3L_2 + \frac{wL_1^3}{4} + \frac{wL_2^3}{4} = 6EI \left( \frac{Y_1}{L_1} + \frac{Y_2}{L_2} \right) \quad ec. 35$$

Donde  $M_1$  es igual a 0, al igual que  $y_1$   $y_2$ .  $L_1$  y  $L_2$  en este caso tienen el mismo valor  $L_2$ . De tal forma que la primera ecuación toma la siguiente forma:

$$4M_2L_2 + M_3L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 36$$

- **Tramo 2 hasta tramo n**

Para este tramo las deformaciones son nulas y por lo tanto solo quedarían los términos referentes a las cargas:

$$M_2L_2 + 4M_3L_2 + M_4L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 37$$

En el tramo 3 se tiene una expresión similar a la anterior, considerando los tres apoyos consecutivos siguientes:

$$M_3L_2 + 4M_4L_2 + M_5L_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 38$$

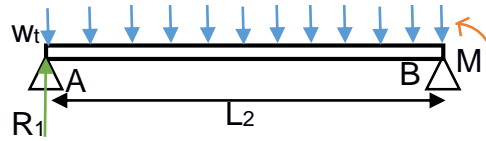
Como se puede ver sigue un patrón la matriz que se empieza a formar, de lo cual se puede deducir la forma que tendrá la ecuación para el último tramo:

$$M_{n-2}L_2 + 4M_{n-1}L_2 + M_nL_2 = -\frac{wL_2^3}{2} \quad ec. 39$$

Cabe recalcar que el momento  $M_n$  es igual a cero. Por lo tanto, la representación matricial de este problema es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 1 & 4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_2 \\ M_4 \\ M_5 \\ M_6 \\ \vdots \\ M_{n-3} \\ M_{n-2} \\ M_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ \vdots \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \\ -\frac{wL_2^3}{2} \end{bmatrix} \quad ec. 40$$

Ahora bien, aplicando estática se puede obtener el valor de las reacciones:



**Figura 2.15 Diagrama de cuerpo libre para hallar reacciones en tramo 1**

Fuente: Elaboración propia

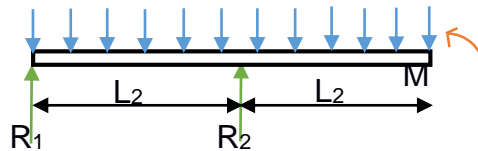
Asumiendo positivo el sentido horario:

$$\sum M_B = 0$$

$$R_1 L_2 - \frac{w L_2^2}{2} - M_2 = 0$$

$$R_1 = \frac{\frac{w L_2^2}{2} + M_2}{L_2} \quad \text{ec. 41}$$

Para el siguiente tramo:



**Figura 2.16 Diagrama de cuerpo libre para hallar reacciones en tramo 2**

Fuente: Elaboración propia

$$\sum M_c = 0$$

$$R_1 2L_2 + R_2 L_2 - \frac{w(2L_2)^2}{2} - M_3 = 0$$

$$R_2 = \frac{-R_1 2L_2 + \frac{w(2L_2)^2}{2} + M_3}{L_2} \quad \text{ec. 42}$$

Así, para el último tramo se tiene que  $R_{n-1}$  viene dada por la siguiente expresión:

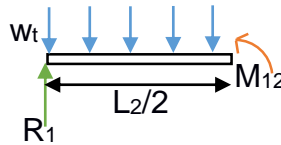
$$R_{n-1} = \frac{M_n - R_1(n-1)L_2 - R_2(n-2)L_2 - \dots - R_{n-2}L_2 + \frac{w(nL_2)^2}{2}}{L_2} \quad \text{ec. 43}$$

Finalmente,  $R_n$  por sumatoria de fuerzas sería simplemente:

$$R_n = 3w - (R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1}) \quad \text{ec. 44}$$

### Momento en las secciones intermedias

Después de haber obtenido los momentos y reacciones en los apoyos, es posible determinar el momento en las secciones intermedias y con ellos hallar las respectivas deflexiones empleando una vez más el teorema de los tres momentos.



**Figura 2.17 Diagrama de cuerpo libre para hallar momento en secciones intermedia en el tramo 1**

Fuente: Elaboración propia

$$\sum M = 0$$

$$-\frac{R_1 L_2}{2} + \frac{w \left(\frac{L_2}{2}\right)^2}{2} + M_{12} = 0$$

$$M_{12} = \frac{R_1 L_1}{2} - \frac{w \left(\frac{L_1}{2}\right)^2}{2} \quad \text{ec. 45}$$

Para el siguiente tramo, se añade la reacción  $R_2$  del siguiente apoyo:

$$\sum M = 0$$

$$-R_1 \left(L_2 + \frac{L_2}{2}\right) - \frac{R_2 L_2}{2} + \frac{w \left(L_2 + \frac{L_2}{2}\right)^2}{2} + M_{22} = 0$$

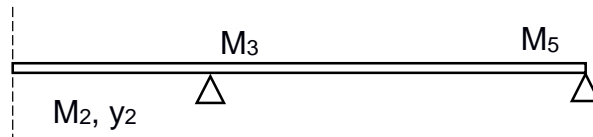
$$M_{22} = R_1 \left(L_2 + \frac{L_2}{2}\right) + \frac{R_2 L_2}{2} - \frac{w \left(\frac{L_1}{2}\right)^2}{2} \quad \text{ec. 46}$$

Así para el tramo  $n$  se puede deducir la siguiente expresión:

$$M_{n2} = R_1 \left(n - 1 + \frac{1}{2}\right) L_2 + R_2 \left(n - 2 + \frac{1}{2}\right) \left(\frac{L_2}{2}\right) + \dots + R_n \left(\frac{L_2}{2}\right) - \frac{w \left(\left(n - 1 + \frac{1}{2}\right) L_2\right)^2}{2} \quad \text{ec. 47}$$

Para hallar las deflexiones es necesario aplicar nuevamente la ecuación de los 3 momentos, sabiendo que se partirán ahora en  $2n-1$  tramos, donde  $n$  es el número de apoyos, específicamente se tendrán  $2n+1$  puntos por analizar, la deformación inicial  $y_1$  y la deformación  $y_{2n+1}$  son nulas por estar

ubicados en estos puntos los apoyos fijos, se debe hallar por lo tanto todas las demás deformaciones sabiendo que en puntos impares la deformación es igual a cero y que los valores de momento y deflexión par son los del punto medio de cada tramo, se realiza un cálculo demostrativo:



**Figura 2.18 Diagrama empleado para determinar la deflexión en el centro de la viga**

Fuente: Elaboración propia

$$M_2 \frac{L_2}{2} + 2M_3 \left( \frac{L_2}{2} + L_2 \right) + M_5 L_2 + w \frac{\left( \frac{L_2}{2} \right)^3}{4} + w \frac{L_2^3}{4} = 6EI \left( \frac{y_2}{\frac{L_2}{2}} \right) \quad ec. 48$$

$$y_2 = \frac{\frac{L_2}{2}}{6EI} \left( M_2 \frac{L_2}{2} + 2M_3 \left( \frac{L_2}{2} + L_2 \right) + M_5 L_2 + w \frac{\left( \frac{L_2}{2} \right)^3}{4} + w \frac{L_2^3}{4} \right) \quad ec. 49$$

Como se sabe,  $y_5$  es igual a cero. De manera generalizada:

$$y_n = \frac{\frac{L_2}{2}}{6EI} \left( M_n \frac{L_2}{2} + 2M_{n+1} \left( \frac{L_2}{2} + L_2 \right) + M_{n+3} L_2 + w \frac{\left( \frac{L_2}{2} \right)^3}{4} + w \frac{L_2^3}{4} \right) \quad ec. 50$$

Esta ecuación es válida solo hasta el punto  $2n-4$ , para hallar la última deflexión en el punto  $2n-2$  se escoge los puntos de los apoyos  $2n-3$  y  $2n-5$ , por lo que la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$y_{2n-2} = \frac{\frac{L_2}{2}}{6EI} \left( M_{n-2} \frac{L_2}{2} + 2M_{2n-3} \left( \frac{L_2}{2} + L_2 \right) + M_{2n-5} L_2 + w \frac{\left( \frac{L_2}{2} \right)^3}{4} + w \frac{L_2^3}{4} \right) \quad ec. 51$$

#### 2.6.4 Análisis de esfuerzos

El panel estará sometido a esfuerzos axiales de flexión debido a la presencia de momentos flectores que a su vez se producen por las fuerzas perpendiculares al área de trabajo. Los esfuerzos de flexión son también una función de la geometría por depender de  $c$  e  $I$ , donde  $c$  es la máxima distancia al eje neutro, e  $I$  es la inercia de la sección transversal del panel.

Gracias a la simetría del panel, se obtiene la siguiente ecuación para  $c$ , ya que el eje neutro es un eje que pasa por la mitad de la sección transversal:

$$c = \frac{H}{2} \quad ec. 30$$

Por lo tanto, el esfuerzo de flexión en el panel en el eje longitudinal estará dado por la siguiente y ya conocida expresión:

$$\sigma = \frac{Mc}{I_T} \quad ec. 31$$

Donde  $M$  es el momento flector de la sección a analizar e  $I_T$  es la inercia del panel seleccionado previamente. El factor de seguridad aproximado será:

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \quad ec. 32$$

Donde  $S_y$  es la resistencia a la fluencia del material que se ha tomado como el 50% del esfuerzo último en este caso, y  $\sigma$  el esfuerzo de flexión de la ecuación 23.

### 2.6.5 Factor de seguridad

Se requiere determinar el factor de seguridad mínimo que debe poseer el panel para asegurar que no fallará, una parte de esto ya está siendo considerada al escoger el esfuerzo de fluencia como el 50% del esfuerzo último por ser un material frágil, pero otra consideración del diseño es la falta de datos que se tiene de este nuevo material, por ello, se sugiere emplear la siguiente ecuación:

$$N = \text{MAX}(F1, F2, F3) \quad ec. 33$$

Donde  $F1$ ,  $F2$  y  $F3$  son los factores que se seleccionan con base en la siguiente información (Norton, 2014):

<b>Information</b>	<b>Quality of Information</b>	<b>Factor</b>
		<u>F1</u>
	The actual material used was tested	1.3
Material-property data available from tests	Representative material test data are available	2
	Fairly representative material test data are available	3
	Poorly representative material test data are available	5+
		<u>F2</u>
Environmental conditions in which it will be used	Are identical to material test conditions	1.3
	Essentially room-ambient environment	2
	Moderately challenging environment	3
	Extremely challenging environment	5+
		<u>F3</u>
Analytical models for loading and stress	Models have been tested against experiments	1.3
	Models accurately represent system	2
	Models approximately represent system	3
	Models are crude approximations	5+

**Figura 2.19 Factores de seguridad recomendados de acuerdo a la información del material**

Fuente: (Norton, 2014)

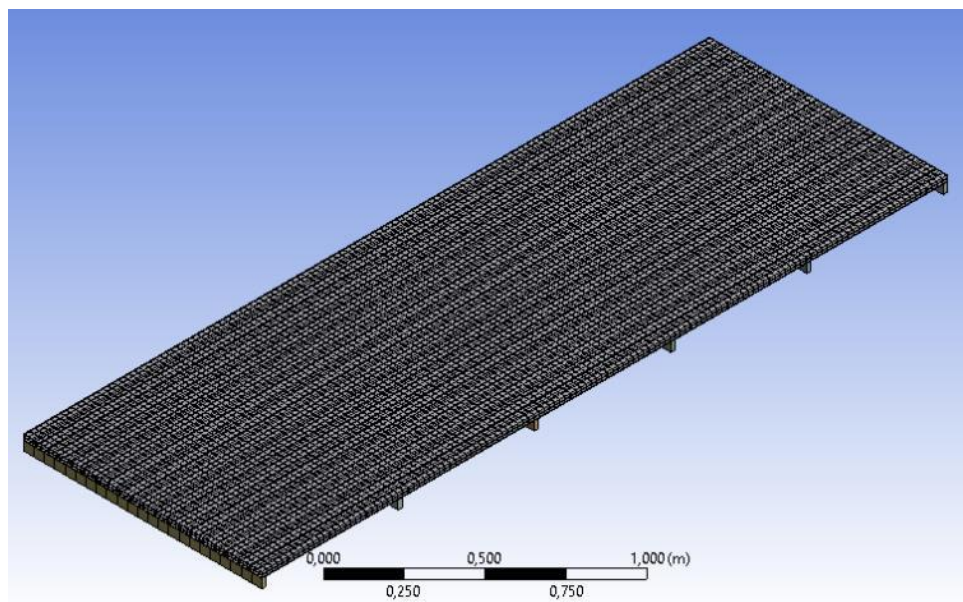
Como es un material que se está desarrollando, aún no se cuenta con todos los datos necesarios para el diseño mecánico, por ello el factor F1 será 3. Las condiciones ambientales en las que se utilizará, será moderadamente desafiante, considerando que el clima en Guayaquil y la costa suele ser cambiante, se escogerá un factor F2 de 3. Mientras que los modelos empleados para el método analítico representan de manera aproximada la situación real que soportará el panel en cuanto a cargas, el factor F3 escogido es de 5, mientras que para el análisis en ANSYS el valor sería de 2 por ser bastante preciso en cuanto a la representación del sistema. De tal forma, según la ecuación 31 y considerando el factor del esfuerzo de fluencia, el factor de seguridad mínimo para el método analítico y ANSYS son los siguientes:

$$N_{analítico} = 10$$

$$N_{ANSYS} = 4$$

### 2.6.6 Simulación

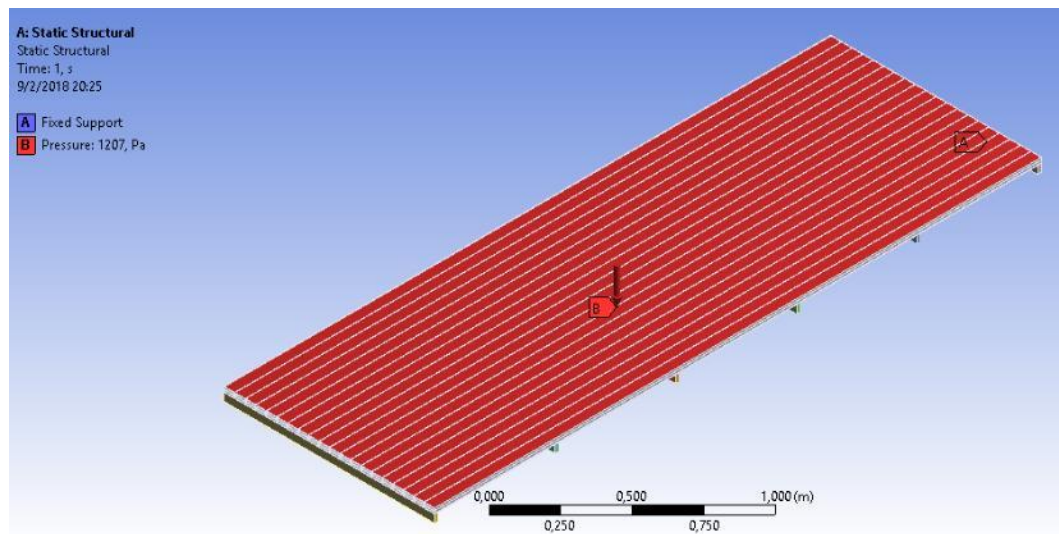
Una vez realizado el diseño en software CAD, se debía evaluar que éste no fallará debido a la carga estática, por ello se realizó la simulación en el módulo Static Structural de ANSYS Workbench. Para ello se importó el modelo 3D como archivo .STEP, mientras que paralelamente se ingresaba los datos del material óptimo (módulo de Young, Poisson, densidad, esfuerzo último y de fluencia) en la sección de Engineering Data. Luego se generó el mallado con tamaño de elemento de 0.023. Se ingresó las restricciones que serían los apoyos fijos en las correas y la carga distribuida como presión según la combinación más crítica de la NEC para este caso. A continuación se presenta un ejemplo de mallado y aplicación de cargas para la primera configuración, las demás se adjuntan en el apéndice G.



**Figura 2.20** Mallado del ensamble para distancia entre correas de 600 mm

Fuente: Elaboración propia





**Figura 2.21 Aplicación de carga y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

El análisis fue respecto al esfuerzo de Von Mises, la deformación total y el factor de seguridad estático. Los resultados obtenidos serán analizados en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados del proyecto, éstos se dividen en dos grandes grupos, los resultados orientados a la caracterización del material que incluyen ensayos no destructivos y destructivos, y el segundo grupo aquellos relacionados con el diseño del panel y el proceso de manufactura de este.

### 3.1 Caracterización del material

Aquí se presentan los resultados obtenidos en los seis ensayos realizados para la caracterización de la mezcla base 70rPET/30rHDPE con sus 4 configuraciones principales. Los ensayos realizados fueron: XRD (X-Ray Diffraction), SEM (Scanning Electron Microscopy), TGA (Thermogravimetric Analysis), DSC (Differential Scanning Calorimetry), MFI (Melt Flow Index) y Ensayo de Tracción, en función de los parámetros descritos en el capítulo 2. La tabla 3.1 muestra las proporciones bajo las cuales se elaboraron las distintas mezclas que comprenden tanto sistemas puros como nanocompuestos para el respectivo análisis de sus propiedades térmicas, mecánicas, de morfología y de cristalinidad.

**Tabla 3.1 Proporciones de las mezclas realizadas para su respectiva caracterización**

No. de mezcla	Sistema	Proporción
1	rPET/rHDPE	70/30
2	rPET/rHDPE/EGMA	70/30/5
3	rPET/rHDPE/C20A	70/30/3
4	rPET/rHDPE/C20A/EGMA	70/30/3/5
5	rPET/C20A	100/3
6	rPET/C20A/EGMA	100/3/5
7	rHDPE/C20A	100/3
8	rHDPE/C20A/EGMA	100/3/5
9	rPET	100
10	rHDPE	100

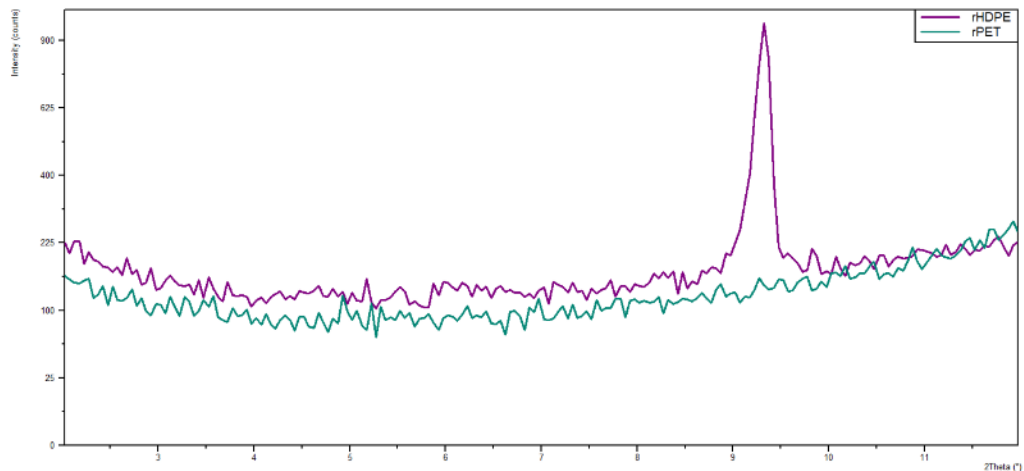
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1 Difractometría de Rayos X

Los nanocompuestos generalmente poseen un pequeño porcentaje de organoarcilla, típicamente menor a 10% en peso. (Vidotti, Chinellato, Boesel, & Pessan, 2004) Esto es debido a que la organoarcilla es abrasiva y a mayores porcentajes de adición se dificultaría el procesamiento de mezclado ya que puede causar daños en el husillo durante la extrusión y moldeado por inyección. Por esta razón, como se muestra en la tabla 3.1, se empleó un porcentaje de 3% de organoarcilla Cloisite 20A debido a las excelentes propiedades térmicas que presenta en esta proporción específica. Por lo tanto, para examinar la influencia de la organoarcilla en la estructura cristalina en la mezcla de rPET/rHDPE, los difractogramas de cada una de las materias primas empleadas fueron analizados.

En la figura 3.1 se pueden observar los patrones de difracción característicos del rPET y rHDPE, donde la posición de ensayo empieza desde los 2° hasta los 12°. Es necesario notar que el rPET no mostró picos de intensidad dentro de este rango de posición, tomando en cuenta que el PET puro sin procesarse muestra sus intensidades picos principalmente entre los 15° a 35°. (Mittal, 2012).

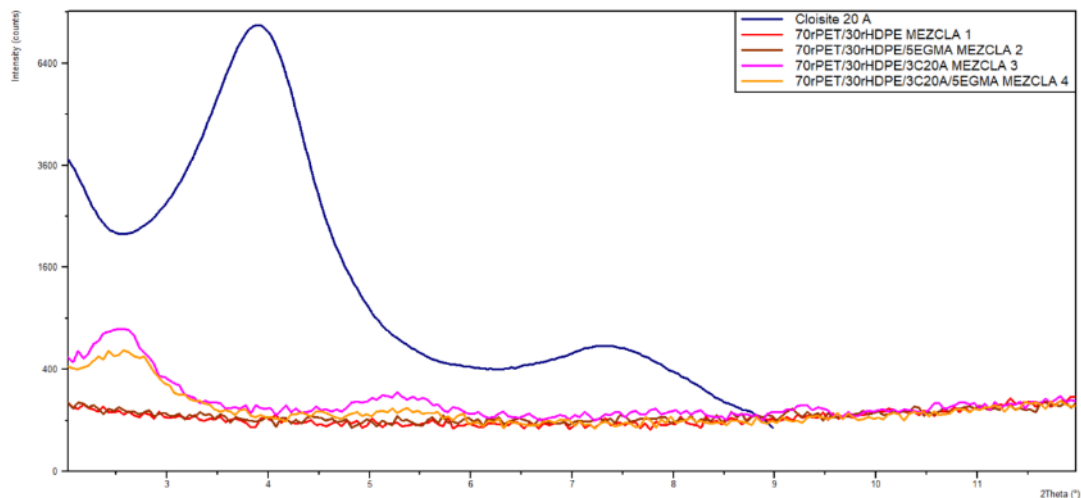
Al mismo tiempo, un pico de intensidad en la curva de rHDPE es observado para una posición de 9° con un espaciamiento basal de 9 (Å), esta difracción se debe a la cristalinidad del polietileno.



**Figura 3.1 Difractogramas de los materiales puros: PET reciclado (rPET) y HDPE reciclado (rHDPE)**

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.2 muestra los patrones XRD de los sistemas correspondientes a las mezclas 1, 2, 3 y 4 mencionadas en la tabla 3.1. Estos difractogramas permiten mostrar el grado de intercalación de la arcilla Cloisite 20A en cada una de las mezclas. El difractograma de la organoarcilla muestra un pico de intensidad representativo a los 4° con un espaciamiento basal de 23 Å. Con respecto a la mezcla 1, el pico de intensidad propio de la cristalinidad del rHDPE disminuyó significativamente debido a la baja compatibilidad con la matriz de rPET. Sin embargo, en la mezcla 2 se puede observar similar efecto de disminución de la cristalinidad del rHDPE debido a la presencia del compatibilizador.

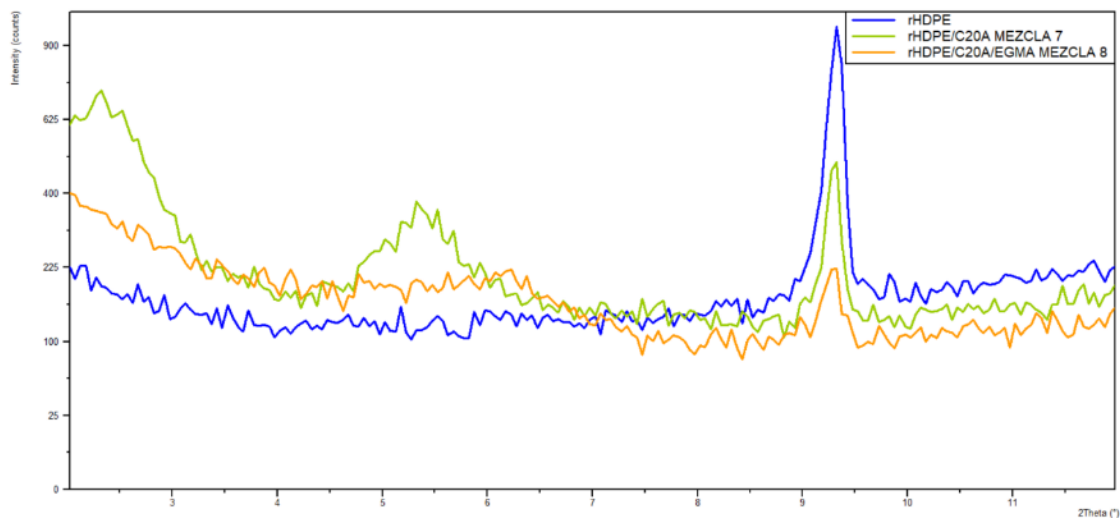


**Figura 3.2 Difractogramas de las mezclas 1, 2, 3 y 4 en referencia con el difractograma de la organoarcilla Cloisite 20A**

Fuente: Elaboración propia

No obstante, la mezcla 3 presenta un comportamiento distinto bajo la presencia de arcilla, observándose un pico de intensidad en la posición de  $3^\circ$  con un espaciamiento basal de  $35 \text{ \AA}$ . Así mismo, para la mezcla 4, el pico de intensidad se atenuó gracias al efecto del compatibilizador a una posición de  $3^\circ$  con un espaciamiento basal de  $32 \text{ \AA}$ . Ambos casos indican que no existió una completa exfoliación de la organoarcilla en las mezclas, pero sí su intercalación. Estos resultados nos hacen comprender que la intercalación de las cadenas de rPET y rHDPE aumenta el espaciamiento basal de la organoarcilla empleada, desplazando de esta manera el pico de intensidad hacia ángulos más bajos.

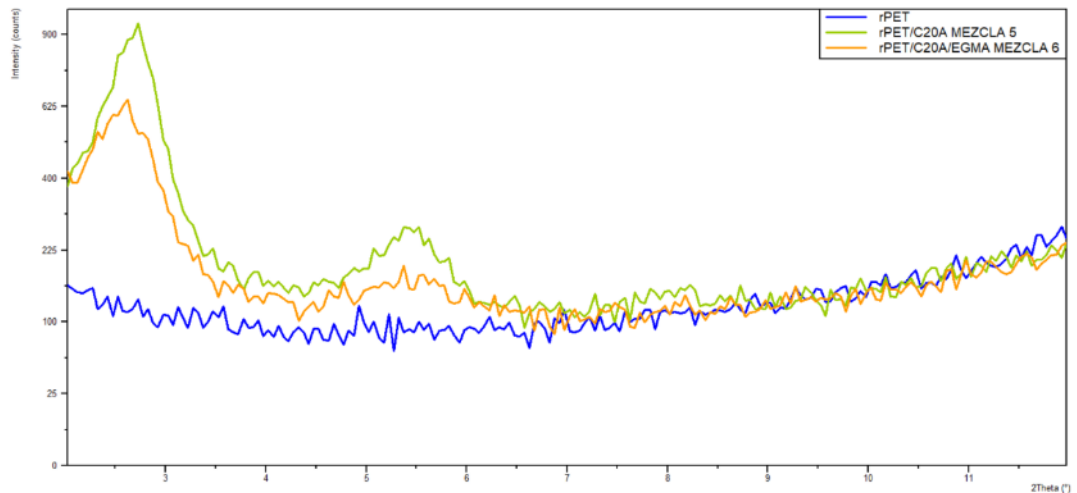
En la figura 3.3 se pueden observar tanto en el material puro como en los sistemas de las mezclas 7 y 8, los picos de intensidad representativos del rHDPE en la posición de  $9^\circ$ . Además, se observa la presencia de la arcilla en la mezcla 7 con un pico de intensidad a una posición de  $2^\circ$  con un espaciamiento basal de  $38 \text{ \AA}$ . En la mezcla 8, se observa el efecto del compatibilizador al atenuar el pico de intensidad de la arcilla.



**Figura 3.3 Difractogramas de las mezclas 7 y 8 en referencia con el difractograma del rHDPE**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.4 se observa la presencia de organoarcilla en la matriz de rPET cuyo pico de intensidad se manifiesta en la posición de  $3^\circ$  con un espaciamiento basal de  $33 \text{ \AA}$ . Simultáneamente, la presencia del compatibilizador atenuó los picos de intensidad, indicador de menor cantidad de arcillas con este espaciamiento basal, produciéndose un primer pico en la posición de  $3^\circ$  con un espaciamiento basal de  $34 \text{ \AA}$ . Estas últimas figuras nos indicarían que la organoarcilla debería tener una mejor compatibilidad con el rHDPE, aunque a su vez muestra una eficiente intercalación con el rPET. Lo indicado anteriormente, nos permite demostrar que la organoarcilla podría actuar como compatibilizador en la mezcla inmiscible de rPET/rHDPE.



**Figura 3.4 Difractogramas de las mezclas 5 y 6 en referencia con el difractograma del rPET**

Fuente: Elaboración propia

La difracción por rayos X fue una gran herramienta que nos ayudó a observar el grado de intercalación de la organoarcilla en la mezcla. Las mediciones de los picos mostrados en los difractogramas demuestran que la Cloisite 20A induce el incremento del espaciado interplanar y se intercala más en el rHDPE. Para verificar esta suposición, el espaciado interplanar en las nanoarcillas (Ley de Bragg) y la intercalación relativa (RI) del polímero en la organoarcilla fueron cuantificados empleando las siguientes ecuaciones:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{ec. 34}$$

$$RI = \frac{(d-d_0)}{d_0} * 100\% \quad \text{ec. 35}$$

**Tabla 3.2 Espaciamiento interplanar e intercalación relativa para los sistemas que contienen arcilla.**

Sistema	Posición del primer pico de intensidad (°)	Espaciamiento interplanar	Intercalación relativa (%)
Cloisite 20A	3.90	22.65	-
70rPET/30rHDPE/3C20A	2.56	34.55	52.51
70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA	2.72	32.51	43.52
100rPET/3C20A	2.70	32.75	44.57
100rPET/3C20A/5EGMA	2.58	34.28	51.33
100rHDPE/3C20A	2.33	37.92	67.40
100rHDPE/3C20A/5EGMA	6.01	14.69	-35.15

Fuente: Elaboración propia

Donde  $n$  es el número de longitud de onda ( $n = 1$ ),  $\lambda$  es la longitud de onda de rayos X,  $d$  es el espaciamiento basa (d-spacing) de la arcilla en el nanocompuesto,  $\theta$  es el ángulo máximo de difracción y  $d_o$  es el espaciamiento basal de la organoarcilla pura.

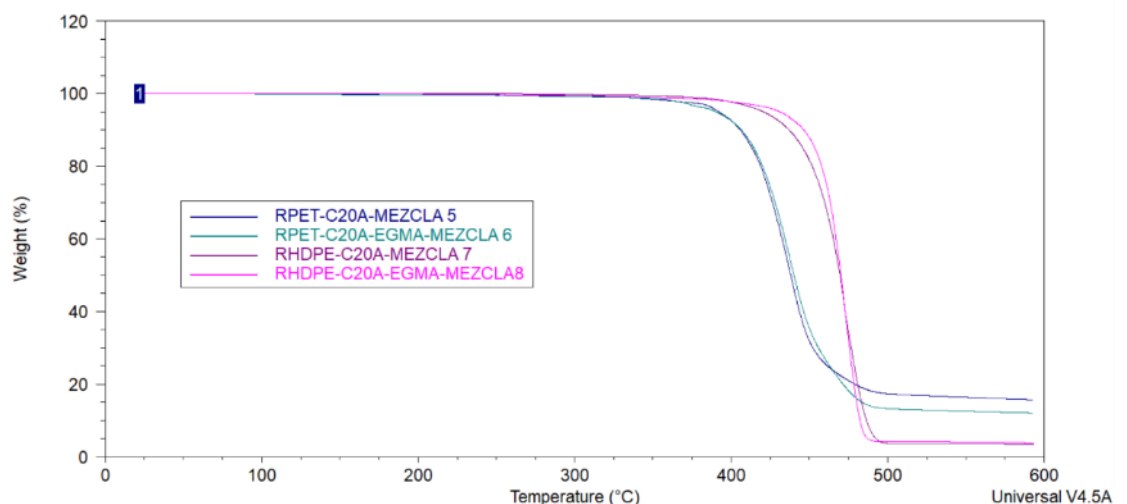
Los espaciamientos interplanares y el grado de intercalación de la arcilla en el nanocompuesto se resumen en la tabla 3.2. Como es de observarse, en la mezcla 8 correspondiente a 100rHDPE/3C20A/5EGMA, no se detecta claramente picos a menores ángulos, probablemente debido a una buena dispersión de la organoarcilla, ayudado por el EGMA. Además, el rHDPE posee el mayor porcentaje de intercalación, constatando de esta manera su afinidad con la Cloisite 20A, al existir una buena intercalación de la cadena de rHDPE entre las capas de la organoarcilla. (Faruk & Matuana, 2008). Por otra parte, con esta técnica no se aprecia claramente mejoras en el grado de intercalación con respecto a la adición de EGMA en la mezcla.



### 3.1.2 TGA

Para el análisis termogravimétrico, se analizó en primer lugar el comportamiento de los termogramas Peso (%) vs Temperatura de las configuraciones correspondientes a las mezclas 5,6, 7 y 8 para observar el efecto de la organoarcilla C20A en el nivel de descomposición de cada una de las materias primas empleadas para la mezcla base. En la figura 3.5 se puede conocer dicho efecto el cual demostró que la organoarcilla C20A además de conservar alta afinidad con el rHDPE, mostró una mayor estabilidad térmica. Al mismo tiempo, el EGMA tiene un mayor efecto en la dispersión de la organoarcilla C20A en el rHDPE que en el rPET.

Conforme al método especificado en el capítulo 2 con respecto a este análisis, de los termogramas mostrados en la figura 3.5 se pudo obtener información significativa, los cuales se muestran en la tabla 3.3 donde se detalla las temperaturas de degradación de cada mezcla al 5% y 50% de pérdida de masa ( $T_{d\ 5\%}$  y  $T_{d\ 50\%}$ ) y la temperatura en la máxima rapidez de descomposición ( $T_{rm}$ ) que se obtuvo a través del pico presentado en la curva de la primera derivada.



**Figura 3.5 Termogramas de Peso (%) vs Temperatura de los sistemas correspondientes a las mezclas 5,6,7 y 8**

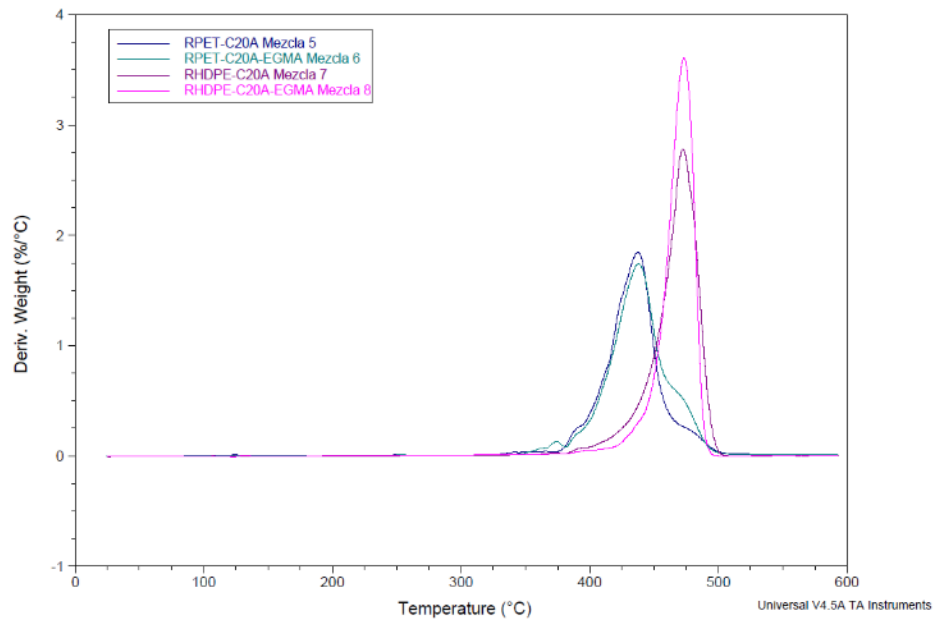
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.3 Especificación de picos y temperaturas de descomposición al 5% y 50% de pérdida de masa de las mezclas 5,6,7 y 8.**

<b>Muestras</b>	<b>T<sub>d 5%</sub>(°C)</b>	<b>T<sub>d 50%</sub>(°C)</b>	<b>T<sub>rm</sub>(°C)</b>
100rPET/3C20A	392.18	438.02	437.84
100rPET/3C20A/5EGMA	390.07	440.12	438.15
100rHDPE/3C20A	420.59	469.51	472.01
100rHDPE/3C20A/5EGMA	431.1	470.12	473.54

Fuente: Elaboración propia

Los picos que determinan la temperatura de degradación en la máxima rapidez de descomposición de cada una de las mezclas se presentan en la figura 3.6. Se puede observar que los termogramas correspondientes al rHDPE se desplazan ligeramente a la derecha, lo cual confirma la afinidad que existe con la organoarcilla C20A, mejorando de esta manera su estabilidad térmica. Además, en relación con la tabla 3.3 se observa que el EGMA no produce cambios significativos en el incremento temperatura de degradación al 50% de pérdida de masa, pero sí produce un cambio significativo al 5% en el rHDPE lo cual representa un retraso en la descomposición de componentes volátiles que permite un mejor procesamiento de este material a altas temperaturas.

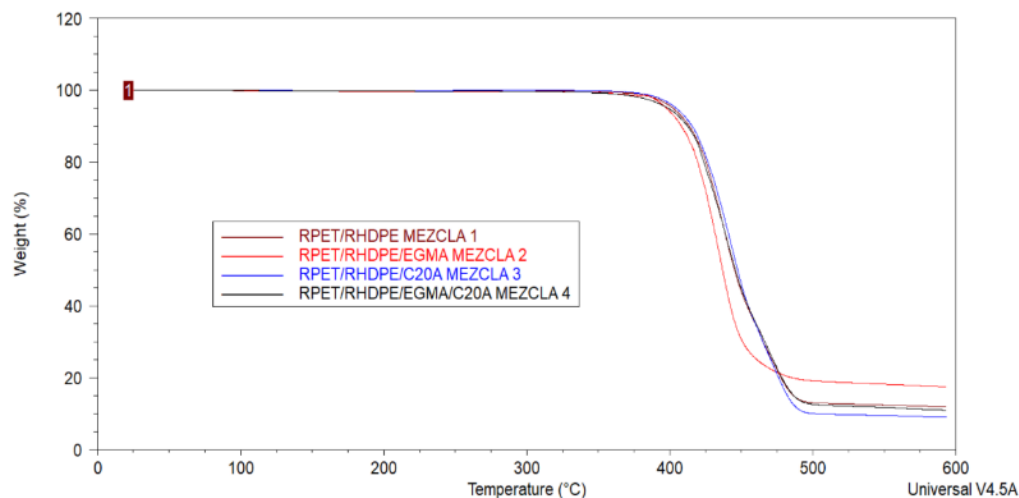


**Figura 3.6 Derivada de la descomposición térmica de las mezclas 5, 6, 7 y**

**8.**

Fuente: Elaboración propia

De forma análoga se presentan las curvas de descomposición térmicas para las mezclas principales en la figura 3.7. Se puede apreciar que la curva que contiene únicamente compatibilizador, no se degradó por completo a diferencia de aquellas que contienen organoarcilla. A los 600°C se pueden observar los rastros de organoarcilla existentes en las mezclas 3 y 4 que no pudieron degradarse a totalidad. Como se indicó anteriormente no se observa una mejora en la estabilidad térmica con la matriz de rPET con o sin EGMA, por tal motivo se mantiene esta misma tendencia en las mezclas rPET/rHDPE.



**Figura 3.7 Curvas de Peso (%) vs Temperatura de las cuatro configuraciones principales.**

Fuente: Elaboración propia

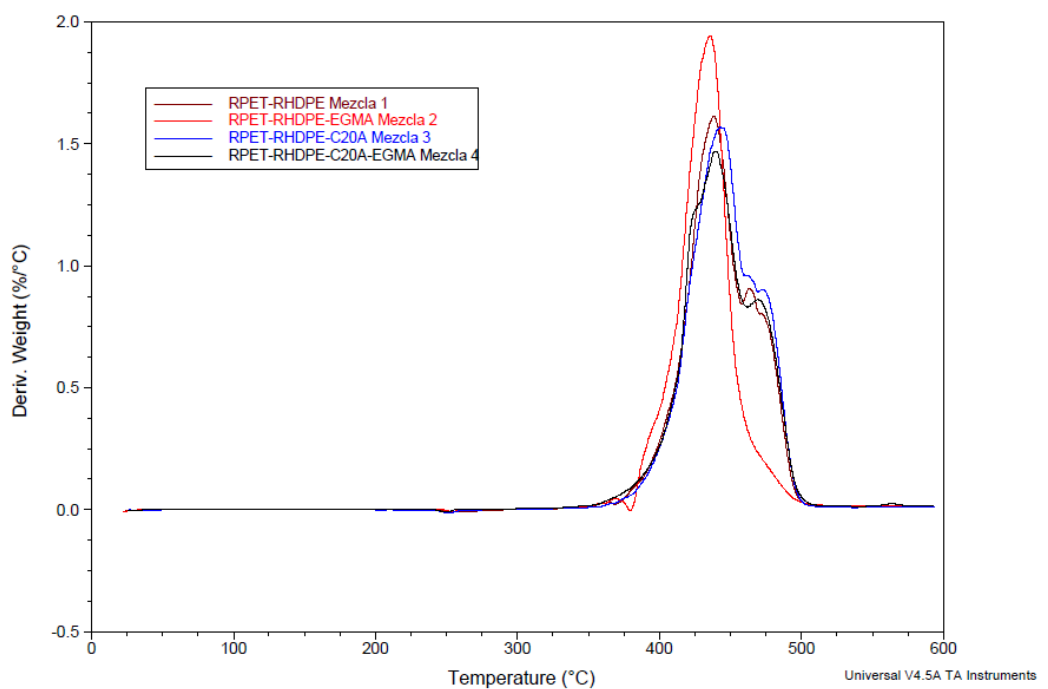
La tabla 3.4 muestra las correspondientes temperaturas de degradación para cada una de las mezclas principales al 5% y 50% de pérdida de masa y las temperaturas de los picos presentados en su máxima rapidez de descomposición. Los residuos son percibidos en las curvas los cuales presentaron un contenido de aproximadamente 15% una vez llegado a los 600°C. Se observa que el incremento de las temperaturas para los tres estados de descomposición no fue significativo, confirmando de esta manera lo descrito anteriormente respecto al análisis de los termogramas de la figura 3.7.

**Tabla 3.4 Especificación de picos y temperaturas de descomposición al 5% y 50% de pérdida de masa de las 4 mezclas principales.**

Muestras	$T_{d\ 5\%}$ (°C)	$T_{d\ 50\%}$ (°C)	$T_{rm}$ (°C)
70rPET/30rHDPE	402.36	445.24	437.36
70rPET/30rHDPE/5EGMA	397.73	436.94	436.34
70rPET/30rHDPE/3C20A	404.53	447.44	443.47
70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA	398.93	445.89	439.4

Fuente: Elaboración propia

Consideremos ahora los termogramas presentados en la figura 3.8. Nótese que la curva de la mezcla que posee todos los componentes, es decir, tanto la organoarcilla como el compatibilizador, se desplazó ligeramente a la derecha. Esta curva presenta uno de los picos más pequeños entre los 350°C y 520°C, demostrándose de esta manera mejora en la dispersión del material a parte de la afinidad existente con la organoarcilla al emplearse el rHDPE como material de refuerzo en dicha mezcla.



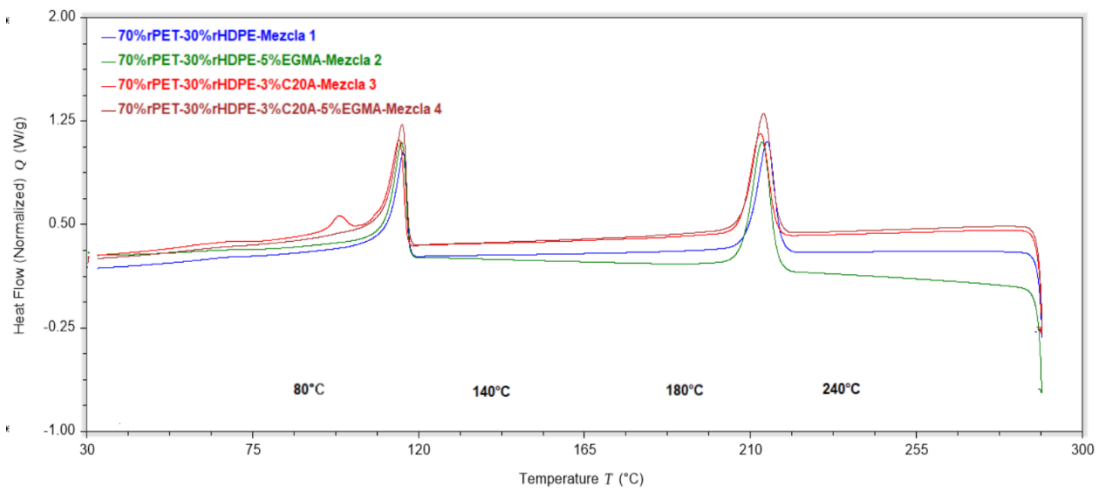
**Figura 3.8 Derivada de la descomposición térmica de las mezclas principales**

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.3 DSC

El comportamiento de transición de fase de los componentes de las distintas mezclas realizadas fue analizado por medio de un calorímetro diferencial de barrido Q2000 de TA Instruments. Como fue indicado en el capítulo 2, las muestras fueron sometidas a una primera fase de calentamiento hasta los 300°C, luego a una fase de enfriamiento hasta los 30°C y finalmente a una segunda fase de calentamiento hasta los 300°C bajo una atmósfera de nitrógeno líquido a una rapidez de 10°C/min. Este

proceso permitió obtener las temperaturas de fusión ( $T_m$ ), las temperaturas de cristalización ( $T_c$ ) y el grado de cristalinidad ( $\%X_c$ ) de los componentes de cada una de las mezclas. Estos resultados se muestran en las tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7.



**Figura 3.9 Curvas DSC en la fase de enfriamiento de las cuatro mezclas principales**

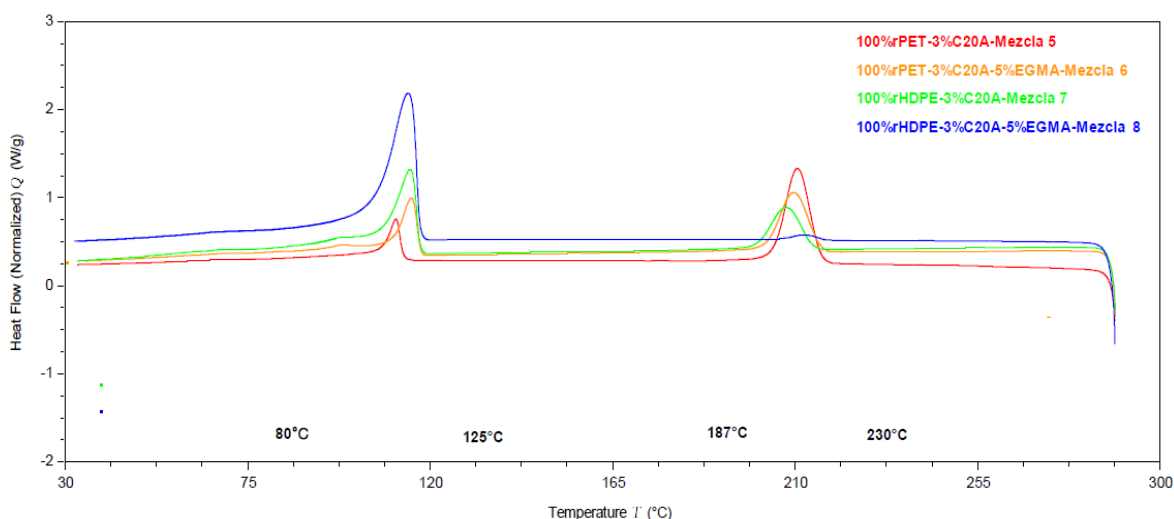
Fuente: Elaboración propia

El termograma que se muestra en la figura 3.9 durante la fase de enfriamiento muestra los picos de cristalización característicos de ambos componentes poliméricos en las mezclas con la matriz de rPET. Por lo general, aquellas mezclas que poseen matriz de rHDPE, el pico de cristalización del rPET es difícilmente detectada. (Pracella, Rolla, Chionna, & Galeski, 2002). Se puede apreciar que la inclusión de compatibilizador en las mezclas de rPET/rHDPE disminuye la temperatura de cristalización del rPET, pero no se ve un cambio significativo en el rHDPE. Sin embargo, la tabla 3.5 demuestra que la adición de arcilla C20A en la matriz de rPET aumenta esta temperatura. Por otra parte, el área debajo de los picos de cristalización exotérmicos aumenta significativamente en el rHDPE gracias a la presencia de arcilla. El aumento de la  $T_c$  en referencia de la temperatura de cristalización del rPET puro ( $T_c \cong 204^\circ\text{C}$ ) se atribuye al efecto nucleante de las partículas de arcilla detectadas. (Jahangiri, Hassan Jafari, Ali Khonakdar, Tarameshlou, & Fotovat Ahmadi, 2015).

**Tabla 3.5 Temperaturas y entalpías de cristalización ( $T_c$  y  $\Delta H_c$ ) de los componentes de las mezclas principales.**

Muestras	rPET		rHDPE	
	$T_c$	$\Delta H_c$	$T_c$	$\Delta H_c$
70rPET/30rHDPE	249.76	32.24	127.57	26.62
70rPET/30rHDPE/5EGMA	247.80	52.14	127.43	24.95
70rPET/30rHDPE/3C20A	250.35	31.12	127.45	34.89
70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA	248.50	36.56	127.38	33.79

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.10 Curvas DSC en la fase de enfriamiento de las 4 mezclas complementarias**

Fuente: Elaboración propia

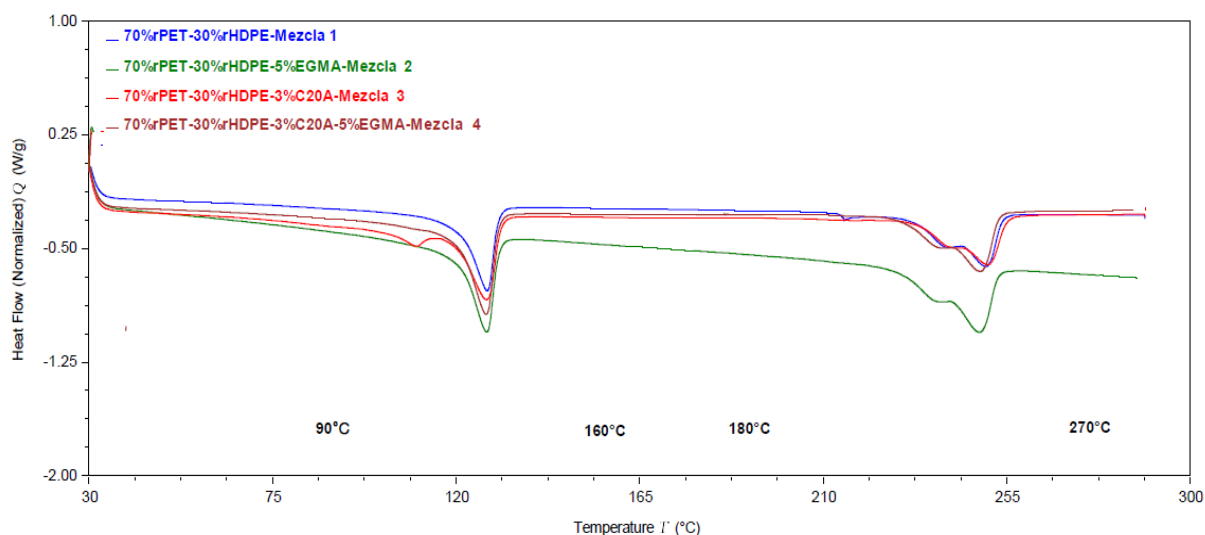
En la figura 3.10 se pueden observar los picos de cristalinidad característicos del rHDPE que empiezan desde los 80°C terminando hasta los 125°C y del rPET desde los 187°C hasta los 230°C. La presencia de pequeños picos de cristalización de rHDPE en las mezclas 5 y 6 correspondientes a 100% de rPET es debido a residuos generados durante el proceso de peletizado de las mezclas extruidas. De la misma forma, sucede con la mezcla 7. Por otra parte, a través de la tabla 3.6 se puede observar que la arcilla C20A aumenta la  $T_c$  del rPET gracias a su efecto

nucleante. La  $T_c$  del rHDPE se incrementa gracias a la adición de compatibilizador.

**Tabla 3.6 Temperaturas y entalpías de cristalización ( $T_c$  y  $\Delta H_c$ ) de los componentes de las mezclas complementarias.**

Muestras	rPET		rHDPE	
	$T_c$	$\Delta H_c$	$T_c$	$\Delta H_c$
100rPET/3C20A	210.87	50.95	111.67	13.24
100rPET/3C20A/5EGMA	209.38	34.62	115.38	28.64
100rHDPE/3C20A	207.63	25.88	115.06	42.39
100rHDPE/3C20A/5EGMA	211.91	2.93	127.38	33.79

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.11 Curvas DSC en la fase de calentamiento de las cuatro mezclas principales**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.11 se puede observar los termogramas de fusión durante la segunda fase de calentamiento con los picos propios de los componentes en las mezclas de rPET/rHDPE. La temperatura de fusión para el rHDPE es de 127°C y para el rPET es de 250°C aproximadamente acorde a la tabla 3.6. La adición de compatibilizador en las mezclas disminuye la temperatura de fusión, a pesar de no observarse cambios significativos para ambos componentes. Sin embargo, el compatibilizador aumenta la

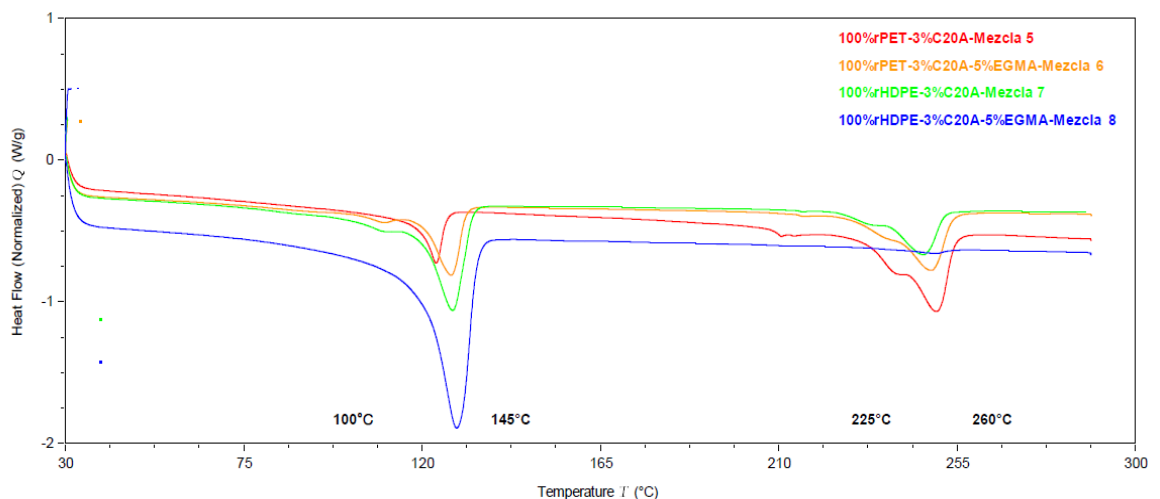


cristalinidad del rPET, mientras que la arcilla incrementa la cristalinidad del rHDPE.

**Tabla 3.7 Temperaturas de fusión ( $T_m$ ), entalpías de fusión ( $\Delta H_m$ ) y porcentaje de cristalinidad ( $\%X_c$ ) de los componentes de las mezclas principales.**

Muestras	rPET			rHDPE		
	$T_m$	$\Delta H_m$	$\%X_c$	$T_m$	$\Delta H_m$	$\%X_c$
70rPET/30rHDPE	249.76	32.24	26.91	127.57	26.62	9.09
70rPET/30rHDPE/5EGMA	247.80	52.14	43.52	127.43	24.95	8.52
70rPET/30rHDPE/3C20A	250.35	31.12	25.97	127.45	34.89	11.91
70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA	248.50	36.56	30.52	127.38	33.79	11.53

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.12 Curvas DSC en la segunda fase de calentamiento de las cuatro mezclas complementarias**

Fuente: Elaboración propia

La figura 3.12 muestra los picos endotérmicos correspondientes a las temperaturas de fusión del rPET y rHDPE para las mezclas desde la 5 hasta la 8. Como se había mencionado en la descripción de la figura 3.10, los leves picos del rHDPE para las mezclas con 100% rPET se debe a residuos generados durante el proceso de peletizado para la obtención de la muestra. Acorde a la tabla 3.8, para un 5% de compatibilizador, la  $T_m$  aumenta en la matriz de rHDPE y el  $\%X_c$  también aumenta

significativamente. Esto no sucede con el rPET. En cambio, surge un mayor efecto en el incremento de la  $T_m$  y  $\%X_c$  con la inclusión de arcilla.

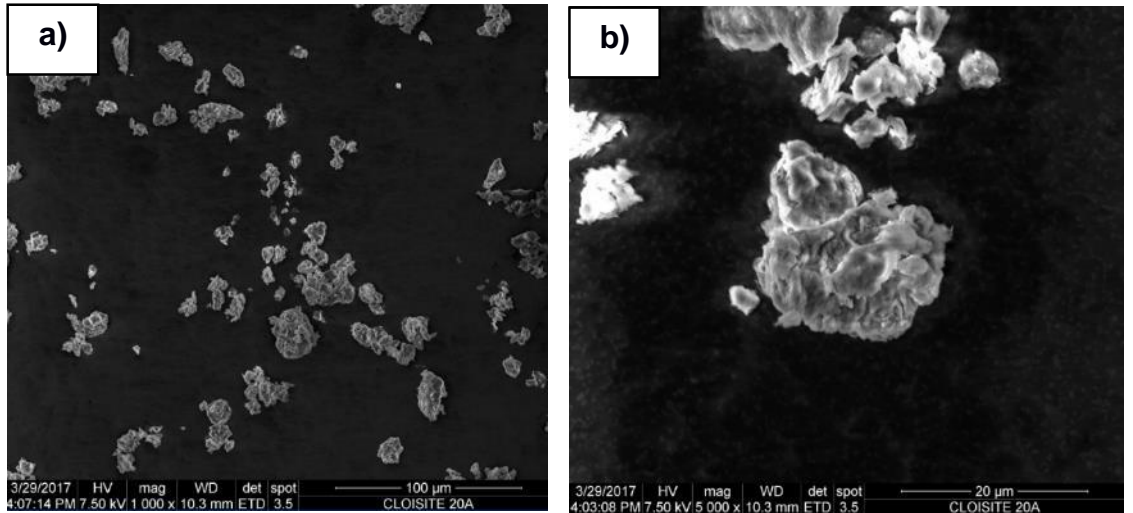
**Tabla 3.8 Temperaturas de fusión ( $T_m$ ), entalpías de fusión ( $\Delta H_m$ ) y porcentaje de cristalinidad ( $\%X_c$ ) de los componentes de las mezclas complementarias.**

Muestras	rPET			rHDPE		
	$T_m$	$\Delta H_m$	$\%X_c$	$T_m$	$\Delta H_m$	$\%X_c$
100rPET/3C20A	249.80	41.99	35.05	123.55	16.59	5.66
100rPET/3C20A/5EGMA	248.23	37.09	30.96	127.29	31.70	10.82
100rHDPE/3C20A	246.41	22.89	19.11	127.73	48.07	16.41
100rHDPE/3C20A/5EGMA	-	-	-	128.70	102.51	34.99

Fuente: Elaboración propia

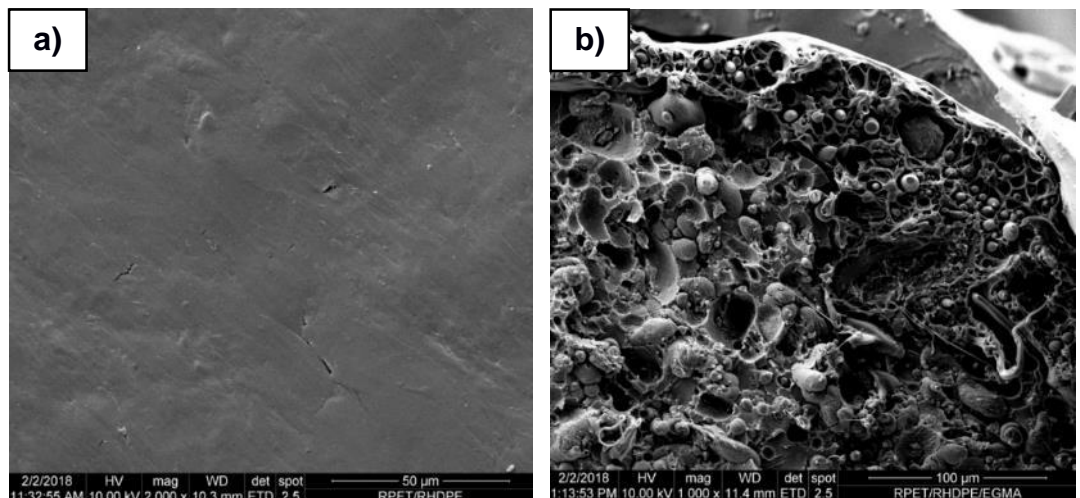
### 3.1.4 SEM

Para empezar, se tomó como referencia la micrografía de la organoarcilla Cloisite 20A para conocer su estructura y poder identificarla en las micrografías siguientes. En mezclas inmiscibles como las de rPET/rHDPE es muy importante la dispersión de la organoarcilla entre las fases el cual depende de la afinidad entre ambos componentes y su grado de adhesión por lo que el efecto del compatibilizador también debe tomarse en cuenta. En la figura 3.14 a) se puede observar la buena dispersión que hubo del rHDPE en la matriz de rPET. Por otro lado, en la imagen b) la presencia del compatibilizador hace que exista una mejor adhesión del rHDPE con el rPET. Sin embargo, se pueden observar porosidades debido a la presencia de partículas de humedad. Esto puede atribuirse a distintos factores cinéticos tales como método de adición del rHDPE en la matriz, secuencia de adición y mezclado de los componentes, tiempo de extrusión y velocidad de mezclado. (Iniciarte & Oliva, 2014)



**Figura 3.13 Microscopía SEM de la organoarcilla Cloisite 20 A a) a una magnificación de 1000X y b) a una magnificación de 5000X**

Fuente: Julio Cáceres

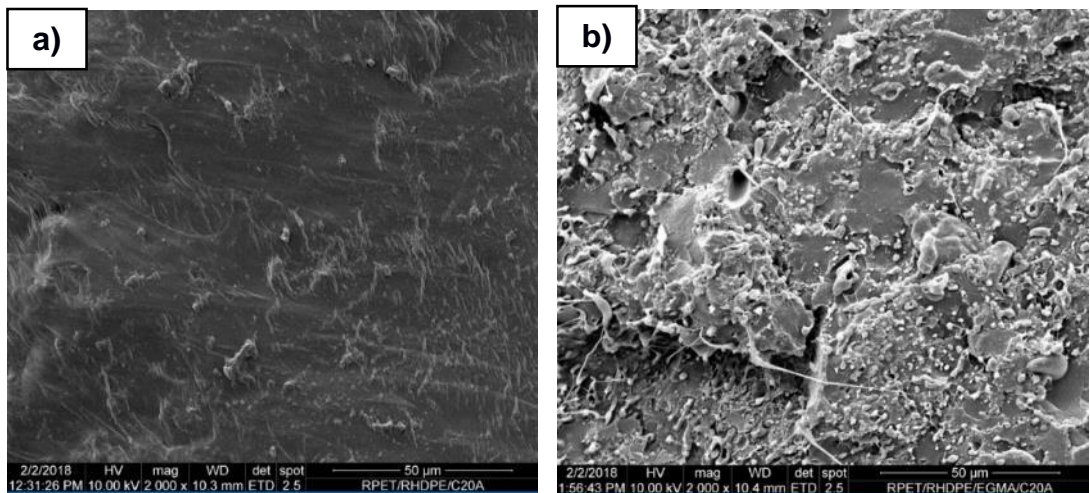


**Figura 3.14 Micrografía SEM de a) Mezcla 1 70rPET/30rHDPE b) Mezcla 2 70rPET/30rHDPE/5EGMA**

Fuente: Elaboración propia

Es evidente que la organoarcilla se encuentra intercalado acorde con la imagen a de la figura 3.15 debido a aquellas “vellosidades” que se presentan en la matriz de rPET. La dispersión del rHDPE en rPET no presenta discontinuidades para esta zona a diferencia de la imagen b en el cual se notan dichas discontinuidades, muy probablemente por presencia

de partículas de humedad durante el procesamiento de extrusión de la mezcla. Sin embargo, la organoarcilla para este caso se encuentra dispersa gracias al efecto del compatibilizador.



**Figura 3.15** Micrografía SEM a una magnificación de 2000X de a) Mezcla 3 70rPET/30rHDPE/3C20A y d) Mezcla 4 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A  
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.5 Ensayo de Tracción

Para el ensayo de tracción se tuvo 4 grupos generales de mezclas, tal como se muestra en la tabla 3.9, sin embargo, se realizó en el proceso de inyección una modificación en el back-pressure para las mezclas que contenían organoarcilla especialmente y se desea saber su influencia en las propiedades mecánicas, esto implica que existan 3 subgrupos; todas las probetas fueron ensayadas bajo las condiciones especificadas en el capítulo 2. En esta prueba se obtuvo los siguientes resultados:

**Tabla 3.9 Propiedades mecánicas promedio de todas las mezclas de rPET y rHDPE**

<b>Grupo</b>	<b>Deformación (%)</b>	<b>Esfuerzo Máximo (MPa)</b>	<b>Módulo Elástico (MPa)</b>
1 BP: 50 (n=4)	2.69±0.08	19.5±0.4	856.4±14.4
1 BP: 90 (n=4)	2.55±0.09	17.7±0.1	786.71±25.10
2 BP: 50 (n=4)	2.33±0.07	21.8±1.2	1067.8±55.8
3 BP: 50 (n=6)	1.52±0.06	16.4±0.4	1126.3±24.7
3 BP: 90 (n=2)	1.26±0.11	13.7±0.4	1096.8±49.2
4 BP: 50 (n=6)	2.49±0.39	17.6±0.6	815.6±86.3
4 BP :90 (n=4)	2.11±0.13	18.5±0.7	969.0±29.7

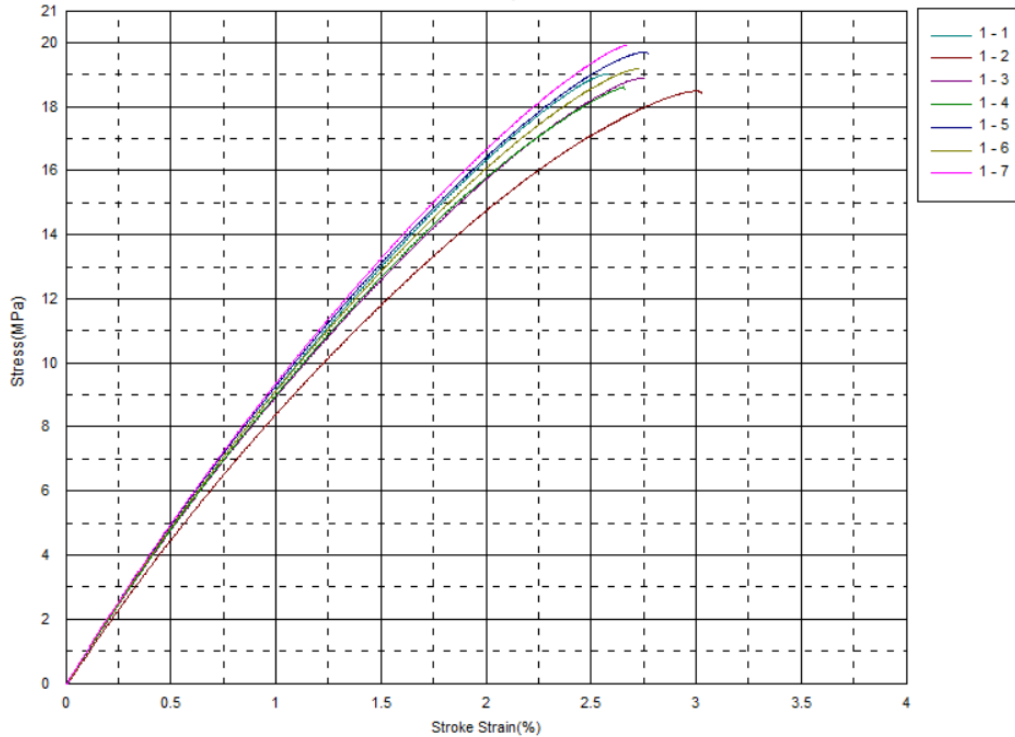
Fuente: Elaboración propia

Donde n es el número de datos seleccionados y BP: 90 significa que la mezcla fue inyectada con un back-pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup> y BP: 50 indica que la mezcla fue inyectada con un back-pressure de 50 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Mezcla 1**

Como se mostró en la tabla 3.1 la mezcla 1 corresponde al sistema puro rPET/rHDPE. En la figura 3.16 se puede ver que las curvas lucen bastante uniformes, ya que todas mantienen la misma forma con un ligero desfase que empieza al 0.02% aproximadamente de la deformación, esta uniformidad en las siete gráficas implica un proceso homogéneo, no que la mezcla haya sido homogénea como tal, ya que, en la fractura de éstas, se pudo observar pequeñas discontinuidades internas, debidas probablemente a burbujas de aire. Se puede ver también que el esfuerzo último es aproximadamente 19 MPa con una deformación de 2.5% en

promedio. Además, en la curva, no se visualiza un límite elástico, es decir, no hay una transición perceptible a la fluencia.

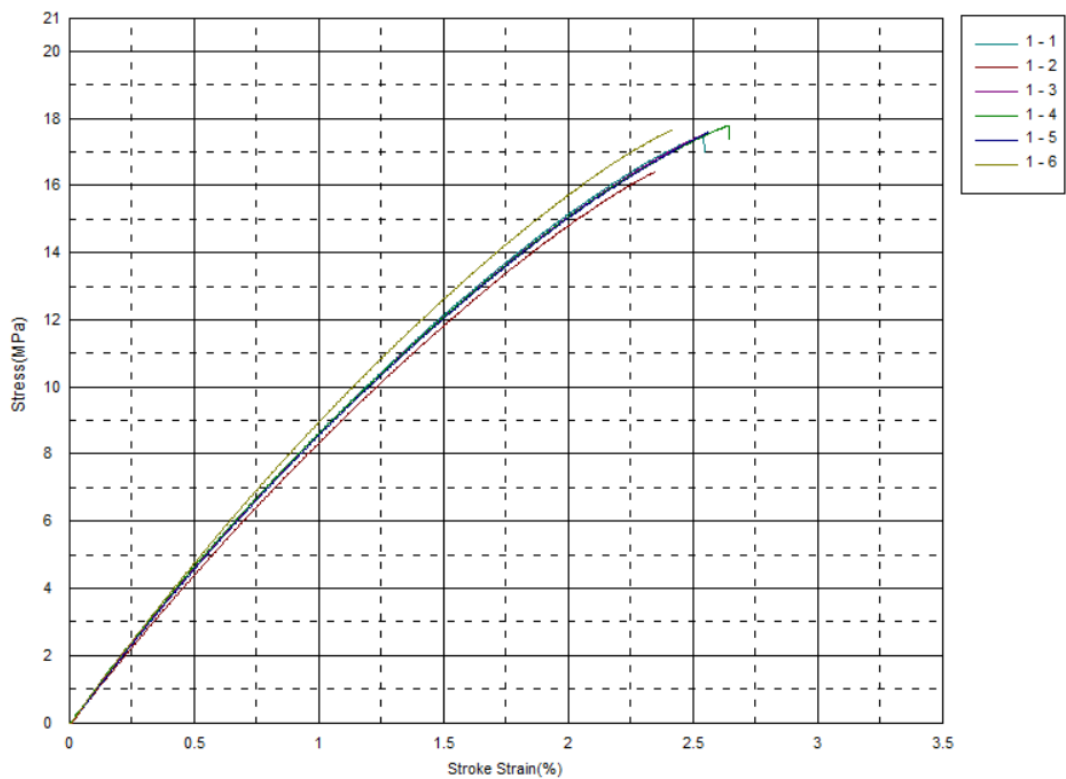


**Figura 3.16 Curva Esfuerzo-Deformación para mezcla 70rPET/30rHDPE**

En la tabla 3.9 se presentan los resultados promedios del ensayo de tracción para cada probeta, para el caso de la mezcla 1 con back-pressure, de 90, de las 7 probetas se utilizó 4 para el análisis estadístico, con el objetivo de disminuir la desviación estándar y tener resultados más precisos. Se puede observar entonces que la carga de rotura y carga máxima que soporta el material es prácticamente la misma, teniendo un valor promedio de 0.78 kN y una baja desviación estándar. Por otro lado, la deformación tal como se pudo visualizar rápidamente en la curva, tiene un valor promedio de 2.69% y el módulo elástico es de 0.856 Gpa. Por último, para el esfuerzo máximo se obtuvo un valor 19.5 Mpa.

Para esta mezcla se realizó un cambio en el proceso de inyección, ejerciendo un back-pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup> en la zona de succión. A continuación, se presentan los resultados de las 6 probetas ensayadas.

Como se ve en la figura 3.17, las curvas presentan una uniformidad un poco mayor que las probetas de la mezcla con BP 50, lo que sugiere que el aumentar la presión mejora el proceso de mezclado, la diferencia radica en la carga máxima que soportan, la cual está alrededor de 17 MPa con una deformación aproximadamente igual de 2.5%.

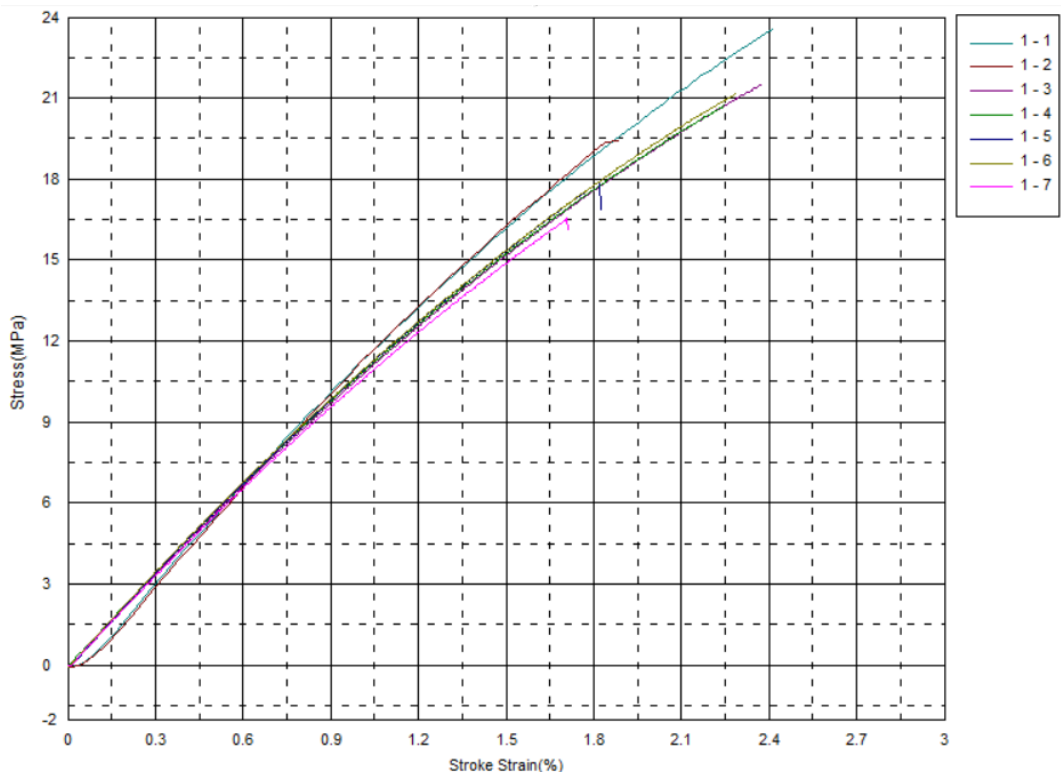


**Figura 3.17 Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE con Back-pressure 90 kg/cm<sup>2</sup>**

Según la tabla 3.9 la carga máxima y de rotura, en promedio 0.7 kN son relativamente más pequeñas que las de la mezcla con BP 50, al igual que la deformación, lo que implica que el material es mucho más frágil aún, el módulo elástico es aproximadamente 0.78 GPa, por ende, mucho menos rígido y resistente que el anterior.

## Mezcla 2

La mezcla 2 corresponde a 70rPET/30rHDPE/5EGMA. Como se observa en la figura 3.18 la deformación es de 2.25% aproximadamente con un esfuerzo máximo alrededor de 21 MPa, en estas curvas se aprecia que el proceso fue un poco menos homogéneo que en la mezcla anterior, debido a que no todas las curvas conservan la misma forma con pequeños desfases. El material sigue siendo frágil, ya que no se aprecia el límite elástico. Esta curva tiene aparentemente un área bajo la curva relativamente menor que la mezcla 1, lo cual se traduciría como menor tenacidad.



**Figura 3.18 Curva esfuerzo deformación de mezcla  
70RPET/30HDPE/5EGMA**

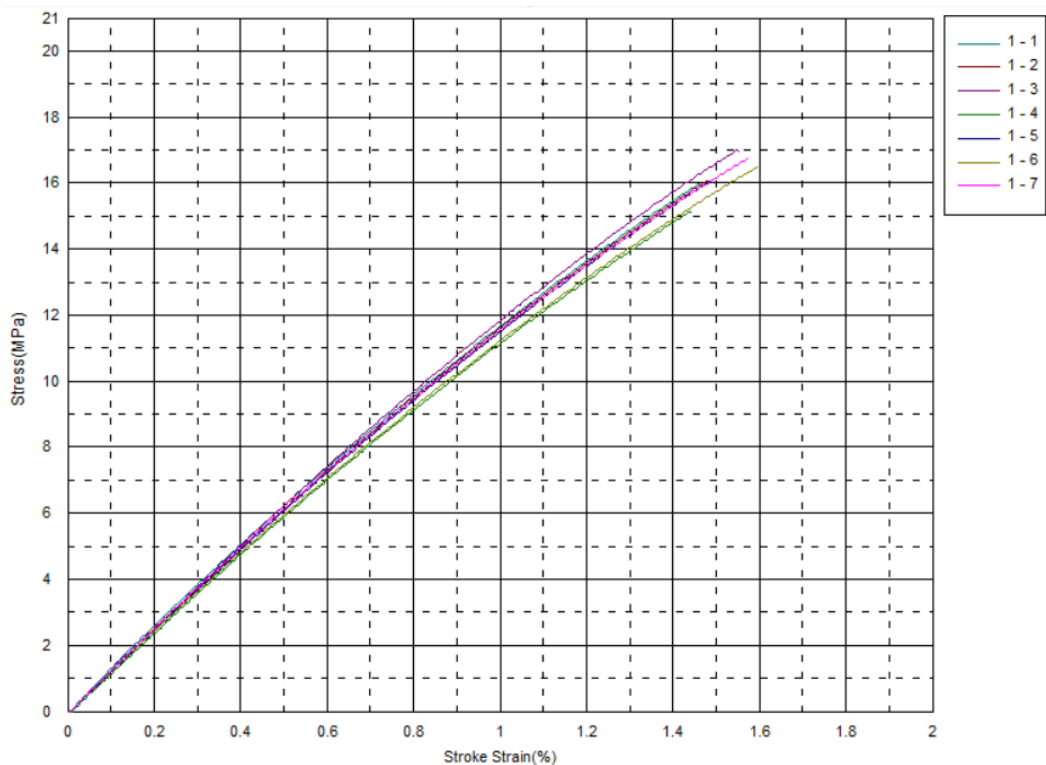
En la tabla 3.9 se puede ver que esta mezcla soporta un esfuerzo máximo de 21.8 MPa lo que permite intuir que es más resistente. Sin embargo, la



deformación es de 2.10%, i.e., es una mezcla menos dúctil, pero se compensa al tener un módulo elástico de 1.07 Gpa bastante superior a la mezcla 1 y su variante, lo que le vuelve un material rígido, ideal para la aplicación planteada en este proyecto.

### Mezcla 3

La mezcla 3 corresponde a la composición 70rPET/30rHDPE/3C20A. A continuación, se presenta la curva esfuerzo deformación de 7 probetas de esta mezcla. Según la figura 3.19 el esfuerzo máximo es aproximadamente 17 MPa con una deformación de 1.6%, el área bajo la curva es mucho menor a las 2 mezclas anteriores. Al igual que en la primera mezcla, las curvas son bastante uniformes, por lo tanto, el proceso fue bastante homogéneo.

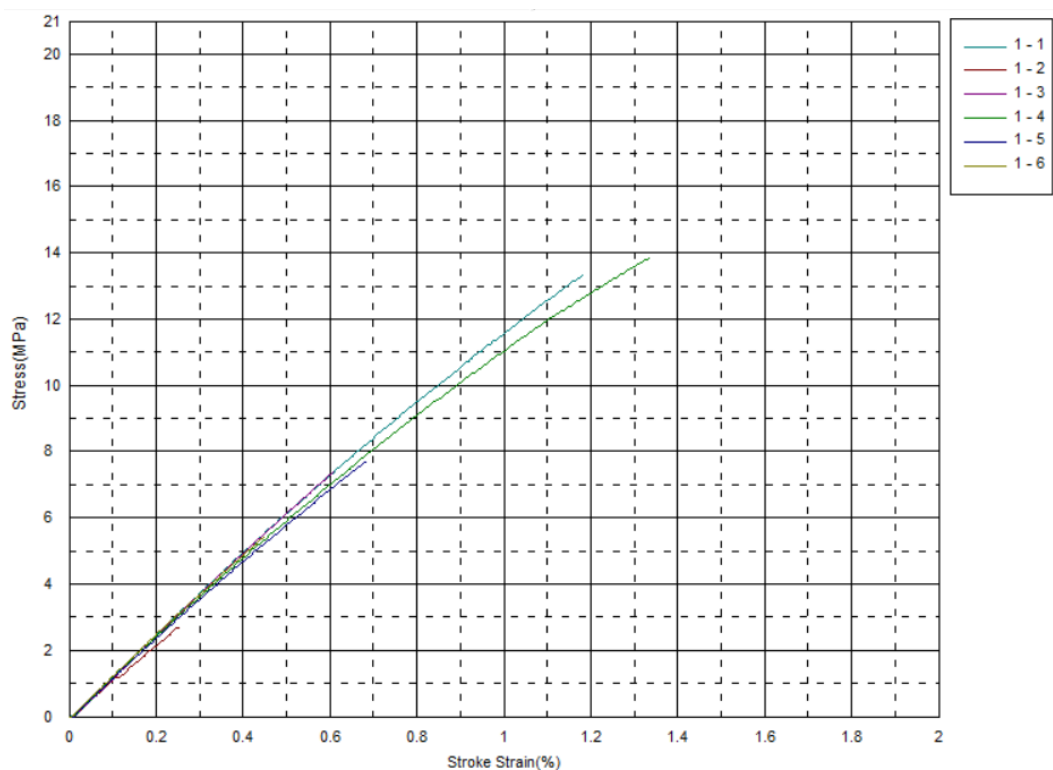


**Figura 3.19 Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/3C20A**

Según la tabla 3.9, el esfuerzo máximo 16.4 MPa mucho menor que las mezclas analizadas hasta ahora, al igual que la deformación de 1.52%. No obstante, el módulo elástico es superior al de la mezcla 2 con un valor de

1.12 GPa, lo que le convierte en un material rígido, pero poco resistente debido a la baja carga máxima y deformación.

Para esta mezcla se analizó también con un back-pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup> que en teoría mejoraría el proceso de mezclado con la arcilla. Como se puede observar en la figura 3.20, el máximo esfuerzo que soporta el material es de aproximadamente 13 MPa y una deformación alrededor de 1.2%.

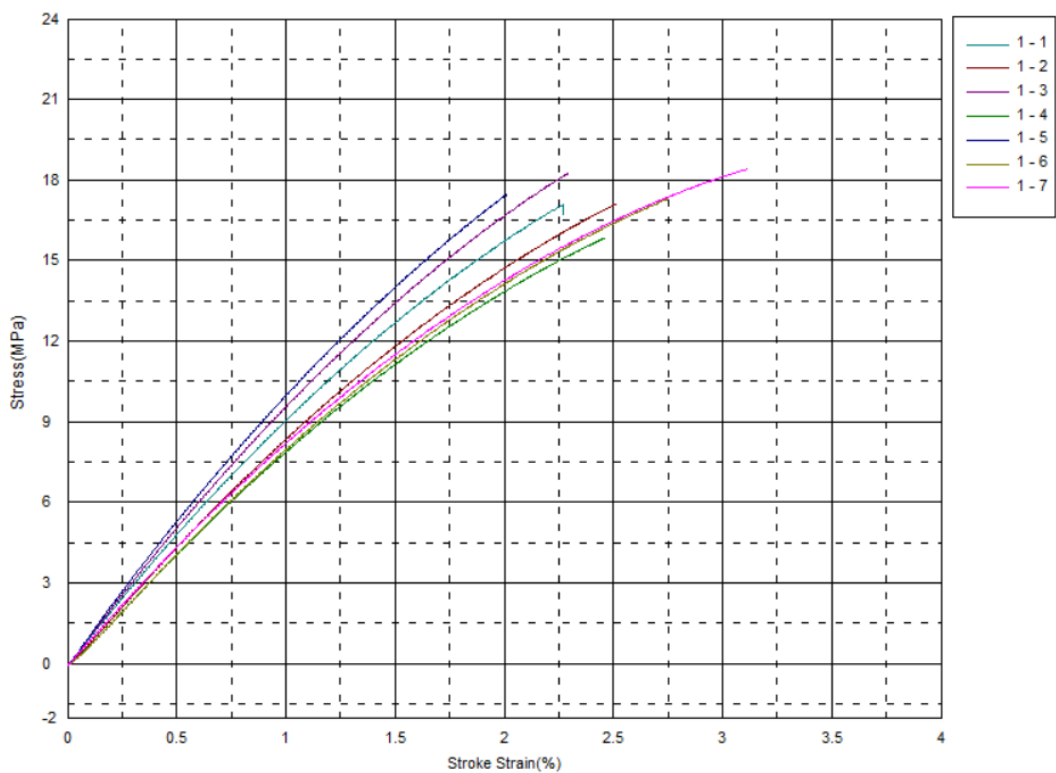


**Figura 3.20 Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/3C20A con back-pressure 90 kg/cm<sup>2</sup>**

El ensayo no salió como se esperaba ya que la probeta se fracturaba mucho antes de que siquiera pudiera tomarse los valores de la pendiente para obtener el módulo elástico, razón por la cual, solo se pudo analizar con dos datos, de los cuales se obtuvo un módulo elástico de 1,01 GPa, pero un esfuerzo de 13.4 MPa y una deformación de 1.26% siendo los valores más bajos obtenidos en estos ensayos. Las probetas estaban extremadamente quebradizas.

#### Mezcla 4

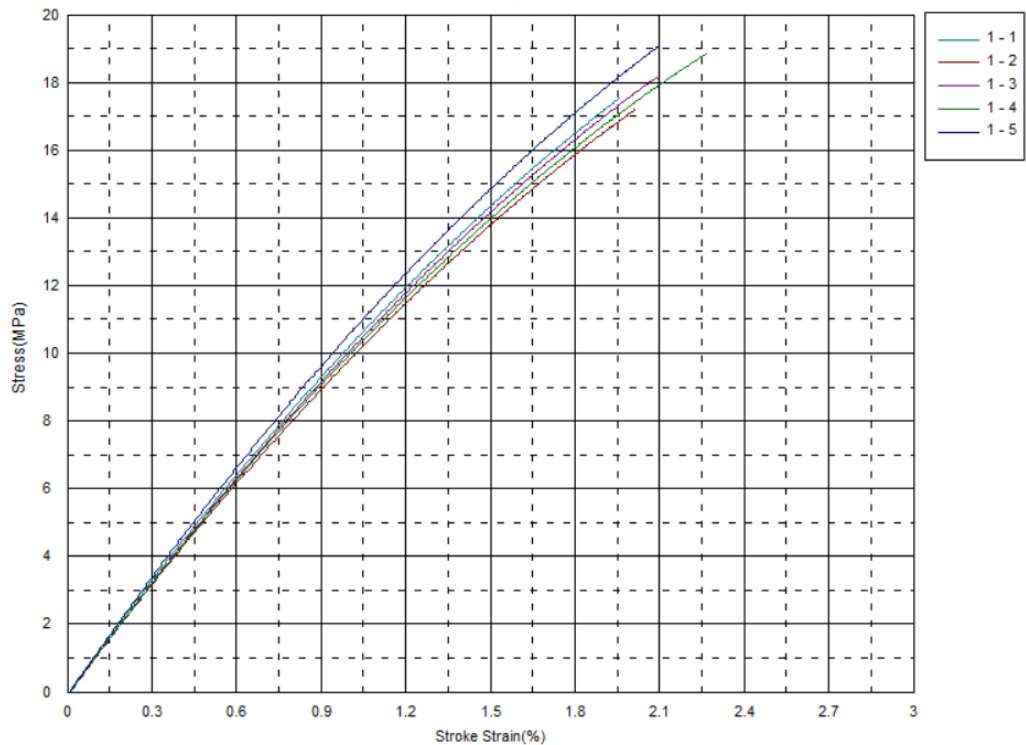
Finalmente, la mezcla 4 corresponde a la composición 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A. En la figura 3.21 se observa que el esfuerzo máximo es aproximadamente 18 Mpa y una deformación de 2.5% debido a esto se puede deducir que es una mezcla ligeramente más dúctil que la primera, ya que para casi el mismo valor de esfuerzo tiene una deformación apenas mayor.



**Figura 3.21 Curva esfuerzo deformación de mezcla de 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A**

En la tabla 3.9 se puede ver que la carga máxima y de rotura están en promedio en 0.697 kN valor similar a la mezcla 1 con back-pressure y una deformación de 2.49%, además de un esfuerzo máximo de 17.6 MPa y un módulo elástico de 0.815 GPa, es decir, es menos rígido que la mezcla 1, pero tiene mayor capacidad de deformarse para un mismo valor de esfuerzo.

Finalmente, a esta mezcla también se le añadió un back-pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup> en el proceso de inyección. En la figura 3.22 se puede apreciar que el esfuerzo máximo está alrededor de 19 MPa, pero con una deformación de 2.1%.



**Figura 3.22 Curva esfuerzo deformación de mezcla 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A con back-pressure de 90 kg/cm<sup>2</sup>**

En la tabla 3.9 se observa un aumento en las propiedades mecánicas, tanto en la carga máxima y el esfuerzo máximo que soporta el material como en el módulo elástico (0.732 kN, 18.5 MPa y 0.96 GPa respectivamente), sin embargo, disminuye la deformación, lo que implica que se fragiliza, pero es más rígido y resistente que la mezcla sin back-pressure.

Comparando resultados, se puede ver que el back-pressure en las mezclas 1 y 3 disminuye las propiedades mecánicas y fragiliza el material, a diferencia de la última mezcla en la cual mejoró estas propiedades notablemente, en todas ellas el proceso de mezclado fue aparentemente más homogéneo debido a las curvas uniformes que presentaron. Para esta aplicación se requiere un material rígido, y la rigidez está estrechamente

relacionada con el módulo elástico, por ende, la selección del material a emplear estará entre las mezclas con módulo superior a 1 GPa, de las cuales tres cumplen con este requerimiento, éstas son la mezcla 2, 3 con BP 50 y 3 con BP 90, esta última se descarta automáticamente por su extrema fragilidad, al punto de que no se pudo siquiera ensayar la mitad de las probetas. A pesar de que la mezcla 3 obtuvo un mayor módulo elástico, es superada ampliamente por la mezcla 2 en esfuerzo máximo y deformación, convirtiendo a esta mezcla en un material más rígido, resistente y relativamente dúctil en comparación con la anterior, por estos motivos, la composición seleccionada para elaborar los paneles para techo es la de 70rPET/30rHDPE/5EGMA.

## 3.2 Diseño del panel

### 3.2.1 Cargas

Se obtuvo en primer lugar el valor de la carga distribuida total con la cual se realizarán tanto los cálculos analíticos exclusivos para la flexión como la simulación en ANSYS, empleando las ecuaciones presentadas en la sección 2.7.3. Los resultados se muestran a continuación en la tabla

**Tabla 3.10 Resultados de carga distribuida total para cada combinación**

Combinación	Carga distribuida total [N/m <sup>2</sup> ]
1	436.52
2	1206.4
3	100.8

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver la combinación 2 es la más crítica, por ende, el valor de carga distribuida total será de 1206.4 N/m<sup>2</sup>.

### Material seleccionado

La mezcla óptima para esta aplicación, según los resultados expuestos en la sección 3.1, es la mezcla 2 con la composición 70RPET/30HDPE/5EGMA, ya que es la segunda mezcla más rígida de todas, en contraste con lo anterior, tiene mayor capacidad de deformación en comparación con la mezcla 3 (70RPET/30RHDPE/3C20A), donde se obtuvo el máximo módulo elástico de 1.12 GPa, pero una deformación de apenas 1.5%. Al no presentar esfuerzo de fluencia, se tomará como si fuese el 50% del esfuerzo último y obtener valores conservadores.

**Tabla 3.11 Propiedades mecánicas de la mezcla seleccionada**

Propiedad	Unidad	Valor
Módulo de Elasticidad	GPa	1.07
Esfuerzo Último	MPa	21.8
Esfuerzo de Fluencia	MPa	10.5
Deformación	%	2.1

Fuente: Elaboración propia

Con este valor de carga se pudo ingresar el dato al código en MATLAB para calcular los momentos en los apoyos, en el centro de cada tramo y las reacciones. El código que se realizó en MATLAB solo requiere el valor de carga  $W_T$  y la distancia entre correas para correr.

- **Distancia entre correas de 600 mm**

Para esta distancia el número de apoyos será de 6 con una distancia  $L_1$ , tal como se definió en el capítulo 2, igual a cero. Además, se sabe que la inercia es  $1.36 \cdot 10^{-6}$ .

**Tabla 3.12 Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 600 mm**

Apoyo	Momento (Nm)	Esfuerzo (kPa)
1	0	0
2	-45.85	438.27
3	-34.39	328.72
4	-34.49	328.72
5	-45.85	438.27
6	0	0

Fuente: Elaboración propia

De igual forma el código en MATLAB entrega las curvas de momento vs posición, en la cual se aprecia claramente que el momento máximo independiente de su signo ocurre en los apoyos 2 y 5 con un valor de 45.85 Nm como lo señala la tabla 3.7, este valor de momento se empleará para calcular de manera aproximada el esfuerzo en los apoyos, el cual es de 0.44 MPa tal como está tabulado. Cabe recalcar que esta es una aproximación ya que se está empleando como modelo matemático una viga, razón por la cual el factor de seguridad obtenido es de 25, bastante alto, además se puede ver que los esfuerzos que soporta el panel aparentemente son muchísimo más pequeños que su esfuerzo máximo, de tal forma que este factor lo único que indica es que el panel no fallará a causa de esfuerzos de flexión.

### Reacciones y deflexiones

Se requiere hallar las deflexiones en el centro de cada tramo, por ende, se debe hallar primero las reacciones, para poder hallar los momentos en las secciones medias y con ellos hallar finalmente las deflexiones en dichos puntos.

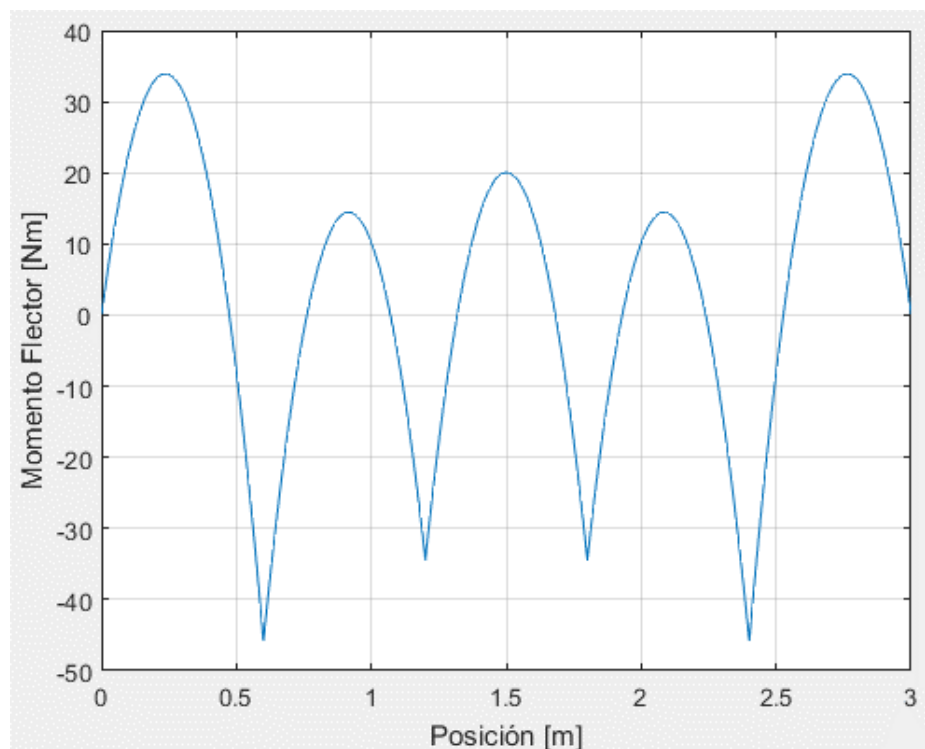
**Tabla 3.13 Reacciones en las correas distanciadas 600 mm**

Apoyo	Reacción (N)
1	286.57
2	821.53
3	706.89
4	706.89
5	821.53
6	286.57

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 3.13 las máximas reacciones se encuentran en los apoyos 2 y 5, correspondiéndose así con los máximos momentos mostrados anteriormente, sin embargo, a diferencia de lo que se pensaría, las deflexiones en este punto son nulas, por ser apoyos fijos. Por consiguiente, los momentos en el centro de cada tramo se deben calcular, empleando el mismo teorema de los tres momentos

ya analizado previamente, simulando que hubiese un apoyo entre dos apoyos fijos consecutivos. Originalmente, se tendrían valores puntuales sin conocer la trayectoria de la curva de momento, sin embargo, en la programación se optó por realizar un análisis infinitesimal, partiendo cada tramo en 100 pedazos, y así teniendo una mayor cantidad de valores, construir la curva. De la gráfica obtenida, se pudo constatar que los máximos momentos (33.9 Nm) ocurren en el primer y último tramo, sin embargo, no son exactamente en el centro del tramo, el primero está en 0.23 m y el segundo en 2.77 m. Para este valor de momento se tendría en esa región un esfuerzo de 324 kPa.



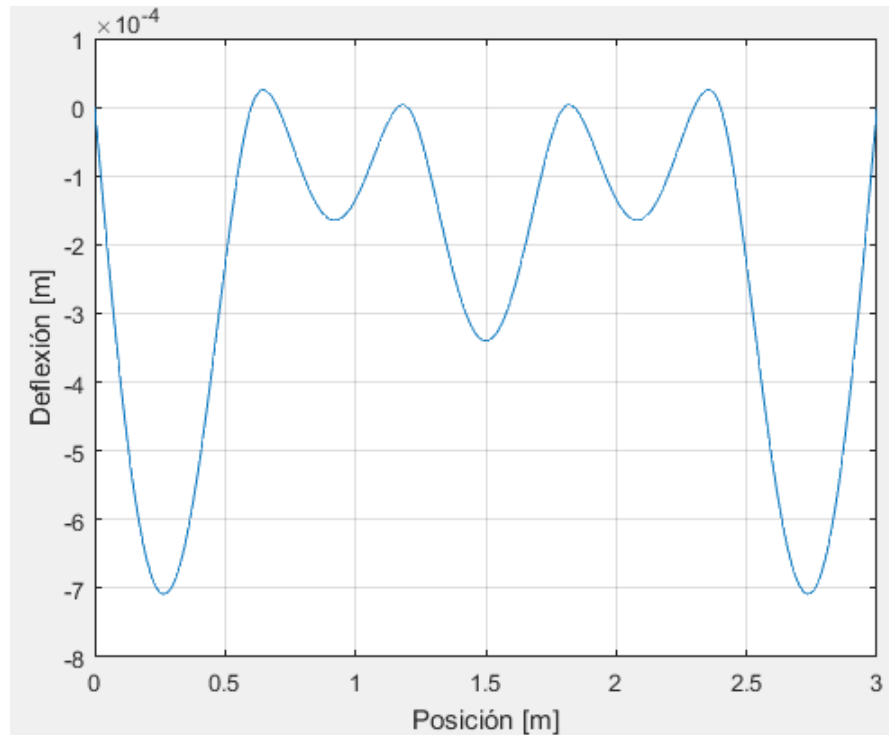
**Figura 3.23 Curva momento flector vs. posición para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se realizó la misma programación para hallar las deflexiones. La máxima deflexión es de 0.708 mm en 0.26 m y 2.74 m. Si bien es cierto, la deflexión depende en gran medida del momento flector, también se ve afectada por la carga distribuida, es debido a este factor que la deflexión está muy ligeramente desfasada



del punto donde se encuentra el máximo momento flector de las secciones medias, contrario a lo que se pensaría en primera instancia.



**Figura 3.24 Curva deflexión vs. posición para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

- **Distancia entre correas 700 mm**  
**Momento Flector y esfuerzo**

Para esta configuración el número de apoyos será de 5 con una distancia  $L_1$  diferente de  $L_2$ , donde  $L_1$  (100 mm) es la distancia del extremo libre al primero y último apoyo respectivamente, mientras que  $L_2$  es igual a 700 mm.

**Tabla 3.14 Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 700 mm**

Apoyo	Momento (Nm)	Esfuerzo (kPa)
1	-6.05	57.83
2	-61.79	590.64
3	-43.21	413.04
4	-61.79	590.64
5	-6.05	57.83

Fuente: Elaboración propia

El factor de seguridad para los dos esfuerzos más altos (0.59 y 0.41 MPa), es de 18 y 27 respectivamente, respecto al esfuerzo de 57 kPa resulta irrisorio calcularlo porque evidentemente nunca fallará para aquel valor de esfuerzo sabiendo que se ha tomado como esfuerzo de fluencia 10.9 MPa. Como se determinó en el capítulo 2, el factor de seguridad mínimo para el análisis teórico es de 10 y los valores de factor de seguridad están muy por encima de este valor, lo que en esta aplicación es correcto, ya que no se está considerando esfuerzos en otras direcciones debido a la complejidad del problema.

### Reacciones y deflexiones

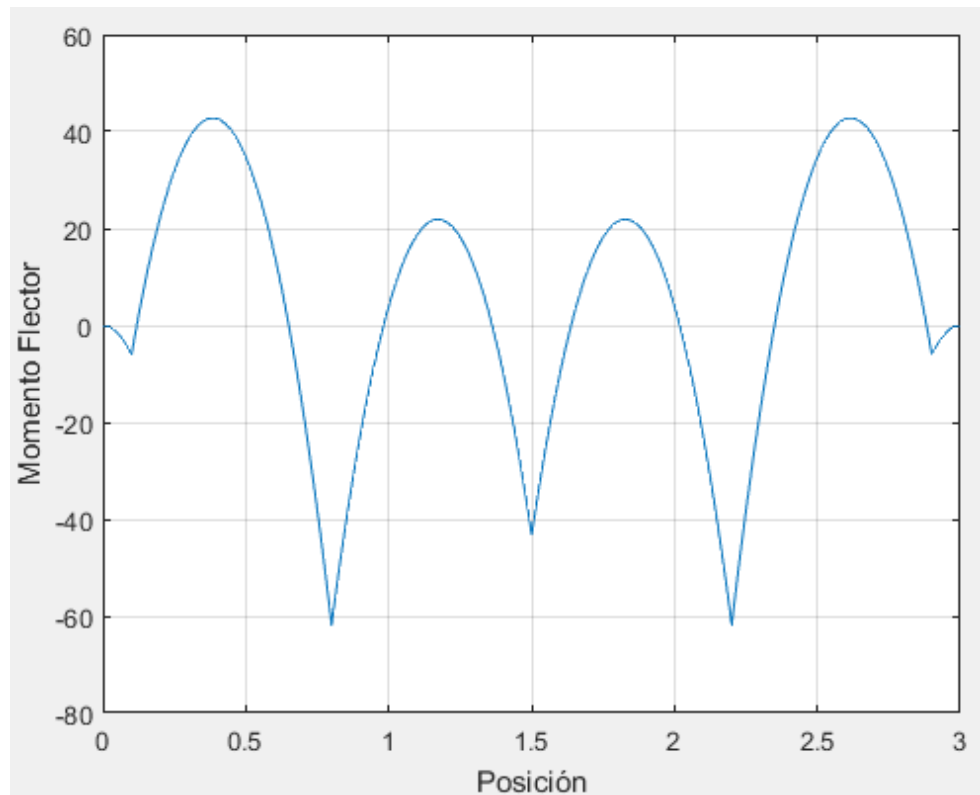
Para hallar las deflexiones en la mitad de cada tramo, es necesario hallar primero las reacciones como se estableció en el capítulo 2.

**Tabla 3.15 Reacciones en correas distanciadas 700 mm**

Apoyo	Reacción (N)
1	464.9
2	953.2
3	793.9
4	953.2
5	464.9

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 3.15 las reacciones máximas están en los apoyos 2 y 4. Sin embargo, las deflexiones en todos estos puntos son nulas, por ello se debe calcular los momentos en la mitad ( $M_e$ ) para hallar las deflexiones máximas.

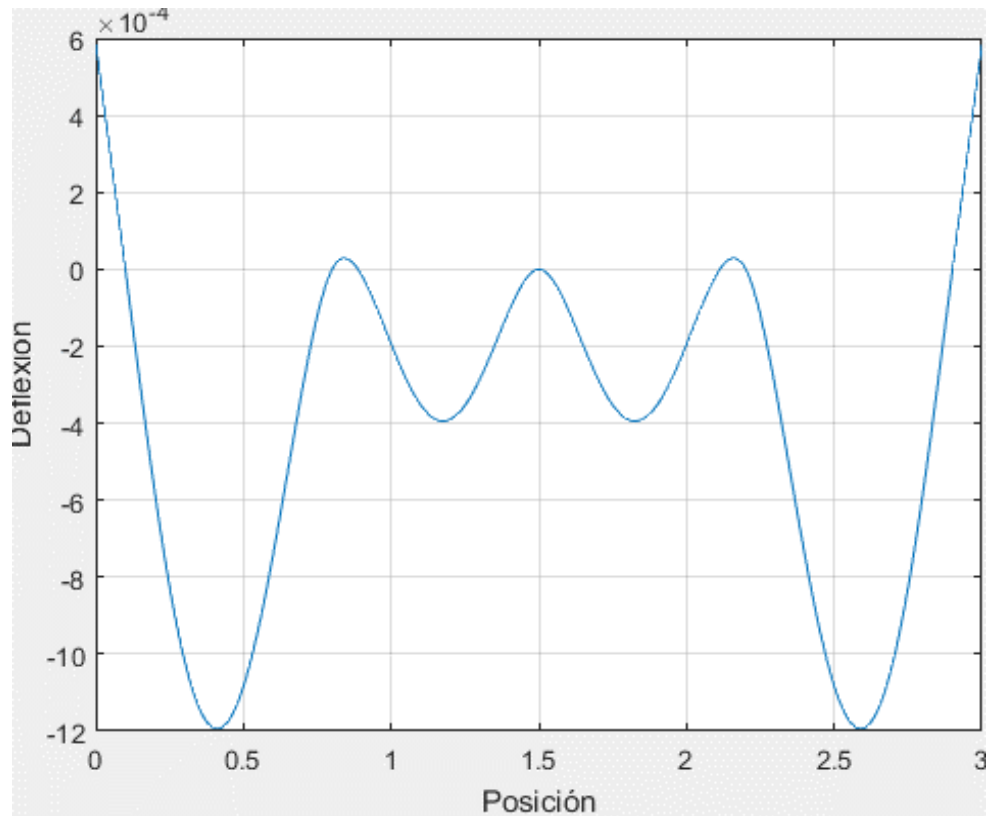


**Figura 3.25 Curva momento flector vs. posición en secciones medias para distancia entre correas de 700 mm**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.25 se puede ver como varía el momento a lo largo de la profundidad del panel que es de 3 m. El valor máximo que se obtuvo para la sección intermedia de cada tramo fue 42.75 Nm en 0.39 y 2.62 m. El esfuerzo correspondiente sería de 408.64 kPa.

Las mayores deflexiones se encuentran en 0.4 y 2.6 m con un valor en magnitud de 1.2 mm, al igual que en el caso anterior, la ubicación de la máxima deflexión y momento están apenas desfasadas. Por otra parte, en los extremos donde el momento es nulo, se tiene la segunda deflexión más alta con un valor de 0.6 mm, justamente por tener una configuración en voladizo. A continuación, se muestra la gráfica que muestra como varía la deformación a lo largo de la longitud analizada.



**Figura 3.26 Curva deflexión vs. posición para distancia entre correas de 700 mm**

Fuente: Elaboración propia

- **Distancia entre correas 800 mm**

**Momento flector y esfuerzo**

Para la presente configuración se tiene 4 apoyos, con distancia  $L_1$  diferente de  $L_2$ , donde  $L_1$  (300 mm), es la distancia del primer y último apoyo al extremo libre y  $L_2$  es igual a 800 mm.

**Tabla 3.16 Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 800 mm**

Apoyo	Momento (Nm)	Esfuerzo (kPa)
1	-54.45	520.48
2	-66.55	636.14
3	-66.55	636.14
4	-54.45	520.48

Fuente: Elaboración propia

El factor de seguridad para los esfuerzos calculados de 0.52 MPa y 0.64 MPa son 21 y 17 respectivamente, como se puede ver, la

distancia entre correas y el esfuerzo tienen una relación inversamente proporcional, y por ende a medida que la distancia aumenta la confiabilidad de que el sistema no falle disminuye.

### **Reacciones y deflexiones**

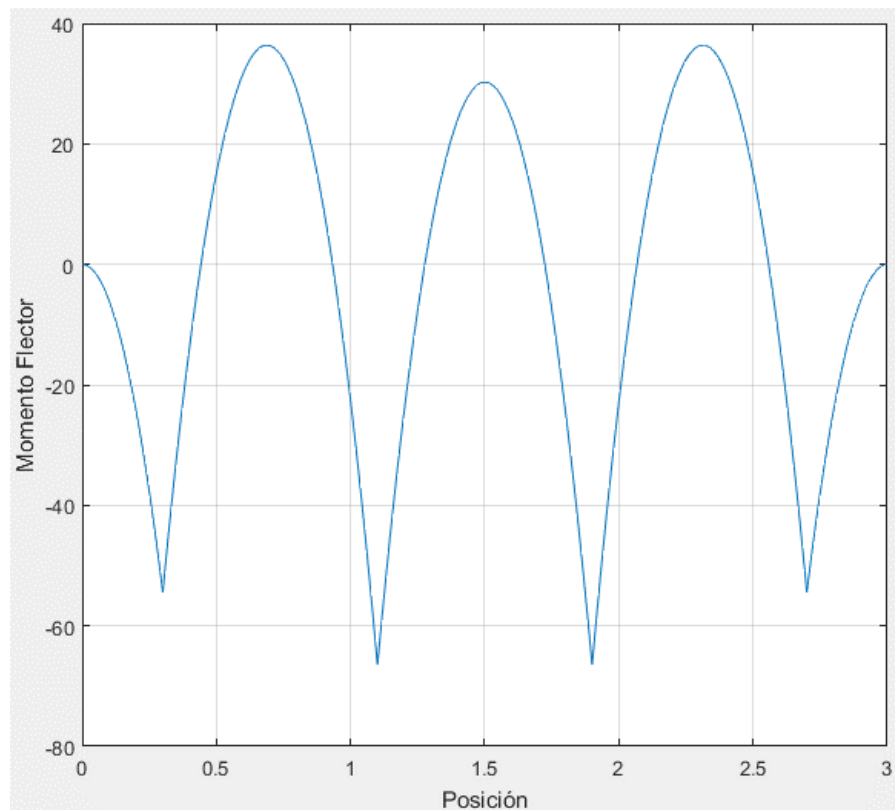
Una vez más se presenta una tabla de resultados para las reacciones en cada apoyo y a continuación la variación de las deformaciones y momento flector en las secciones medias a lo largo de la longitud.

**Tabla 3.17 Reacciones en correas distanciadas 800 mm**

<b>Apoyo</b>	<b>Reacción (N)</b>
<b>1</b>	831.88
<b>2</b>	983.12
<b>3</b>	983.12
<b>4</b>	831.88

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 3.17 las reacciones máximas están en los apoyos 2 y 3, pero en todos estos puntos como ya se sabe, no existe deformación. Para ello se analiza la variación de los momentos a lo largo del panel, la curva se muestra a continuación:

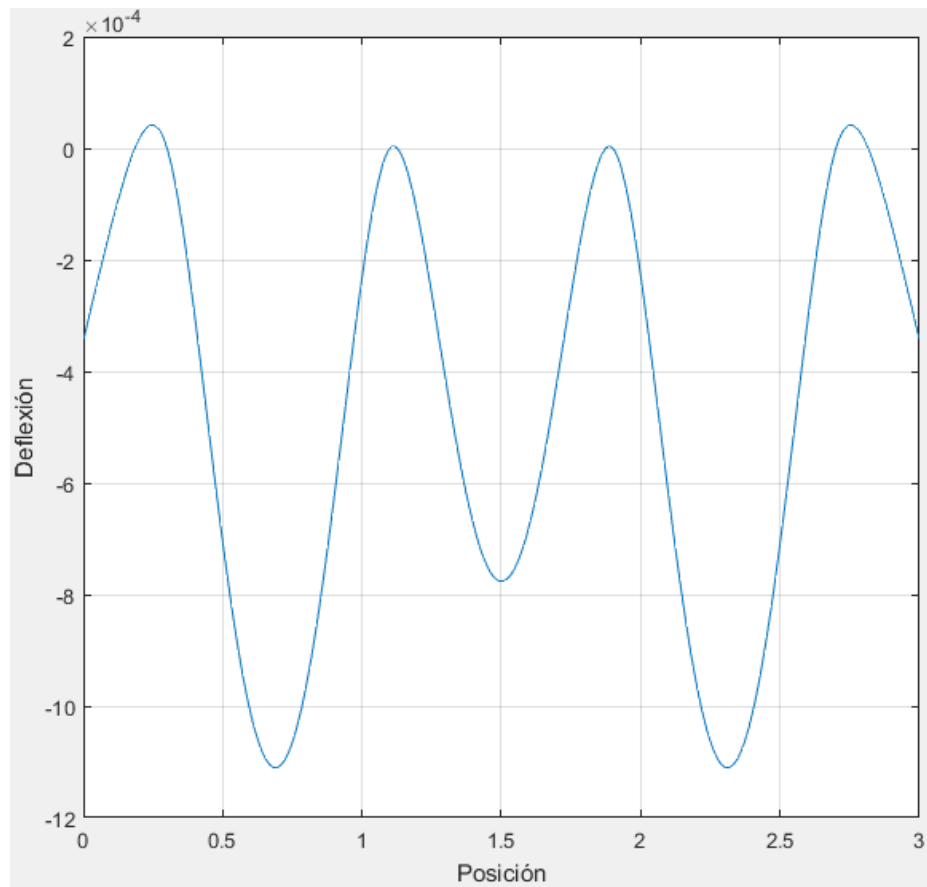


**Figura 3.27 Curva de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 800 mm**

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.27 se presenta la curva que describe la variación del momento en función de la longitud, teniendo su máximo 36.38 Nm en el primer y último tramo, específicamente en 0.7 y 2.3 m respectivamente. Sin embargo, el valor de momento en el segundo tramo está bastante próximo, siendo de 30.25 Nm a 1.5 m. El esfuerzo producido por el momento de 36.38 Nm es de

De acuerdo con la curva de la figura 3.28 la mayor deflexión se encuentra en el segundo y cuarto tramo con un valor de 1.1 mm 0.7 y 2.32 m, la segunda deformación más alta que es de 0.77 mm ocurre en 1.52 m, el tercer tramo, y no en los extremos en voladizo como el caso anterior, la cual tiene un valor de 0.33 mm.



**Figura 3.28 Curva deformación vs. posición para distancia entre correas de 800 mm**

Fuente: Elaboración propia

- **Distancia entre correas 900 mm**

**Momento flector y esfuerzo**

Para la penúltima configuración se tienen 4 apoyos igual que en el caso anterior, con la diferencia de que la distancia  $L_1$  es de 150 mm de igual forma, esta distancia va del primer y último apoyo a sus respectivos extremos libres próximos. Mientras que la distancia  $L_2$  como es de suponer, es de 900 mm.

**Tabla 3.18 Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 900 mm**

Apoyo	Momento (Nm)	Esfuerzo (kPa)
1	-13.61	130.09
2	-95.28	910.76
3	-95.28	910.76
4	-13.61	130.09

Fuente: Elaboración propia

Para el esfuerzo de 0.91 MPa se obtuvo un factor de seguridad de 12, para el esfuerzo de 0.13 MPa estaba de más calcularlo, ya que sería muy grande lo que implica que por ese esfuerzo jamás fallaría, sin embargo, en los apoyos 2 y 3 se tienen puntos críticos y de especial cuidado ya que el factor encontrado no supera por mucho al mínimo establecido en el capítulo 2.

### Reacciones y deflexiones

Se halló las 4 reacciones tal como se muestra en la tabla 3.19 y la variación de deflexiones y momentos como se mostrarán a continuación.

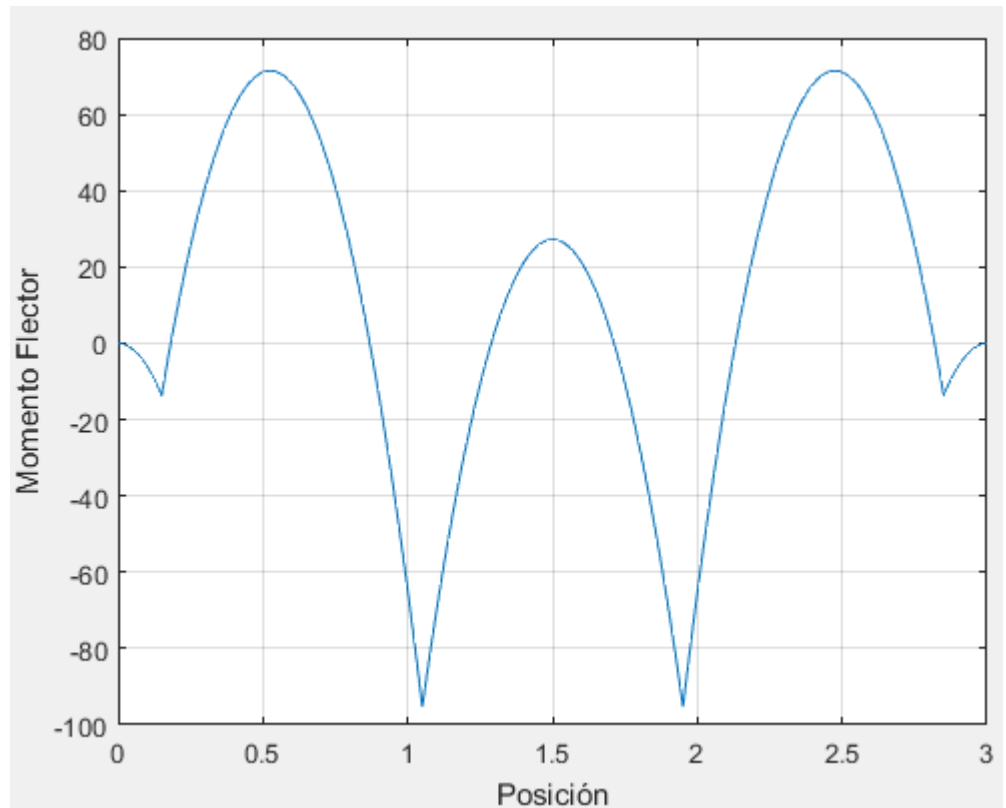
**Tabla 3.19 Reacciones en las correas distanciadas 900 mm**

Apoyo	Reacción (N)
1	635.2
2	1179.8
3	1179.7
4	635.3

Fuente: Elaboración propia

En las figuras 3.29 y 3.30 se observa la variación de momento flector y deflexión respecto a la posición a lo largo de la profundidad del panel. Según la curva de variación de momento flector se obtuvo que el máximo valor de momento en las secciones intermedias ocurre en el primer y tercer tramo, con valor de 71.46 Nm en 0.53 y 2.49 m. El esfuerzo correspondiente sería de 683.07 kPa.

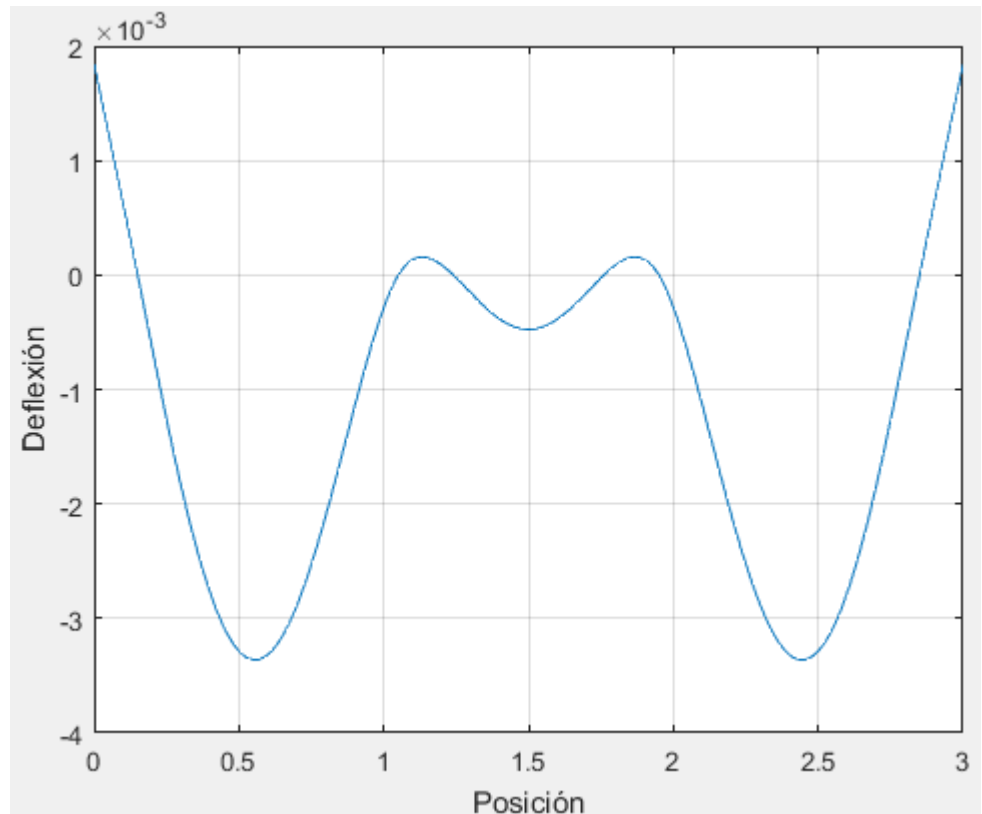




**Figura 3.29 Gráfica de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 900 mm**

Fuente: Elaboración propia

La deformación máxima es de 3.4 mm en el primer y tercer tramo, específicamente 0.56 y 2.44 m. En este caso la segunda deformación más alta de 1.78 mm sí se encuentra en el extremo libre con momento 0. Para esta configuración se obtuvo valores mucho más altos que en los dos casos anteriores estaban relativamente cercanos, debido a que mientras mayor es la distancia que separa a los soportes fijos más alto es el momento flector y por ende las deformaciones y esfuerzos, tal como se vio reflejado en el análisis de esfuerzos anterior.



**Figura 3.30 Curva de deformación vs. posición para una distancia entre correas de 900 mm**

Fuente: Elaboración propia

- **Distancia entre correas 1000 mm**

**Momento flector y esfuerzo**

En este caso también se tiene 4 apoyos, pero la configuración aquí presentada es similar a la primera, es decir  $L_2$  es 1000 mm y  $L_1$  es cero, por lo que no hay extremos en voladizo.

**Tabla 3.20 Valores de momento flector y esfuerzo de flexión para distancia entre correas de 1000 mm**

Apoyo	Momento (Nm)	Esfuerzo (kPa)
1	0	0
2	-121	1151.66
3	-121	1151.66
4	0	0

Fuente: Elaboración propia

En este caso solo se tiene un esfuerzo de 1.15 MPa, para el cual se obtuvo un factor de seguridad de 10, estando para el caso analítico en el límite, ya que como se definió en el capítulo 2, este es el valor mínimo de factor de seguridad.

### Reacciones y deflexiones

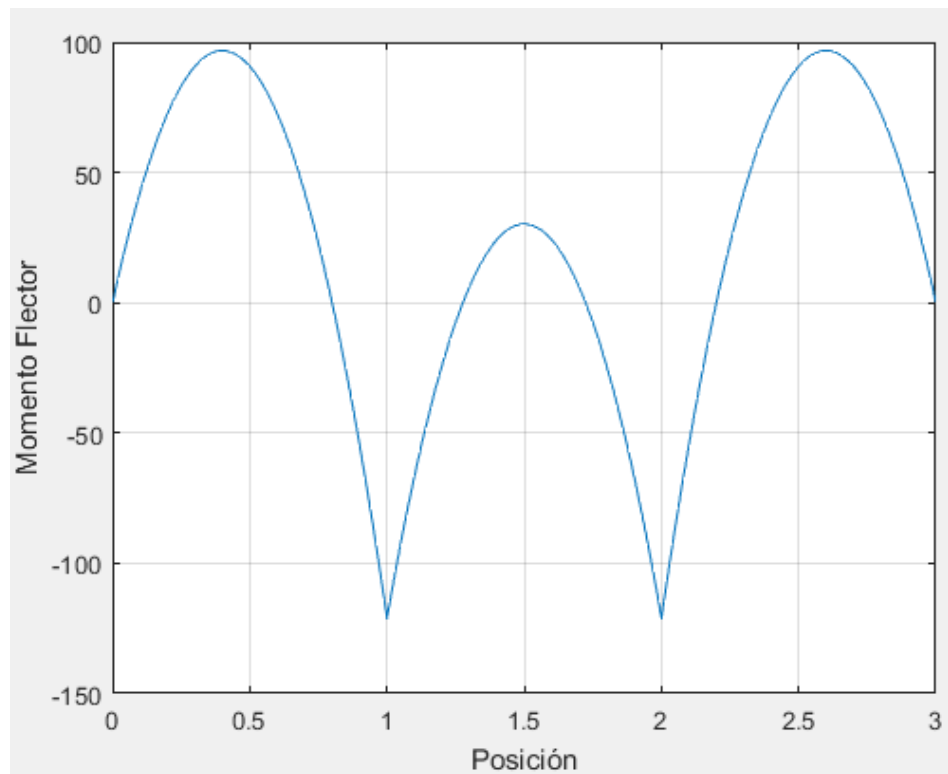
Se hallaron las reacciones en los cuatro apoyos y la variación de los momentos y deflexiones a lo largo de la longitud.

**Tabla 3.21 Reacciones en correas distanciadas 1000 mm**

Apoyo	Reacción (N)
1	484
2	1331
3	1331
4	484

Fuente: Elaboración propia

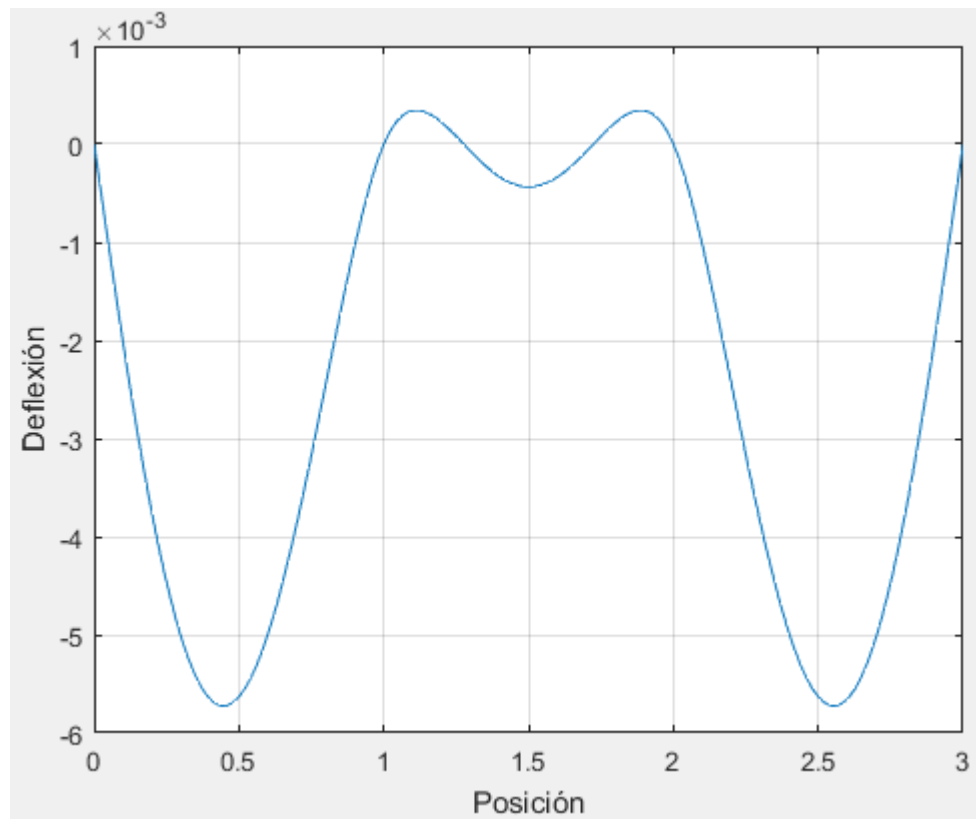
A continuación, se muestran las curvas que describen la variación del momento flector a lo largo de toda la longitud al igual que la deflexión. De la primera se puede determinar gráficamente el máximo valor de momento al cual corresponde 96.8 Nm en el primer y tercer tramo, 0.4 y 2.6 m respectivamente. Mientras que en el segundo tramo el momento máximo es apenas de 30.2 Nm. El esfuerzo correspondiente al momento de 96.8 Nm es de 925.29 kPa.



**Figura 3.31 Curva de momento flector vs. posición para distancia entre correas de 1000 mm**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la deflexión máxima para esta configuración es de 5.7 mm en el primer tramo a 0.43 m y en el tercer tramo a 2.57 m, mientras que en el segundo tramo es de apenas 0.4 mm en exactamente la mitad de esa sección. En definitiva, para esta configuración se obtuvo el mayor valor de deflexión que en todas las demás propuestas, y es natural que así sea puesto que mientras mayor sea la distancia entre apoyos tienden a generarse mayores momentos que flectarán el panel.

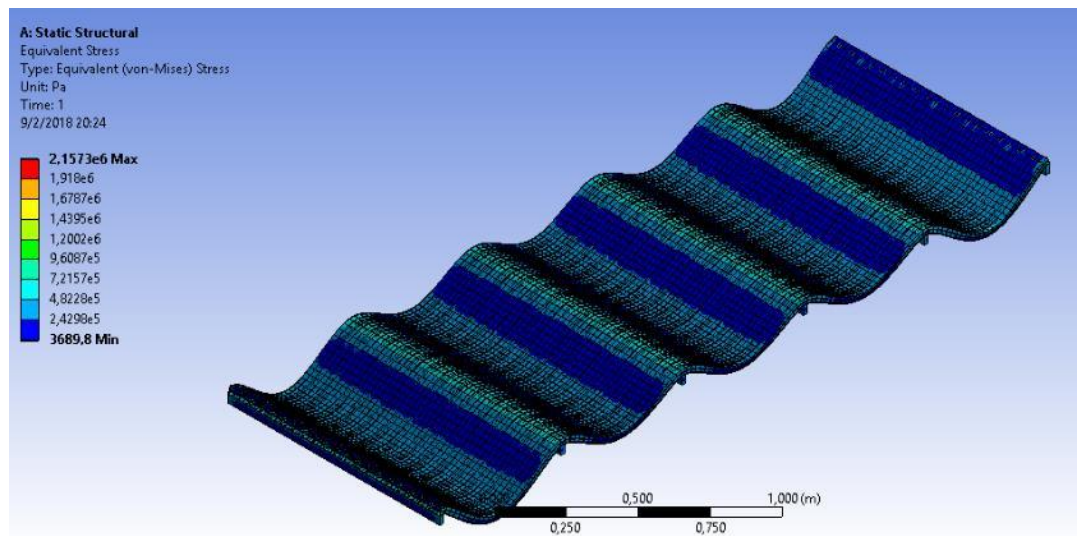


**Figura 3.32 Curva de deflexión vs. posición para distancia entre correas de 1000 mm**

### 3.2.2 Simulación

#### **Distancia entre correas de 600 mm**

En la simulación realizada en ANSYS se observó que los máximos esfuerzos están en las correas con valores comprendidos entre 400 y 700 kPa. Cabe recalcar que los esfuerzos máximos según la escala de colores que bota ANSYS no están en el panel como tal, sino más bien en las correas, por eso no se consideran, ya que las correas están hechas de acero estructural y no es parte del diseño ni su análisis, más bien se colocó con el fin de ver una simulación más cercana a la realidad y la configuración de cómo estará instalado el panel.



**Figura 3.33 Distribución de Esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

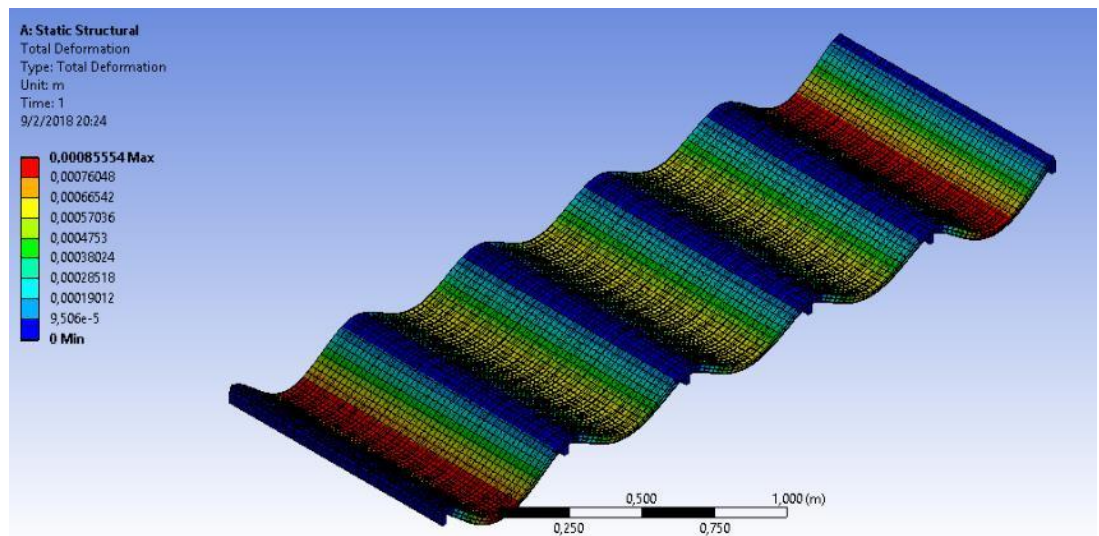
Mientras que las deformaciones están entre 0 y 0.85 mm, se estima que las deformaciones en el caso más crítico deberían oscilar entre  $l/180$  y  $l/120$  para miembros que no soportan paflones según las cargas, donde  $l$  es la distancia entre apoyos, por lo tanto, los valores en el rango aceptable son 3.33 y 5 mm respectivamente, por lo cual el panel está muy por debajo del mínimo.

TABLE 1604.3  
DEFLECTION LIMITS<sup>a, b, c, h, i</sup>

CONSTRUCTION	$L$	$S_{or} W^f$	$D+ Ld, g$
Roof members: <sup>e</sup>			
Supporting plaster ceiling	$l/360$	$l/360$	$l/240$
Supporting nonplaster ceiling	$l/240$	$l/240$	$l/180$
Not supporting ceiling	$l/180$	$l/180$	$l/120$
Floor members	$l/360$	-	$l/240$
Exterior walls and interior partitions:			
With brittle finishes	-	$l/240$	-
With flexible finishes	-	$l/120$	-
Farm buildings	-	-	$l/180$
Greenhouses	-	-	$l/120$

**Figura 3.34 Valores de deflexiones admitidas en construcción**

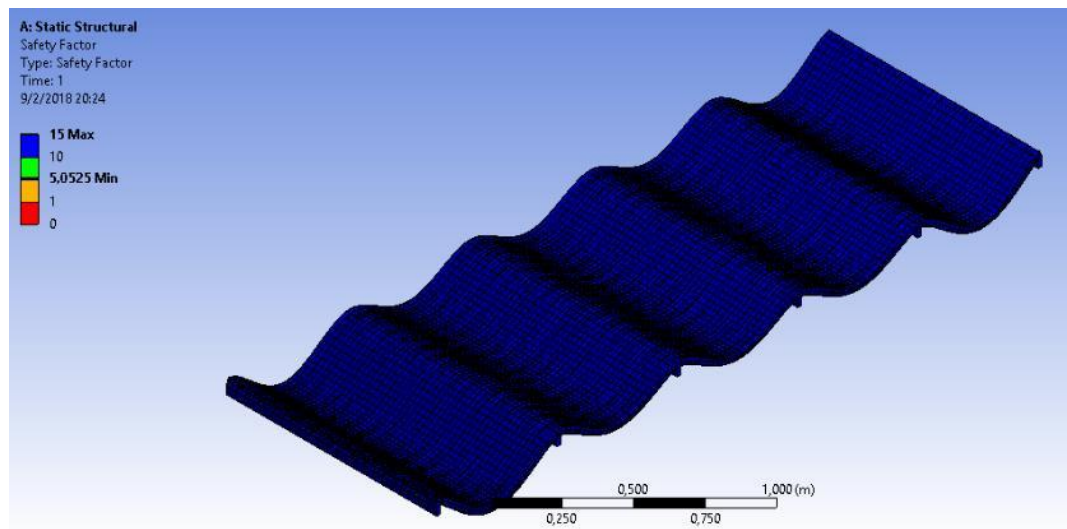
Fuente: (IBC, 2009)



**Figura 3.35 Análisis de deformación total en el panel para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el factor de seguridad obtenido es de 15 para esta configuración, lo que implica que el panel no fallará nunca debido a estas cargas.

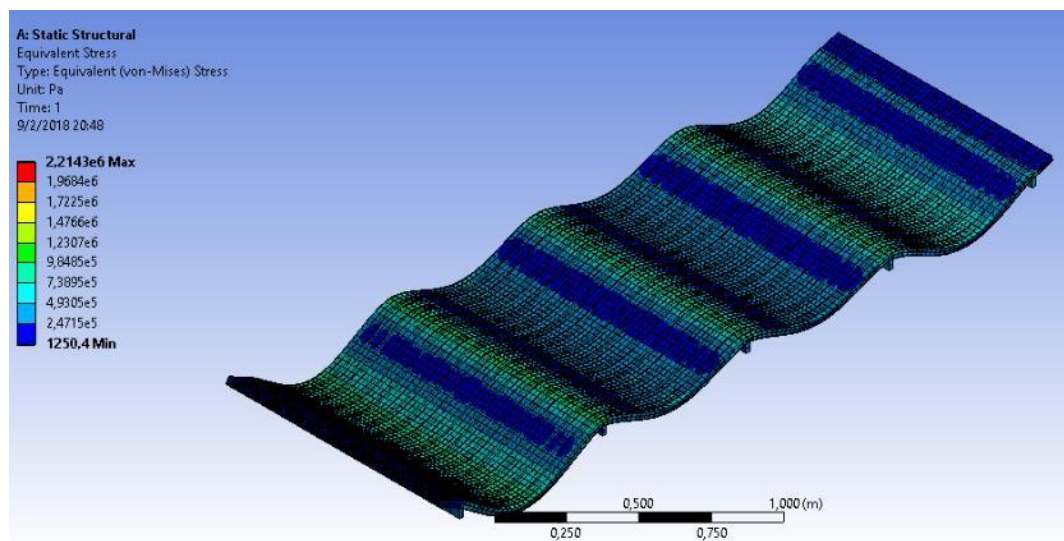


**Figura 3.36 Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 600 mm**

Fuente: Elaboración propia

### Distancia entre correas de 700 mm

Se puede apreciar una amplia variabilidad de esfuerzos, presentando sus máximos tanto en las correas como en el centro del primer y cuarto tramo, en los extremos libres el esfuerzo es mucho más pequeño, pero la parte de interés en nuestro análisis es la comprendida entre los soportes fijos, ya que se desea observar la deflexión máxima en el caso más crítico. Los esfuerzos máximos están alrededor de 0.7- 0.9 MPa.

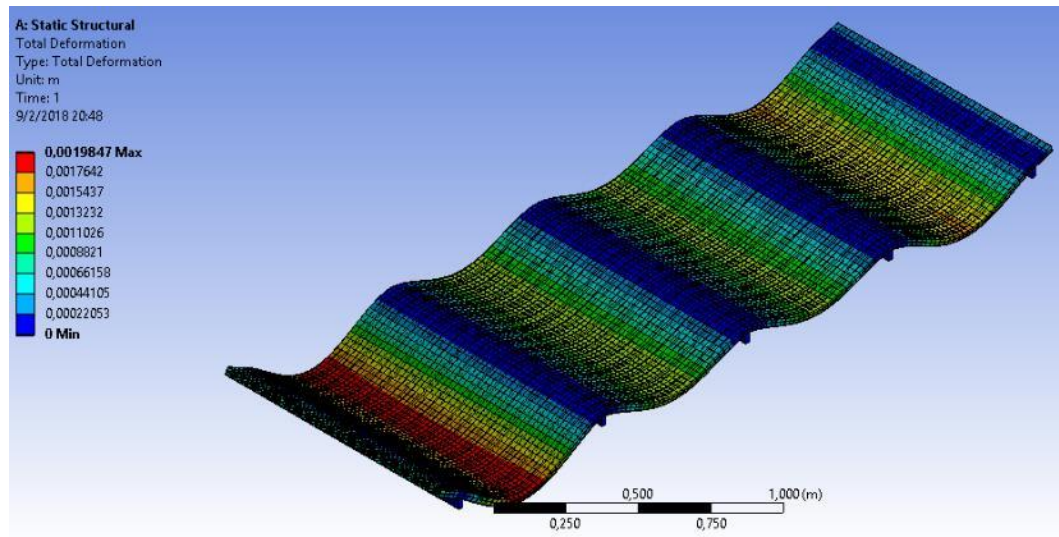


**Figura 3.37 Distribución de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 700 mm**

Fuente: Elaboración propia

Las deformaciones máximas se encuentran en el primer y cuarto tramo con valores que oscilan entre 1.7 y 1.9 mm, mientras que en los tramos 2 y 3 están alrededor de 1.1 mm, tomando en consideración que el rango máximo admisible debe estar entre 3.9 y 5.8 mm para una distancia  $l$  de 700 mm, los valores de deflexión son adecuados.

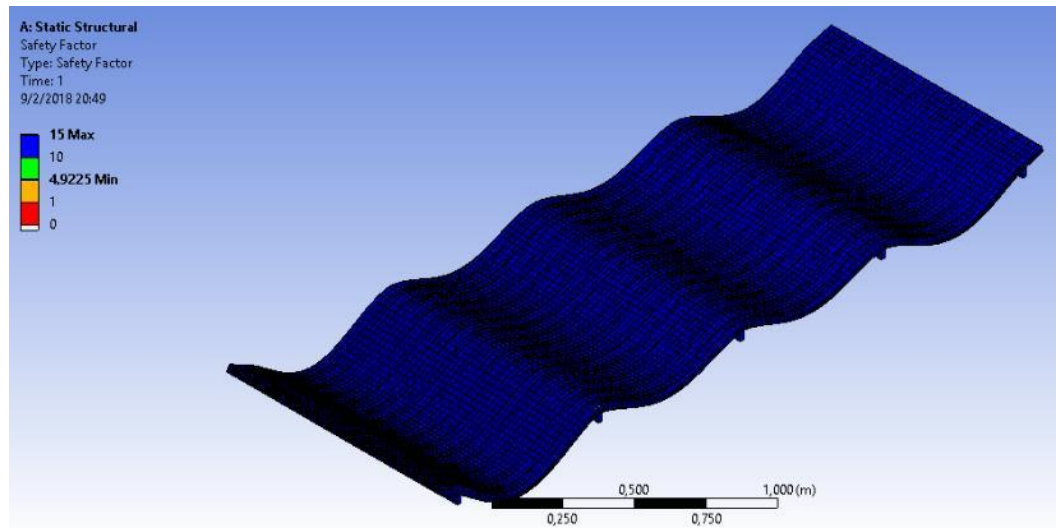




**Figura 3.38 Análisis de deformación total en el panel para una distancia entre correas de 700 mm**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el factor de seguridad que indica el software es de 15 en prácticamente todo el panel, el cual está muy por encima del mínimo aceptable.

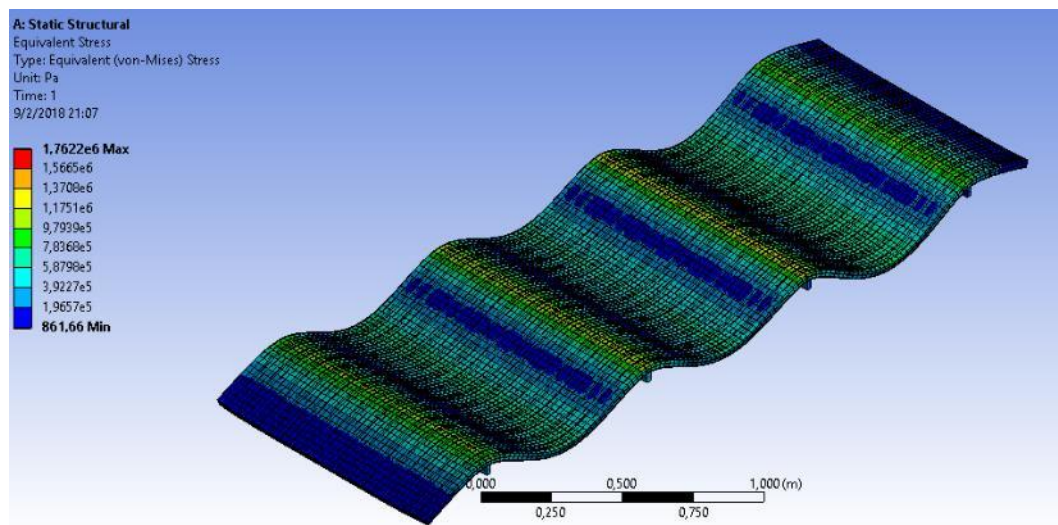


**Figura 3.39 Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 700 mm**

Fuente: Elaboración propia

### Distancia entre correas de 800 mm

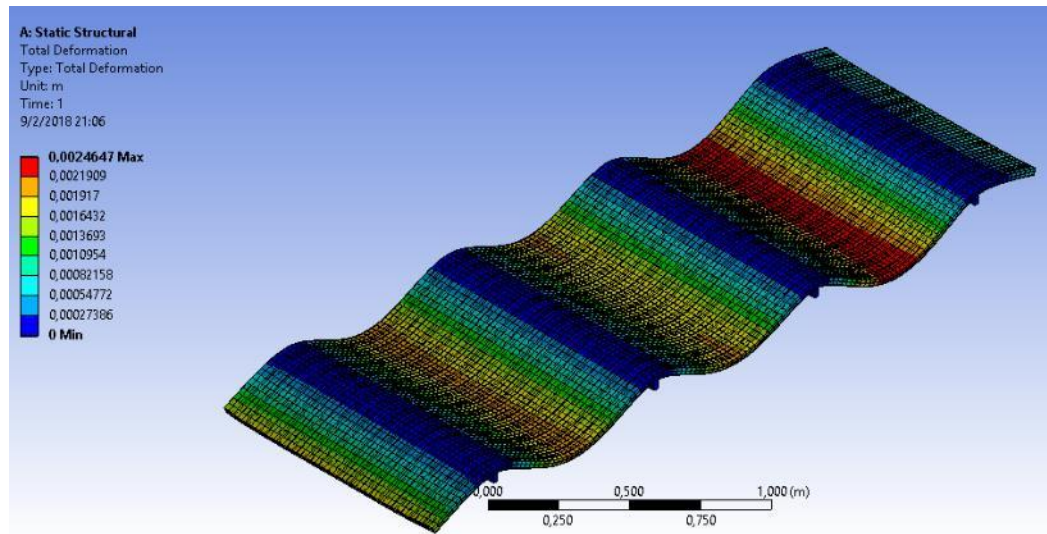
Una vez más, el esfuerzo en la posición de las correas es máximo, con valores que oscilan entre 0.9 y 1.2 MPa, seguido de los esfuerzos en mitad de cada tramo que están alrededor de 0.6 MPa. Los esfuerzos máximos según la escala que proporciona ANSYS están en realidad en las correas de acero estructural.



**Figura 3.40** Análisis de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 800 mm

Fuente: Elaboración propia

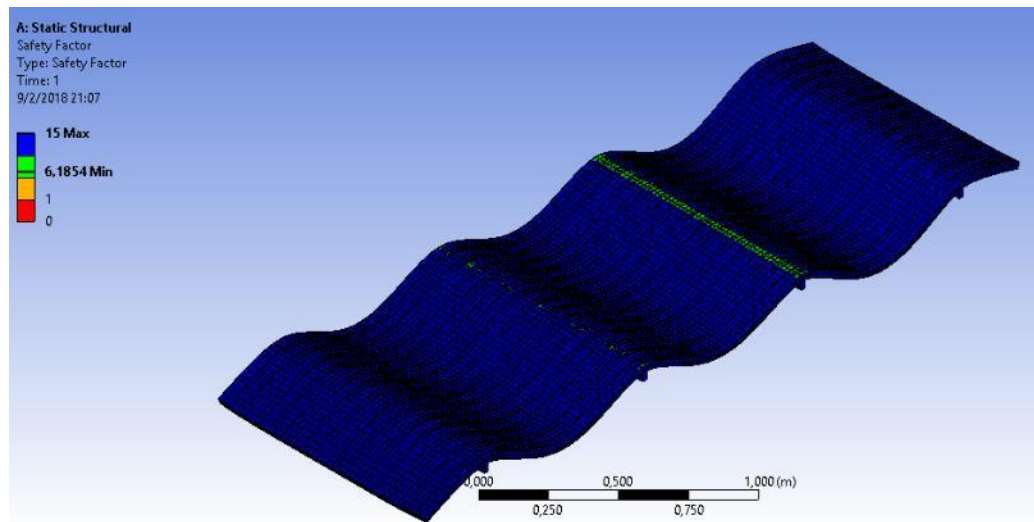
Por otra parte, las deformaciones totales oscilan entre 0 y 2.5 mm, evidentemente en los apoyos fijos la deflexión será nula y los máximos valores estarán en la mitad de cada tramo, alrededor de 1 y 2 mm, además se considera que la deflexión máxima admisible está en un rango de 4.4 mm y 6.6 mm para una distancia  $L$  de 800 mm, por ende, las deflexiones están por debajo de los valores máximos admisibles. Mientras que en los extremos las deformaciones son de 1.3 mm aproximadamente.



**Figura 3.41** Análisis de la deflexión total en el panel para distancia entre correas de 800 mm

Fuente: Elaboración propia

En este caso, el factor de seguridad es de 15 en la mayor parte del sólido, y 6 en ciertas correas, donde están los máximos esfuerzos para el panel.

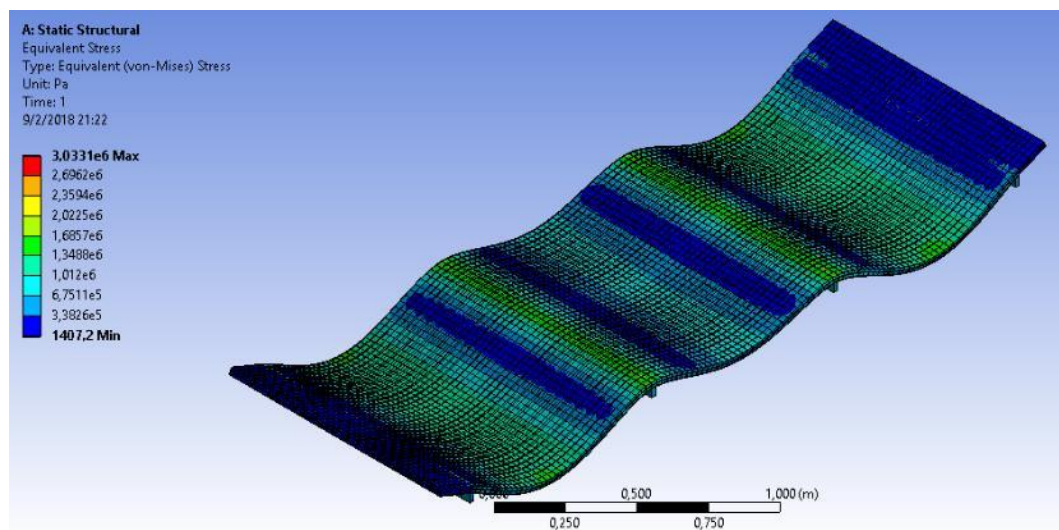


**Figura 3.42** Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 800 mm

Fuente: Elaboración propia

### Distancia entre correas de 900 mm

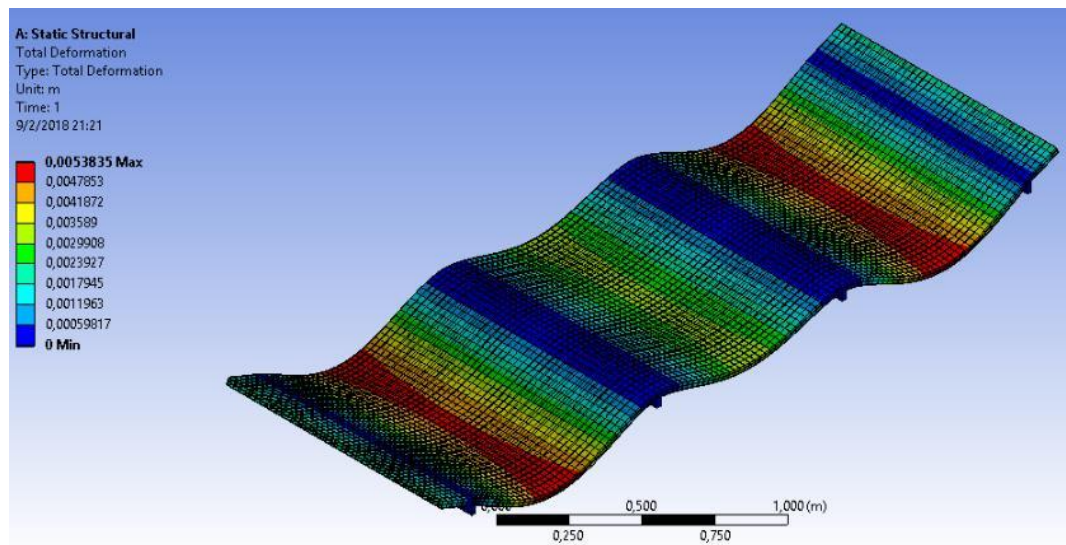
Los esfuerzos son bastante variables a lo largo del panel, presentando sus valores más altos en las correas con aproximadamente 1.4 MPa y en el centro del primer y tercer tramo con valores de 1 MPa. Como es de esperarse es en la zona de las correas donde podría fallar debido a que se concentran los esfuerzos. Sin embargo, al ser valores de esfuerzo tan bajos comparados con la resistencia del material, esto carece de relevancia.



**Figura 3.43 Distribución de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 900 mm**

Fuente: Elaboración propia

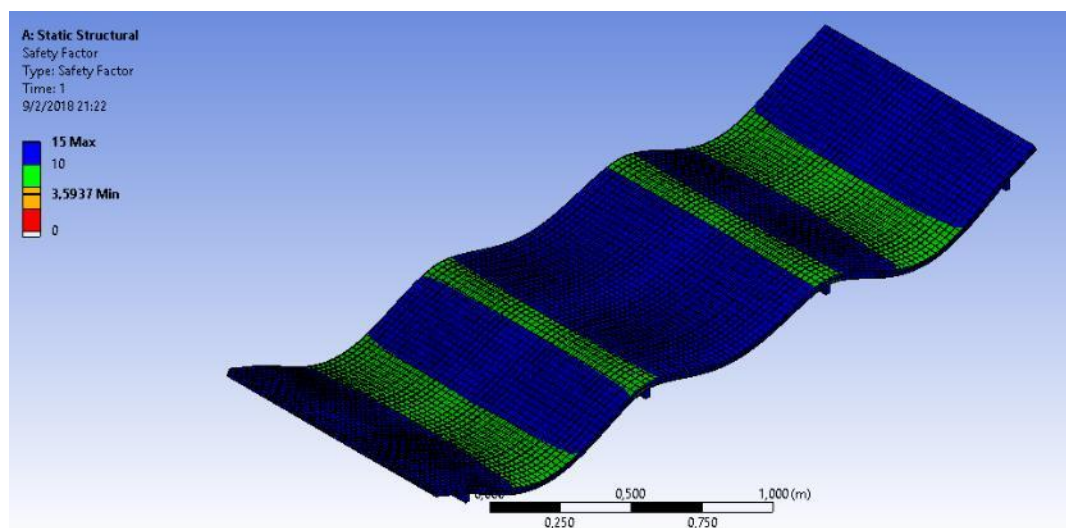
Las deformaciones máximas se encuentran en el centro del primer y tercer tramo con un valor de 5.4 mm mientras que en el segundo tramo es de 3 mm, para esta configuración el rango admisible está entre 5 y 7.5 mm, en este caso, ya se está dentro del rango máximo admisible y como ya se ha manifestado, lo ideal es que esté muy por debajo de éste.



**Figura 3.44 Análisis de deformación total en el panel para una distancia entre correas de 900 mm**

Fuente: Elaboración propia

El factor de seguridad se encuentra en un rango de 10 a 15, tomando valores de 10 justo donde se tiene los máximos esfuerzos, pero esto no representa un problema, ya que supera por mucho al factor mínimo obtenido en el capítulo anterior para esta simulación.

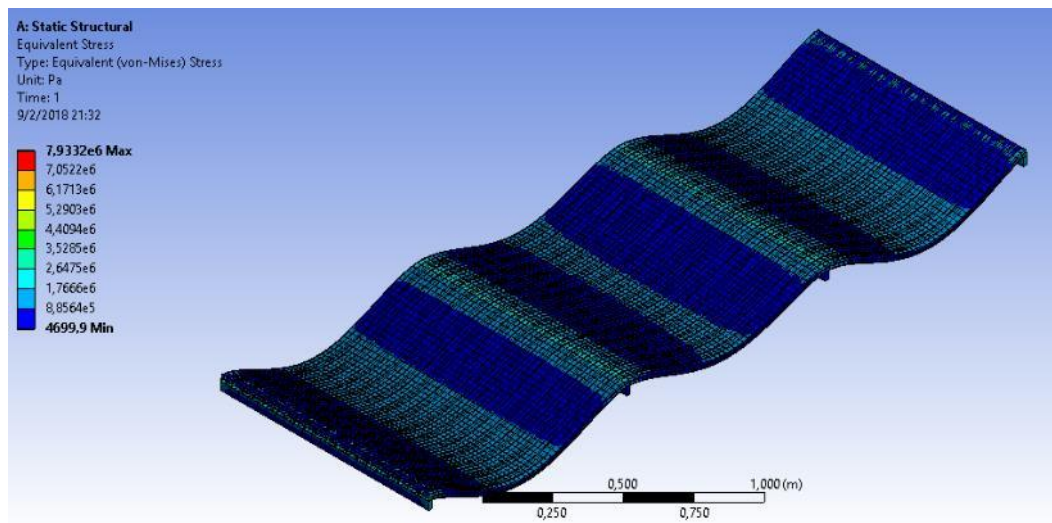


**Figura 3.45 Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 900 mm**

Fuente: Elaboración propia

### Distancia entre correas de 1000 mm

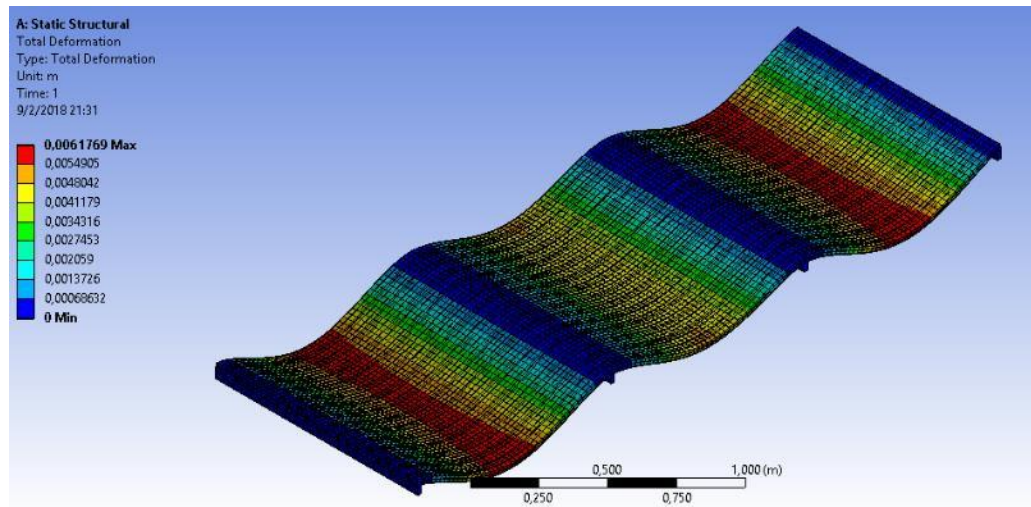
Esta configuración es similar a la primera con distancia entre correas de 600 mm. Los esfuerzos son aproximadamente el doble de lo que eran en la primera configuración, aproximadamente 1.8MPa, pero mantienen una distribución parecida, en la que no se presenta mucha variabilidad. Los máximos esfuerzos están en las correas y en la mitad de cada tramo donde tienen aparentemente los mismos esfuerzos.



**Figura 3.46 Análisis de esfuerzos de Von Mises en el panel para distancia entre correas de 1000 mm**

Fuente: Elaboración propia

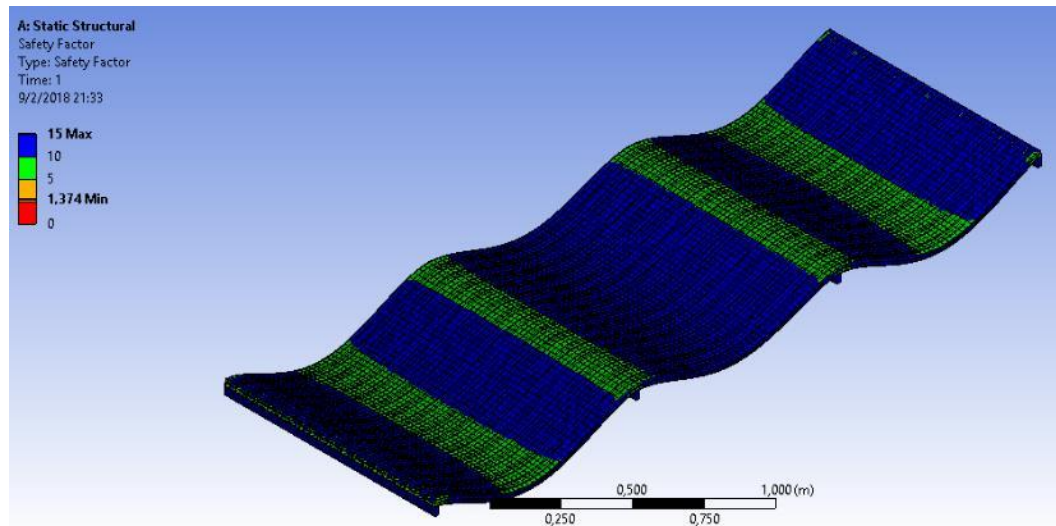
Respecto a las deformaciones, las máximas serán de 6.2 mm en los tramos de cada extremo, mientras que en el tramo del medio están entre 3 y 4 mm. Para la configuración mostrada, los valores de deformación máximos están en el rango de 5.5 y 8.8 mm. Por lo tanto, la deformación máxima está en el límite admisible, a diferencia de las dos configuraciones anteriores.



**Figura 3.47 Análisis de deformación total en el panel para distancias entre correas de 1000 mm**

Fuente: Elaboración propia

A diferencia de las configuraciones anteriores, el factor de seguridad desciende notablemente en el área de las correas y en el centro de los dos tramos extremos, tomando valores de entre 5 y 10, que no es un valor bajo, pero se desea mayor confiabilidad.



**Figura 3.48 Factor de seguridad en el panel para distancia entre correas de 1000 mm**

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3 Análisis de resultados

El análisis mostrado para tres distintas configuraciones de las distancias entre correas se realizó con el fin de encontrar la distancia óptima y recomendada. En cuanto a los resultados obtenidos en la simulación de 600 a 800 mm se tienen esfuerzos y deformaciones bajas que están incluso por debajo del rango máximo admisible con un factor de seguridad uniforme, sin embargo, para la distancia de 800 mm se tiene deformaciones pequeñas en los extremos ya que se tiene el panel en voladizo, por esta razón no se recomendaría tener extremos libres. En la última configuración ya se tienen esfuerzos más altos al tener una mayor distancia entre cada apoyo y por ende mayores deformaciones que alcanzan el nivel máximo permisible. Como ya se vio en la sección 2.6.5, el factor de seguridad mínimo recomendado para la simulación en ANSYS es de 4, y todas las configuraciones cumplen con esta condición, sin embargo, la última tiene factor de seguridad entre 5 y 10 en buena parte de la sección, que, si se compara con las anteriores, claramente estaría en desventaja. Finalmente, con base en todo lo anteriormente expuesto se puede decir que la distancia óptima entre correas es 600 mm.

Respecto al método analítico, se presenta a continuación una tabla comparativa entre los valores de deflexión y esfuerzo máximo en secciones intermedias de cada tramo para las distintas configuraciones tanto analíticos como los resultados obtenidos en ANSYS. Donde  $\sigma_c$  es el máximo esfuerzo que soportarán las correas y  $\sigma_{Me}$  el máximo esfuerzo en las secciones entre apoyos.

**Tabla 3.22 Comparación entre resultados obtenidos por distintos métodos**

L (mm)	ANSYS			Analítico		
	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma_{Me}$ (kPa)	$\delta$ (mm)	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma_{Me}$ (kPa)	$\delta$ (mm)
<b>600</b>	400-700	200-400	0.85	438.27	324.04	0.71
<b>700</b>	900-1200	700-900	1.98	590.64	408.64	1.20
<b>800</b>	1170-1370	700-900	2.46	636.14	347.75	1.10
<b>900</b>	1300-1600	1000-1300	5.38	910.76	683.07	3.40
<b>1000</b>	1700	800-1200	6.18	1151.66	925.29	5.70

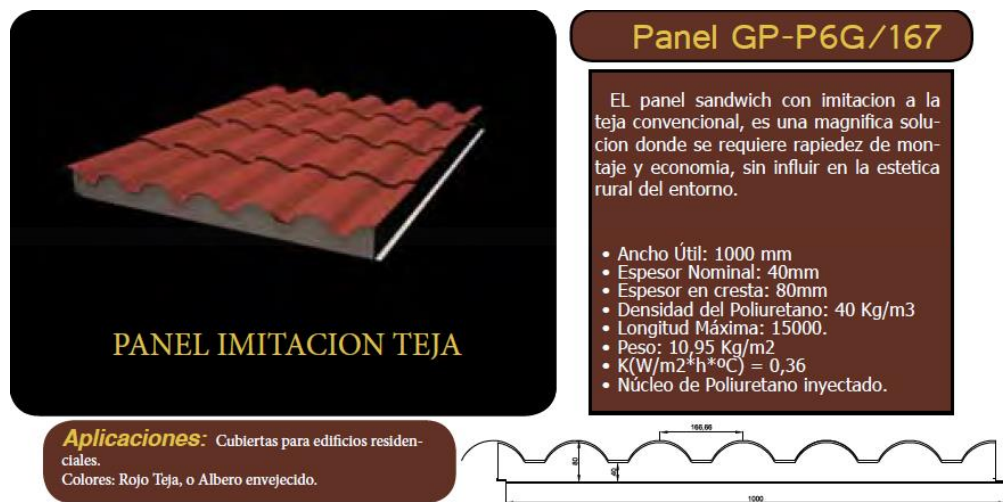


Como se puede ver en la tabla 3.17 el modelo se aproxima más para las configuraciones exactas, es decir, 600 y 1000, para las otras configuraciones se introducen muchos errores a excepción de la deflexión en 700 mm, esto se debe a que no se considera los efectos de esfuerzos en otras direcciones y cortantes. Sin embargo, de esta información se puede deducir que la flexión es un esfuerzo bastante representativo para considerar en esta aplicación.

### **Aplicación**

Aparte de tener excelentes propiedades mecánicas, la competencia directa del panel sería la actual tendencia de los paneles sándwiches, paneles conformados de placas metálicas que simulan tejas y entre ellas una capa de poliuretano, con el objetivo de mejorar el aislamiento y apuntar a un sector de menor rango social que el mercado de las cubiertas de policarbonato, pero ciertamente más amplio. Estos paneles se ofrecen como una mejora de las planchas convencionales de zinc, sin embargo, son más gruesas, espesores que van desde 35 mm y notablemente más pesados, ya que para un panel de ese tipo, con dimensiones similares al panel del proyecto presente, con un ancho de 1000 mm y una profundidad de 3000 mm con espesores de 40 a 80 mm debido a su forma de teja, tiene un peso de 10.95 kg/m<sup>2</sup> mientras que el panel aquí diseñado tiene un peso de 7.36 kg/m<sup>2</sup>, más liviano, lo que le vuelve más fácil de transportar y ergonómicamente aceptable. En cuanto al aislamiento, este panel no requiere materiales externos para garantizar una vivienda climatizada, ya que las nervaduras que posee a más de mejorar la rigidez también se encargan de que el aire interno actúe como aislante sin considerar las propiedades aislantes del plástico.

A continuación, se muestran las consideraciones técnicas principales del panel sándwich y el panel del presente proyecto.



**Figura 3.49 Panel sándwich**

Fuente: (GrupoPanel, 2017)

**Tabla 3.23 Comparación entre panel sándwich y panel de rPET/rHDPE**

Parámetro	Unidad	Panel Sándwich	Panel de rPET/rHDPE
Espesor	mm	40-80	26
Ancho	mm	1000	1042
Longitud	mm	15000	3000
Peso	Kg/m <sup>2</sup>	10.95	7.36

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Análisis de costos

Para poder definir la cantidad de materiales que se requiere para producir cierta cantidad de paneles, se debe tomar en cuenta en primera instancia la capacidad de producción de la máquina. Se escogió una extrusora de un solo tornillo marca Nanjing Kerke con una capacidad de 80 kg/h, sabiendo que se requieren 24 kg para la fabricación de un solo panel, se estima que la producción será de 3 paneles por hora, asumiendo que se trabaje 18 horas diarias, se cuenta con un total de 60 paneles por día y 1440 paneles mensuales. Se sabe además que para un panel de 24 kg se requiere que en su composición sea un 95% matriz, i.e, 70% rPET y 30% rHDPE, mientras que el otro 5% lo compone el compatibilizador, por ende, el factor

de peso para cada material será 66.5% y 28.5% de la masa total para rPET y rHDPE respectivamente.

**Tabla 3.24 Desglose de cantidad de materia prima para producción mensual**

Número de paneles mensuales	Masa total de paneles mensuales (kg)	Desglose de material (kg)		
		rPET	rHDPE	EGMA
1440	34560	22982.4	9849.6	1728

Fuente: Elaboración propia

El primer factor de evaluación de costos asociados a este proyecto es el costo de materia prima, esto incluye el valor por tonelada de rPET y rHDPE postindustrial, así como el valor por cada 10 kg de compatibilizador EGMA.

**Tabla 3.25 Costo de materia prima para producción mensual**

Suministros de materia prima	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Compatibilizador EGMA-LOTADER 8840	kg	173	\$ 30,53	\$ 5.281,69
PET postindustrial	kg	24	\$ 200,00	\$ 4.800,00
HDPE postindustrial	kg	10	\$ 200,00	\$ 2.000,00
				<b>\$ 12.081,69</b>

Fuente: Elaboración propia

El siguiente factor por analizar es el factor de servicios, el cual incluye los costos de instalación de luminarias y equipos, así como el servicio de mantenimiento a estos últimos.

**Tabla 3.26 Costo de servicios de mantenimiento e instalación**

<b>Servicios</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Mantenimiento</b>	U	1	\$ 1.400,00	\$ 1.400,00
<b>Instalación de equipos</b>	U	1	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
<b>Instalación de luminarias</b>	U	10	\$ 20,00	\$ 200,00
				<b>\$ 2.600,00</b>

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallará el costo referente a los equipos, en este caso, la extrusora de un husillo, la cortadora industrial y el chiller enfriado por agua.

**Tabla 3.27 Costo de equipos**

<b>Equipos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Chiller YCWL0084SE</b>	U	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
<b>Extrusora de tornillo simple</b>	U	1	\$ 20.000,00	\$ 20.000,00
<b>CNC Industrial Corte</b>	U	1	\$ 18.000,00	\$ 18.000,00
				<b>\$ 58.000,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Como cuarto factor a considerar en el análisis de costos se encuentra la mano de obra directa, que incluye una salida mensual de dos operadores.

**Tabla 3.28 Costo por mano de obra directa**

<b>Mano de obra directa</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo Unitario</b>	<b>Costo Total</b>
<b>Operador mecánico de extrusora</b>	U	2	\$ 386,00	\$ 772,00
				<b>\$ 772,00</b>

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de costo respecto al consumo eléctrico mensual, se debe tener en cuenta algunas consideraciones:

- Número de equipos eléctricos y la potencia que consumen por hora
- Cantidad de horas al día que operarán estos equipos

- El valor monetario de la demanda y la energía. El primero depende de un factor FC que se considera en función de la demanda pico y la demanda máxima, la demanda máxima será la suma del consumo por hora de cada equipo mientras que la demanda pico se entiende por los equipos que están operativos en el rango horario comprendido entre las 18h00 y 22h00 donde aumenta considerablemente el precio de la energía eléctrica por kWh, para este caso, se considera que en ese rango solo la luminaria estará encendida, lo que corresponde a 0.7 kW según la tabla 3.29.

**Tabla 3.29 Consumo total de equipos por hora**

Equipo	Consumo (kW)
Chiller	53.3
Extrusora	22
Cortadora	11
Iluminación	0.7
	87

Fuente: Elaboración propia

$$FC = \frac{DP}{DM} \quad ec. 56$$

Donde DP es demanda pico y DM demanda máxima, por ende, se tiene que el factor FC es el siguiente:

$$FC = \frac{0.7}{87} = 0.008$$

$$FCI = 0.5$$

El factor FCI depende del factor FC, siempre que este último sea menor a 0.6 el factor FCI es 0.5.

Ahora bien, según el tarifario de CNEL, se tiene que para el sector industrial el valor por kW está en \$4.003. Mientras que el valor por kWh está en \$0.085.

$$\$Demanda = 4.003 * FC * DM \quad ec. 57$$

$$\$Energía = consumo * 0.085 \quad ec. 58$$

**Tabla 3.30 Costo de consumo energético**

Descripción del equipo	No. De equipos	Potencia	Horas	Consumo	Demanda	Energía	
Chiller YCWL0084SE	1	53.3	18	959.4	\$ 106,68	\$ 81,55	
Extrusora de tornillo simple	1	22	18	396	\$ 44,03	\$ 33,66	
Iluminación	1	0.7	18	12.6	\$ 1,40	\$ 1,07	
Cortadora industrial	1	11	18	198	\$ 22,02	\$ 16,83	
<b>TOTAL</b>		87		1566	\$ 174,13	\$ 133,11	
						<b>Total a pagar</b>	<b>\$ 307,24</b>

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presentan los costos de suministros de seguridad:

**Tabla 3.31 Costos de suministros de seguridad**

Suministros de seguridad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Respiradores de media cara 3M serie 7500	U	2	\$ 30,67	\$ 61,34
Cartucho Fomaldehído/Vapor Orgánico 3M 6005	U	2	\$ 14,00	\$ 28,00
Orejas H540A DIADEMA 3M	U	2	\$ 33,22	\$ 66,44
Taponos reusables Classic Plus Probed Test Plug	U	2	\$ 0,50	\$ 1,00
Respirador 8210 3M desechables	U	2	\$ 0,30	\$ 0,60
Lentes Protectores Maxim de 3M	U	2	\$ 5,44	\$ 10,88
Casco contratista blanco 3M	U	2	\$ 8,81	\$ 17,62
Botas de seguridad cuero negro planta antidesliz	U	2	\$ 34,50	\$ 69,00
Traje de protección 3M 4540	U	2	\$ 11,04	\$ 22,08
Guantes para soldador	U	2	\$ 6,09	\$ 12,18
				<b>\$ 289,14</b>

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 3.32 se muestra la suma total del presupuesto requerido para el primer mes de este proyecto, abarca las inversiones iniciales y el costo de la producción del primer mes:

**Tabla 3.32 Presupuesto total**

Descripción	Total
Materia prima	\$ 12.081,69
Servicios de mantenimiento e instalación	\$ 2.600,00
Equipos	\$ 58.000,00
Mano de obra directa	\$ 772,00
Consumo energético	\$ 307,24
Suministros de seguridad	\$ 289,14

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presenta el cálculo para obtener el precio de venta del panel, para una ganancia del 100% en las utilidades.

**Tabla 3.33 Desglose de costo de producción mensual**

Motivo	Costo
Suministros de seguridad	\$ 289,14
Suministros de materia prima	\$ 12.081,69
Mano de obra directa	\$ 772,00
Consumo eléctrico	\$ 307,24
<b>Costo de producción mensual</b>	<b>\$ 13.450,07</b>

Fuente: Elaboración propia

$$Utilidad = Ingresos - Costos \quad ec. 59$$

Se requiere que utilidad 100%Costos:

$$Costos = Ingresos - Costos$$

$$Ingresos = 2 * Costos \quad ec. 60$$

Además, se tiene que:

$$Ingresos = P * Q \quad ec. 61$$

Donde P es el precio de venta y Q la cantidad de unidades producidas que es igual a 1440.

$$P = \frac{2 * Costos}{Q} \quad ec. 62$$

Reemplazando los valores respectivos, se obtuvo que el precio mínimo de venta para ganar el doble por cada panel producido es de \$18,68. Sin embargo, se optó por fijar el precio de cada panel en \$25.

\



# CAPÍTULO 4

## 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

A continuación, en esta sección se presentan y explican brevemente los principales resultados obtenidos, las fortalezas científicas, las limitaciones del diseño y se recomiendan mejoras que abarquen de manera más exhaustiva las áreas ingenieriles estudiadas en este trabajo.

### 4.1 Conclusiones

La inclusión de organoarcilla Cloisite 20A en la mezcla rPET/rHDPE mejora la estabilidad térmica del material en base a los resultados obtenidos por el TGA. La razón del incremento de las temperaturas de descomposición de la matriz de rPET en la presencia de organoarcilla al 5% y 50% de pérdida de masa, se atribuye a la excelente dispersión y la fuerte interacción interfacial ya que la organoarcilla es muy conocida por su excelente estabilidad térmica que ofrece un efecto retardante en la degradación térmica de componentes orgánicos en los compuestos.

Adicional a esto, los picos de temperatura en la máxima rapidez de degradación observados en los termogramas de la primera derivada del peso (%) vs temperatura (°C) para las mezclas con 100%rPET y 100%rHDPE exhiben temperaturas más altas de descomposición al incluir la arcilla C20A en una matriz de rHDPE. Esto comprueba la afinidad de la arcilla con el rHDPE. Sin embargo, el compatibilizador no ofrece mejoras en la estabilidad térmica del material.

Por otra parte, la adición de organoarcilla afecta la cristalización del rPET. Los resultados mostrados en los termogramas DSC muestran que la organoarcilla no afecta al tamaño de los cristales, al contrario, muestra un efecto nucleante elevando la temperatura de cristalización y la cristalinidad relativa del material. La adición de EGMA en un pequeño porcentaje (<5%) en mezclas de rPET/rHDPE es un método efectivo para mejorar la morfología y propiedades mecánicas del sistema. A su vez, Las características morfológicas de las mezclas compatibilizadas se encuentran principalmente afectadas por el tipo de poliolefina empleada y su concentración, además del procedimiento de mezclado empleado.

Una ligera depresión de la temperatura de cristalización de rPET y grado de cristalinidad se encontraron con la adición de E-GMA. Esto se debe al efecto de la miscibilidad de las poliolefinas funcionalizadas con la fase de rHDPE y de reacciones químicas de grupos funcionales.

De los difractogramas obtenidos, se puede observar que la organoarcilla C20A, a pesar de su alta afinidad con el rHDPE muestra una eficiente intercalación en el rPET. Además, para las mezclas 3 y 4 correspondientes a 70rPET/30rHDPE/3C20A y 70rHDPE/30rHDPE/3c20a/5EGMA respectivamente, no existió una completa exfoliación de la organoarcilla en las mezclas, pero sí su intercalación. Estos resultados hacen comprender que la intercalación de las cadenas de rPET y rHDPE aumenta el espaciamiento interplanar de la organoarcilla empleada, desplazando de esta manera el pico de intensidad hacia ángulos más bajos.

En cuanto al procesamiento de las mezclas a través de moldeo por inyección, la inclusión de un back pressure no tuvo efectos positivos en propiedades mecánicas de mezclas que incluían arcilla, al contrario, disminuía su capacidad de elongación y resistencia. Por otra parte, en la mezcla 4 que contenía compatibilizador, se observó un incremento notable en las propiedades mecánicas tanto es su rigidez y el esfuerzo último que soporta el material. Lo cual confirma la mejora en dispersión y adhesión del rPET con el rHDPE al incluir EGMA en la mezcla.

El panel seleccionado es la alternativa 3 por tener el valor más bajo de número de Biot, el cual determina qué tan factible es la manufactura del producto debido a su menor propensión a deformaciones en las dimensiones del panel, así como un valor de inercia aceptable que le proporciona una rigidez propicia para la aplicación.

Se seleccionó la composición 70rPET/30rHDPE/5EGMA debido a su alto módulo de Young y resistencia última (1.07 GPa y 21.8 MPa respectivamente) así como un porcentaje de elongación bastante aceptable (2.33%) en definitiva, fue la composición que mejores propiedades mecánicas en conjunto presentó durante los ensayos de tracción, ajustándose así a las especificaciones de diseño presentadas en el capítulo 2.

Los esfuerzos predominantes en el diseño realizado son de flexión, por esta razón los valores de deflexión están relativamente cercanos a los resultados obtenidos en la simulación de ANSYS, sin embargo, se debe aclarar que ANSYS presenta esfuerzo de Von Mises, el cual considera esfuerzos en otras direcciones por tratarse de un análisis en dos dimensiones y esfuerzo cortante. De aquí se concluye, que estos esfuerzos por separado son más pequeños si se compara con el esfuerzo de flexión.

La arcilla C20A le da rigidez al material, ya que se obtuvo los mayores módulos elásticos para estas mezclas, sin embargo, satura la estructura y no permite que se reacomoden las moléculas al ejercer esfuerzos de tensión, lo que le vuelve frágil con una baja resistencia y capacidad de deformarse.

El análisis de deformación para esta aplicación es ligeramente más importante que el de esfuerzos, ya que estética y estructuralmente se requiere no exceder un cierto rango de deformación establecido por el IBC y así mantener un estándar de calidad a ofrecer al cliente.

#### **4.2 Recomendaciones**

Para obtener mejores resultados de caracterización de materiales, se sugiere secar los plásticos reciclados en pequeñas proporciones para ofrecer más uniformidad en la transferencia de calor y de esta manera eliminar la mayor cantidad de humedad posible. Es importante recordar que el rPET al ser un polímero polar, es hidrofílico, por lo tanto, será el plástico que retendrá más agua. Al no estar adecuadamente seco, podría causar problemas en el procesamiento de extrusión dificultando la dispersión del material en la mezcla creando a su vez discontinuidades. Esto dará mejoras en la elaboración de nanocompuestos con mezclas de rPET/rHDPE.

Además, es primordial disponer el compatibilizador y la organoarcilla en condiciones secas donde se encuentren alejados de ambientes húmedos. Condiciones de almacenamiento inapropiadas causan degradación lo cual traería consecuencias en las propiedades físicas de los productos.

Por otro lado, realizar pruebas de índice de fluidez como método inicial previo al procesamiento de mezclas de plásticos reciclados sería idóneo para verificar si las materias primas empleadas, en este caso rPET y rHDPE, son adecuadas para

ser extruidas o inyectadas. Lo indicado evitará problemas de adhesión al molde o degradación del material durante el proceso de mezclado.

Se recomienda realizar pruebas reológicas tanto al rPET como al rHDPE con el fin de obtener el punto de intersección de ambas viscosidades, con éste se puede encontrar el shear rate óptimo y por ende, la velocidad del tornillo óptima lo cual mejorará notablemente el proceso de mezclado durante la extrusión y con ello las propiedades y morfología del material.

También se sugiere realizar análisis termogravimétrico y difracción por rayos X tanto a las mezclas extruidas como a las inyectadas para de esta manera conocer si la estabilidad térmica e intercalación de la organoarcilla en las mezclas se encontrarán afectadas en el procesamiento de una sola etapa (extrusión) o dos etapas (extrusión e inyección) y así poder elegir la forma de mezclado adecuado para una óptima caracterización del material.

Resultaría conveniente analizar la morfología de cada mezcla a través de las probetas inyectadas, ya que se observaría con mayor nitidez la dispersión del material, así como la intercalación de la arcilla en la matriz de rPET mediante SEM.

En cuanto a procesamiento, se aconseja emplear como materias primas en la elaboración de mezclas con propósitos estructurales, plásticos reciclados de tipo postindustrial en lugar de aquellos que son de post-consumo. Por lo general, los desechos plásticos post-consumo vienen con suciedad, cauchos, productos químicos, malos olores, y la existencia de muchas variables en un nanocompuesto complican el procesamiento afectando principalmente a las propiedades mecánicas del material. Para eliminar las impurezas se necesitaría un sistema tecnológico altamente eficiente para el lavado de plásticos triturados muy contaminados.

Para una mayor seguridad se sugiere usar equipos de protección personal durante todo el proceso de mezclado de materiales reciclados. Se debe recordar que los plásticos son tóxicos cuando se someten a procesos con altas temperaturas debido a que desprenden dioxinas, componentes orgánicos volátiles y material particulado que afectan gravemente al sistema respiratorio.

Así mismo, se recomienda realizar ensayos de impacto con el método Charpy a cada una de las mezclas y así poder conocer la cantidad de energía absorbida por el material durante la fractura. El resultado obtenido será de gran relevancia para las especificaciones técnicas del material del cual estaría elaborado el panel para techo.

Teniendo en cuenta el control de calidad de los paneles, se sugiere también realizar pruebas de durabilidad al material exponiéndolo a radiación UV y pruebas de Creep, así como su conductividad térmica. De esta forma, se podría definir la vida útil del panel para techo propuesto.

Se recomienda en un trabajo futuro analizar los esfuerzos y deformaciones del panel empleando Mecánica de Sólidos Avanzada, ya que el modelo de viga es solo una aproximación considerando que se tiene un ancho de 1.04 m, para anchos mayores o resultados más reales, se requeriría utilizar las ecuaciones de esfuerzo y deformación para planchas sometidas a presión.

Finalmente, se recomienda analizar el efecto de los pernos en los paneles.

# BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2003). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States.
- BBC. (2015). *BBC*. Obtenido de [www.bbc.co.uk](http://www.bbc.co.uk)
- Castillejo, D. (Abril de 5 de 2016). Puentes de Plástico.
- Chanda, M. (1987). *Plastics Technology Handbook*. Manas Chanda, Roy Salil K.
- Cross, N. (1999). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley.
- Dole, M., & Wunderlich, B. (1957). Specific heat of synthetic high polymers. VIII. Low pressure polyethylene. *Polymer Science*.
- Faruk, O., & Matuana, L. (2008). Nanoclay reinforced HDPE as a matrix for wood-plastic composites. *Composites Science and Technology*, 5.
- Ferdinand L. Singer, A. P. (2008). *Resistencia de Materiales*. Alfaomega.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes and Systems*. McGraw-Hill.
- GrupoPanel. (2017). Catálogo de Productos. *Panel Sándwich Poliuretano*.
- IBC. (2009). *Structural Design*. United States of America.
- Iniciarte, H., & Oliva, H. (2014). Nanocompuestos basados en arcilla y mezclas heterogéneas de termoplásticos. *Revista Tecnocientífica URU*, 12.
- Jahangiri, M., Hassan Jafari, S., Ali Khonakdar, H., Tarameshlou, M., & Fotovat Ahmadi, I. (2015). Preparation of PET/Clay Nanocomposites via In Situ Polymerization in the Presence of Monomer-Activated Organoclay. 9.
- Lozada, L. A. (octubre de 2011). Experiencia significativa en el uso productivo de Biomasa. Colombia.
- Mayer, R. M. (1993). *Design with reinforced plastics a guide for engineers and designers*. London: The Design Council.
- Mittal, V. (2012). *In situ Synthesis of Polymer Nanocomposites*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co.
- Norton, R. L. (2014). *Machine Design*. New Jersey: Pearson.

- Pracella, M., Rolla, L., Chionna, D., & Galeski, A. (2002). Compatibilization and Properties of Poly(ethyleneterephthalate)/Polyethylene Blends Based on Recycled Materials. *Macromolecular Chemistry and Physics*.
- S. Chandrasekhar, K. G. (2003). Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk. *Journal of Materials Science*, 3159-3168.
- Timm Oswald, E. G. (2008). *Procesado de Polímeros. Fundamentos*. Cúcuta: Editorial Guaduales.
- Torres, K. (2016). *El Telégrafo*. Obtenido de <http://www.letelegrafo.com.ec/noticias/economia/8/industria-exporta-10-000-toneladas-de-plastico-pet>
- Vidotti, S., Chinellato, A., Boesel, L., & Pessan, L. (2004). Poly (ethylene terephthalate)-organoclay nanocomposites: Morphological, Thermal and Barrier Properties. *Metastable and Nanocrystalline Materials*, 9.

# APÉNDICES



**APÉNDICE A**  
**PLANOS ESQUEMÁTICOS**

D

C

B

A

D

C

B

A

1

2

3

4

1

2

3

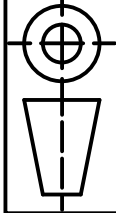
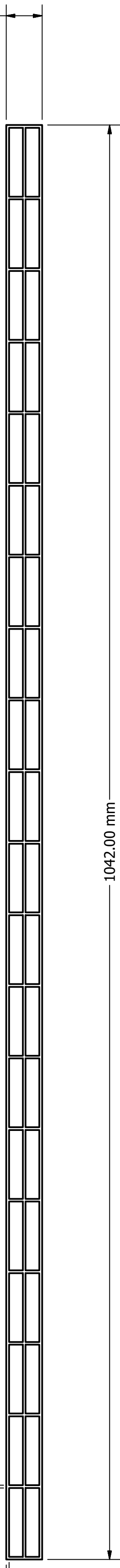
4

26.00 mm

1042.00 mm

2.00 mm

2.03 mm



Escala:  
1/2.5



Proyecto:   
Dibujado por: Camila Yerovi/Julia Herrera   
Aprobado por: Andrés Rigall, PHD.

Materia Integradora   
Camila Yerovi/Julia Herrera

Fecha   
08/02/18

**E S P O L**

No. **1**

Panel para techo: Alternativa 4 (Seleccionada) Vista Frontal

D

C

B

A

D

C

B

A

1

2

3

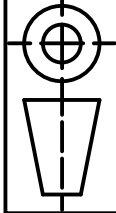
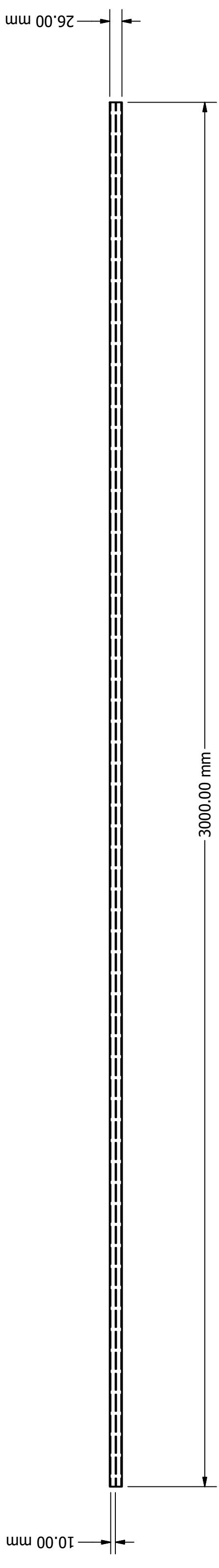
4

1

2

3

4



Escala:  
1/8

Dibujado por:  
Aprobado por:

Nombre  
Fecha

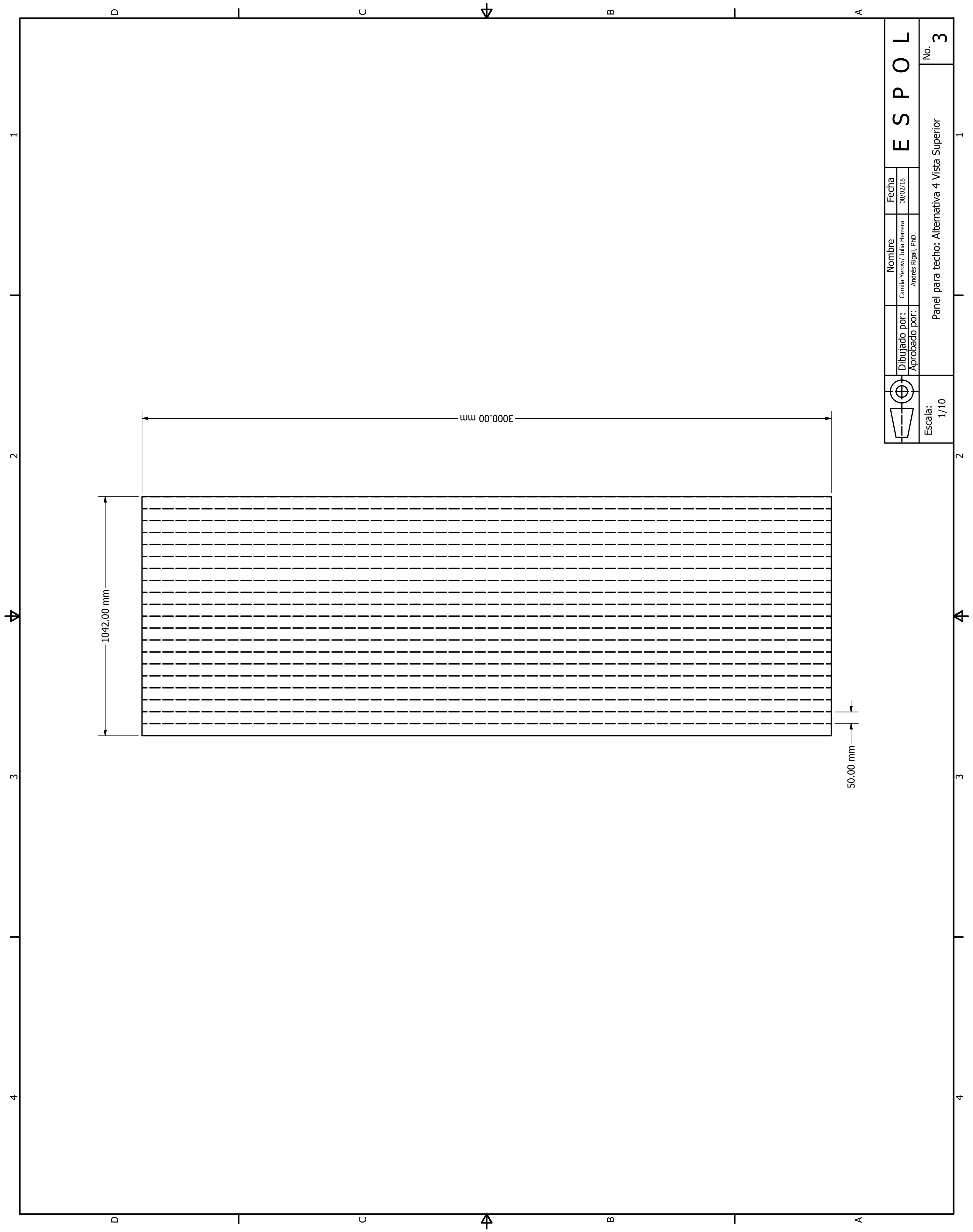
E S P O L

No. 2

Panel para techo: Alternativa 4 Vista Lateral Derecha

Camila Yerovi/ Julia Herrera  
Andrés Rigall, PhD.

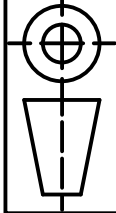
08/02/18



1042.00 mm

3000.00 mm

50.00 mm



Escala:  
1/10

Dibujado por:	Nombre	Fecha
Aprobado por:	Camila Yerovi/ Julia Herrera Andrés Rigall, PhD.	08/02/18

**E S P O L**

Panel para techo: Alternativa 4 Vista Superior

No. 3

D

C

B

A

D

C

B

A

1

2

3

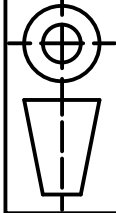
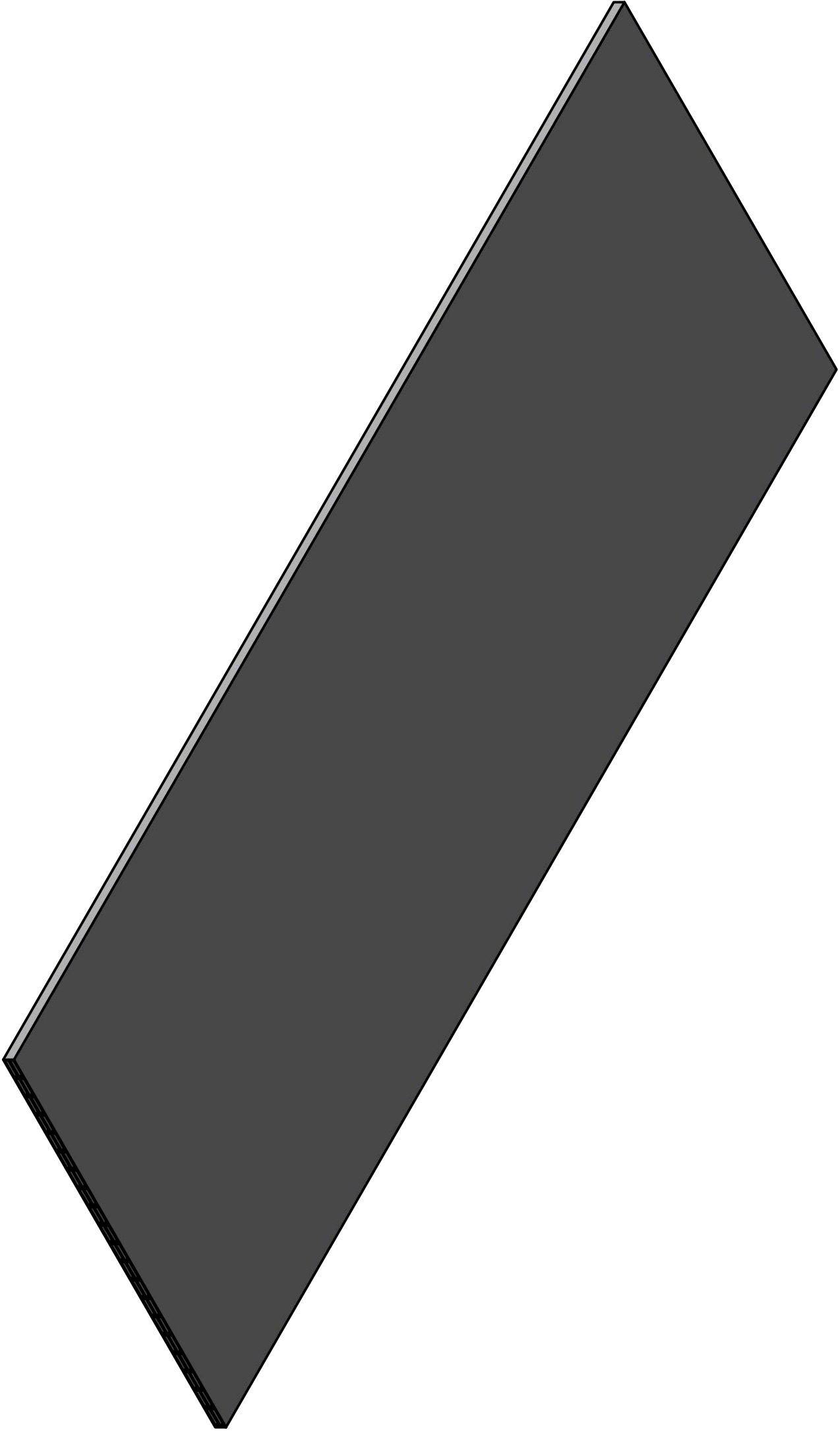
4

1

2

3

4



Escala:  
1/10

Dibujado por:  
Aprobado por:

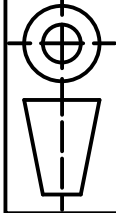
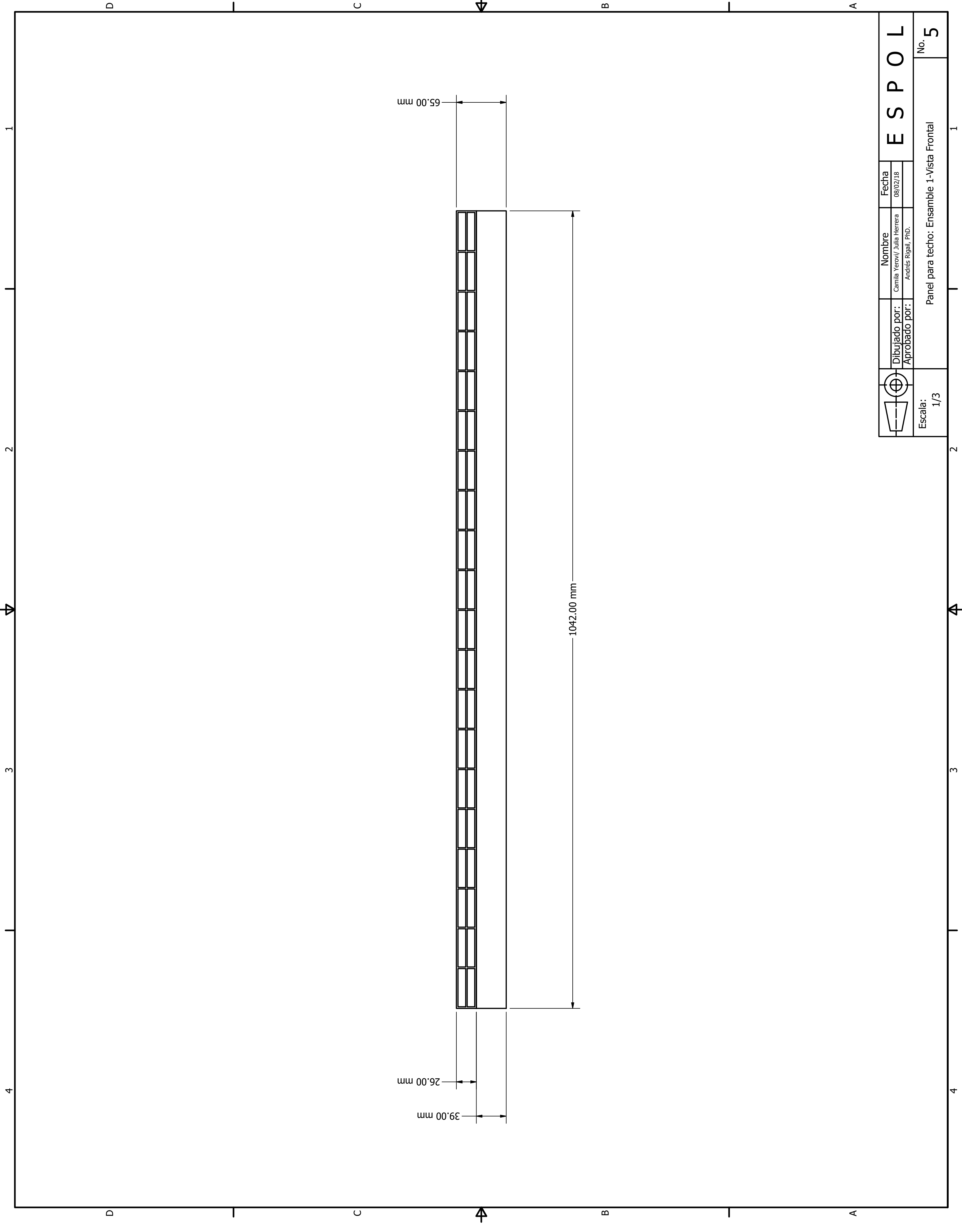
Nombre  
Camila Yerovi/ Julia Herrera  
Andrés Rigall, PhD.

Fecha  
08/02/18

**E S P O L**

No. **4**

Panel para techo: Alternativa 4-Vista Isométrica



Escala:  
1/3

Dibujado por:  
Aprobado por:

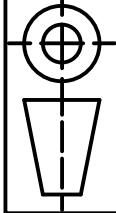
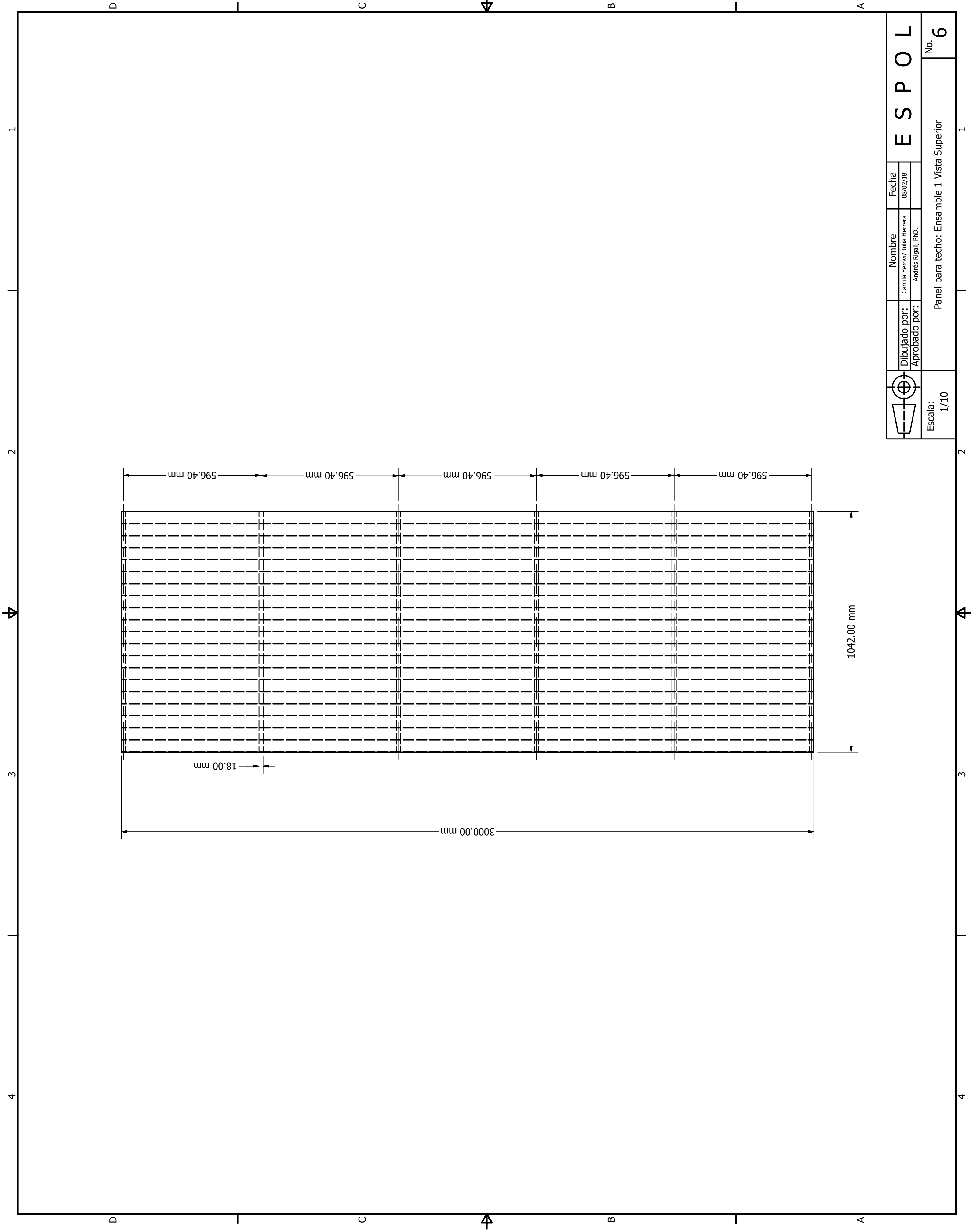
Nombre  
Camila Yerovi/ Julia Herrera  
Andrés Rigall, PhD.

Fecha  
08/02/18

**E S P O L**

No. 5

Panel para techo: Ensamble 1-Vista Frontal



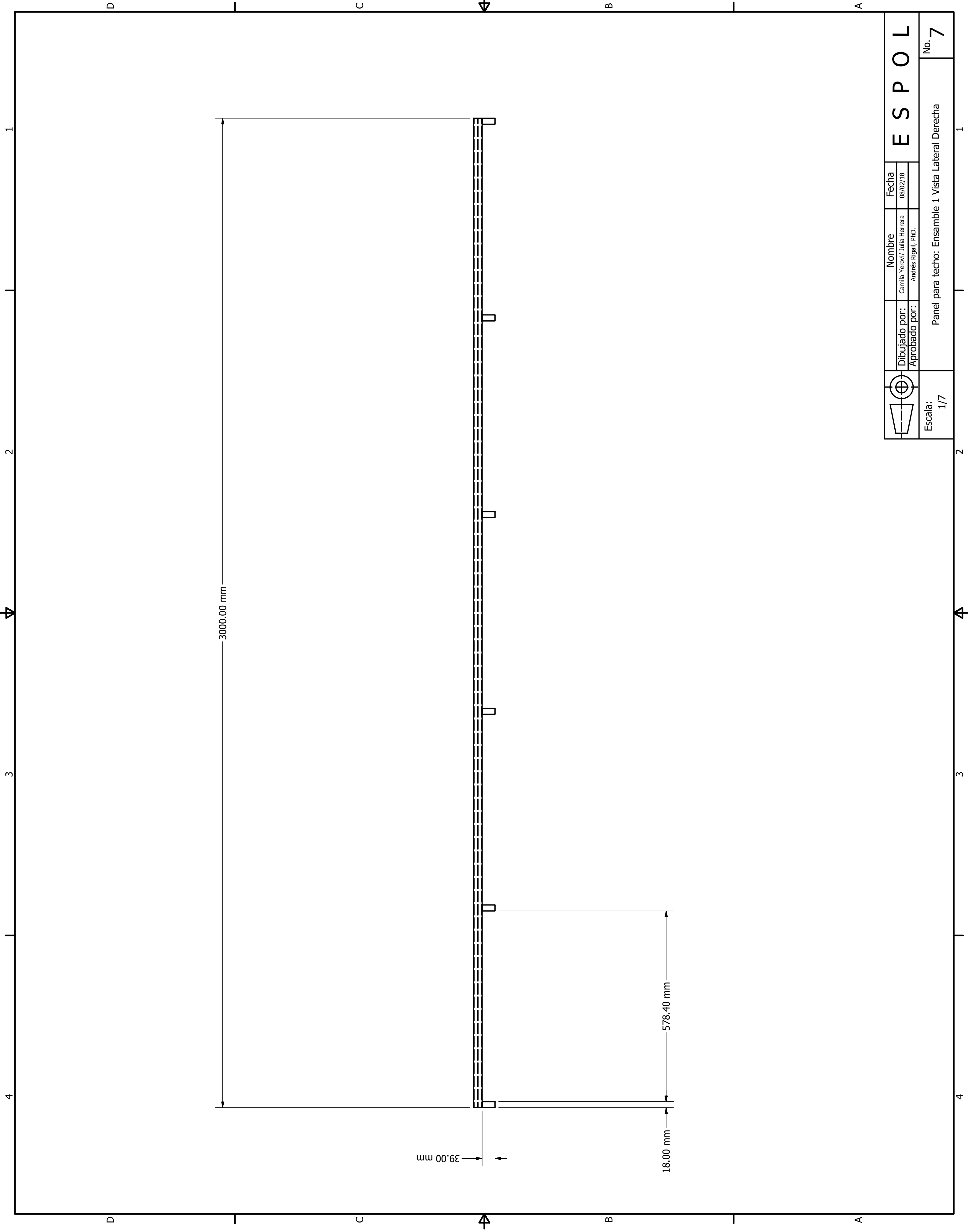
Escala:  
1/10

Dibujado por:	Nombre	Fecha
Aprobado por:	Camila Yerovi/ Julia Herrera Andrés Rigall, PhD.	08/02/18

**E S P O L**

No. **6**

Panel para techo: Ensamble 1 Vista Superior



	Escala: 1/7		Panel para techo: Ensamble 1 Vista Lateral Derecha		No. 7
	Dibujado por: Camila Yerovi/ Julia Herrera	Nombre Camila Yerovi/ Julia Herrera	Fecha 08/02/18	E S P O L	
	Aprobado por: Andrés Rigall, PhD.				



D

C

B

A

A

D

C

B

A

A

1

2

3

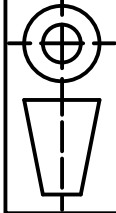
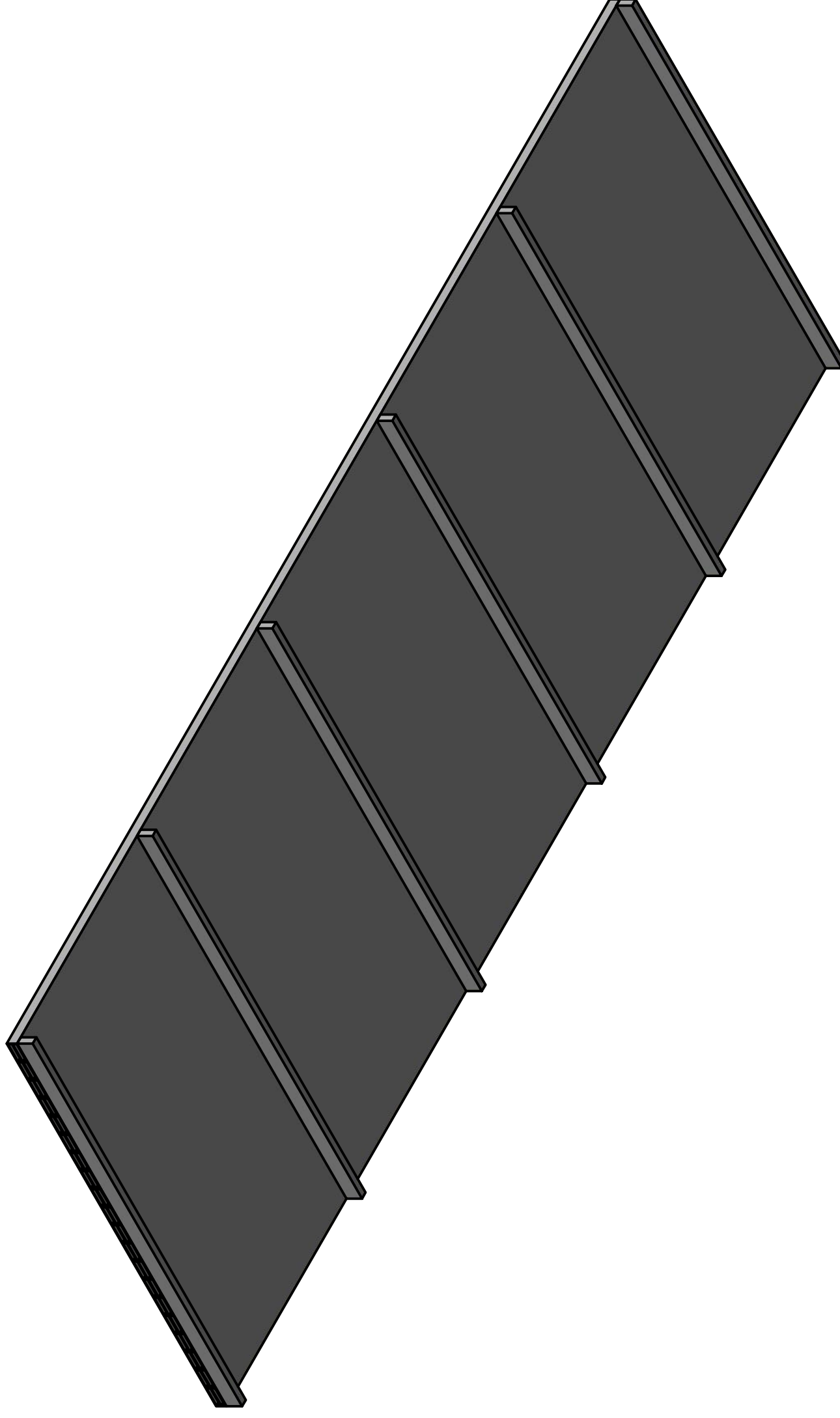
4

1

2

3

4



Escala:  
1/10

Dibujado por:	Nombre	Fecha
Aprobado por:	Camila Yerovi/ Julia Herrera Andrés Rigall, PhD.	08/02/18

**E S P O L**

No. 8

Panel para techo: Ensamble 1 Vista Isométrica

**APÉNDICE B**  
**CÓDIGO MATLAB CON SUS RESPECTIVOS RESULTADOS**

## Código para distancia entre correas 600, 700, 800, 900 y 1000 mm

```
L2=input('Ingrese la distancia entre apoyo: ');
w=input('Ingrese la carga: ');
E=1.07e9;
I=1.36e-6;
L2=L2/1000;
%Valores múltiplos de 3000
if mod(3,L2)==0
    n=3/L2;
    M=zeros(n+1,1);
    R=zeros(n+1,1);
    dm=L2*ones(n-1,1);
    d0=4*L2*ones(n-1,1);
    A=spdiags([dm d0 dm],[1 0 -1],n-1,n-1);
    B=-w*L2^3/2*ones(n-1,1);
    M(2:n)=inv(A)*B;
    R(1)=(M(2)+(w*L2^2)/2)/L2;
    for i=2:n
        for j=1:i-1
            R(i)=R(i)-(R(j)*(i+1-j)*L2)/L2;
        end
        R(i)=R(i)+(M(i+1)+w*(i*L2)^2/2)/L2;
    end
    R(n+1)=w*3-sum(R(1:n));
    y=zeros(100*n+1,1);
    Me=zeros(100*n+1,1);
    x=[0];
    for i=1:n
        p=L2/100;
        for j=1:100
            r=x(length(x));
            x=[x r+p];
        end
    end
    for i=1:n
        Me(100*i+1)=M(i+1);
    end
    for i=1:n
        for j=1:99
            for k=1:i
                Me(100*(i-1)+j+1)=Me(100*(i-1)+j+1)+R(k)*(x(100*(i-1)+j+1)-
x(100*(k-1)+1));
            end
            Me(100*(i-1)+j+1)=Me(100*(i-1)+j+1)-(w*x(100*(i-1)+j+1)^2)/2;
        end
    end
    for i=1:n
        if i~=n
            for j=1:99
                l1=x(100*i+1)-x(j+100*(i-1)+1);
                l2=x(100*(i+1)+1)-x(100*i+1);
                y(j+100*(i-1)+1)=(l1/(6*E*I))*(Me(j+100*(i-
1)+1)*l1+2*Me(100*i+1)*(l1+l2)+Me(100*(i+1)+1)*l2+(w*l1^3)/4+(w*l2^3)/4);
            end
        else
            for j=1:99
                l1=x(100*(i-1)+1)-x(100*(i-2)+1);
```

```

        l2=x(j+100*(i-1)+1)-x(100*(i-1)+1);
        y(j+100*(i-1)+1)=(l2/(6*E*I))*(Me(100*(i-2)+1)*l1+2*Me(100*(i-
1)+1)*(l1+l2)+Me(j+100*(i-1)+1)*l2+(w*l1^3)/4+(w*l2^3)/4);
    end
end
end
figure(1);
plot(x,Me), grid on, hold on;
xlabel('Posición');
ylabel('Momento Flector');
figure(2);
plot(x,y), grid on, hold on;
xlabel('Posición');
ylabel('Deflexión');
% Valores que no son múltiplos de 3000
else
n=fix(3/L2);
L=ones(n+2,1);
L(2:n+1)=L2;
L(1)=L2*((3/L2)-fix(3/L2))/2;
L(n+2)=L2*((3/L2)-fix(3/L2))/2;
M=zeros(n+3,1);
R=zeros(n+1,1);
y=zeros(100*(n+2)+1,1);
M(2)=-w*L(1)^2/2;
M(n+2)=-w*L(1)^2/2;
A=zeros(n+1);
for i=1:n-1
    A(i:i+2,i)=[L(i+2);2*(L(i+1)+L(i+2));L(i+2)];
end
A(1,n)=-6*E*I/L(1);
A(n+1,n+1)=-6*E*I/L(n+2);
B=zeros(n+1,1);
for i=2:n
    B(i)=-w*L2^3/2;
end
B(1)=-((w*L(1)^3)/4)-((w*L(2)^3)/4)-2*M(2)*(L(1)+L(2));
B(2)=B(2)-M(2)*L(2);
B(n)=B(n)-M(n+2)*L(n+1);
B(n+1)=-((w*L(n+1)^3)/4)-((w*L(n+2)^3)/4)-2*M(n+2)*(L(n+1)+L(n+2));
X=inv(A)*B;
M(3:n+1)=X(1:n-1);
y(1)=X(n);
y(100*(n+2)+1)=X(n+1);
R(1)=(M(3)+(w*sum(L(1:2))*sum(L(1:2)))/2)/L(2);
for i=2:n
    for j=1:i-1
        R(i)=R(i)-R(j)*sum(L(2:i+2-j))/L(i+1);
    end
    R(i)=R(i)+(M(i+2)+(w*sum(L(1:i+1))*sum(L(1:i+1)))/2)/L(i+1);
end
R(n+1)=3*w-sum(R(1:n));
x=[0];
Me=zeros(100*(n+2)+1,1);
Me(1)=M(1);
Me(100*(n+2)+1)=M(n+3);
for i=1:n+2
    p=L(i)/100;
    for j=1:100

```

```

        r=x(length(x));
        x=[x r+p];
    end
end
for i=1:n+2
    Me(100*i+1)=M(i+1);
end
for i=1:n+2
    if i==1
        for j=1:99
            Me(j+100*(i-1)+1)=- (w*x(j+100*(i-1)+1)^2)/2;
        end
    else
        for j=1:99
            for k=1:i-1
                Me(j+100*(i-1)+1)=Me(j+100*(i-1)+1)+R(k)*(x(j+100*(i-1)+1)-
x(100*k+1));
            end
            Me(j+100*(i-1)+1)=Me(j+100*(i-1)+1)-(w*x(j+100*(i-1)+1)^2)/2;
        end
    end
end
for i=1:n+2
    if i==n+1
        for j=1:99
            l1=x(100*i+1)-x(j+100*(i-1)+1);
            l2=x(100*(i+1)+1)-x(100*i+1);
            y(j+100*(i-1)+1)=(l1/(6*E*I))*(Me(j+100*(i-
1)+1)*l1+2*Me(100*i+1)*(l1+l2)+Me(100*(i+1)+1)*l2+(w*l1^3)/4+(w*l2^3)/4-
(6*E*I/12)*y(100*(i+1)+1));
        end
    else
        if i==n+2
            for j=1:99
                l1=x(100*(i-1)+1)-x(100*(i-2)+1);
                l2=x(j+100*(i-1)+1)-x(100*(i-1)+1);
                y(j+100*(i-1)+1)=(l2/(6*E*I))*(Me(100*(i-
2)+1)*l1+2*Me(100*(i-1)+1)*(l1+l2)+Me(j+100*(i-
1)+1)*l2+(w*l1^3)/4+(w*l2^3)/4);
            end
        else
            for j=1:99
                l1=x(100*i+1)-x(j+100*(i-1)+1);
                l2=x(100*(i+1)+1)-x(100*i+1);
                y(j+100*(i-1)+1)=(l1/(6*E*I))*(Me(j+100*(i-
1)+1)*l1+2*Me(100*i+1)*(l1+l2)+Me(100*(i+1)+1)*l2+(w*l1^3)/4+(w*l2^3)/4);
            end
        end
    end
end
end
figure(1);
plot(x,Me), grid on, hold on;
xlabel('Posición');
ylabel('Momento Flector');
figure(2);
plot(x,y), grid on, hold on;
xlabel('Posición');
ylabel('Deflexión');
end

```

## VALORES DE MOMENTO Y DEFLEXIÓN PARA EL CENTRO DE CADA TRAMO

**Tabla B.1 Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 600 mm**

Momento Me (Nm)					Deflexiones (m)				
1,70	-43,58	-32,23	-32,35	-43,24	-2,60E-05	6,53E-06	-2,78E-06	1,95E-06	-7,65E-06
3,35	-41,35	-30,12	-30,35	-40,67	-5,19E-05	1,20E-05	-6,36E-06	3,09E-06	-1,64E-05
4,96	-39,17	-28,05	-28,40	-38,14	-7,78E-05	1,64E-05	-1,07E-05	3,49E-06	-2,61E-05
6,53	-37,03	-26,03	-26,48	-35,66	-1,04E-04	1,99E-05	-1,57E-05	3,18E-06	-3,67E-05
8,05	-34,93	-24,04	-24,62	-33,21	-1,29E-04	2,24E-05	-2,14E-05	2,22E-06	-4,83E-05
9,53	-32,88	-22,11	-22,79	-30,82	-1,54E-04	2,41E-05	-2,76E-05	6,45E-07	-6,07E-05
10,97	-30,87	-20,21	-21,01	-28,46	-1,80E-04	2,50E-05	-3,44E-05	-1,49E-06	-7,38E-05
12,36	-28,91	-18,36	-19,28	-26,15	-2,05E-04	2,51E-05	-4,17E-05	-4,15E-06	-8,76E-05
13,71	-26,98	-16,55	-17,58	-23,89	-2,29E-04	2,45E-05	-4,95E-05	-7,28E-06	-1,02E-04
15,02	-25,10	-14,79	-15,93	-21,67	-2,53E-04	2,32E-05	-5,76E-05	-1,08E-05	-1,17E-04
16,28	-23,27	-13,07	-14,33	-19,49	-2,77E-04	2,13E-05	-6,62E-05	-1,48E-05	-1,33E-04
17,50	-21,48	-11,39	-12,77	-17,35	-3,01E-04	1,88E-05	-7,50E-05	-1,91E-05	-1,49E-04
18,67	-19,73	-9,76	-11,25	-15,26	-3,24E-04	1,58E-05	-8,42E-05	-2,38E-05	-1,65E-04
19,80	-18,02	-8,17	-9,77	-13,21	-3,46E-04	1,23E-05	-9,35E-05	-2,87E-05	-1,82E-04
20,89	-16,36	-6,62	-8,34	-11,21	-3,68E-04	8,36E-06	-	0,00010312	-3,38E-05
21,94	-14,75	-5,12	-6,95	-9,24	-3,90E-04	4,01E-06	-	0,00011287	-3,92E-05
22,94	-13,17	-3,66	-5,61	-7,33	-4,11E-04	-6,97E-07	-	0,00012274	-4,47E-05
23,89	-11,64	-2,24	-4,31	-5,45	-4,31E-04	-5,73E-06	-0,0001327	-5,04E-05	-2,53E-04
24,81	-10,16	-0,87	-3,05	-3,62	-4,51E-04	-1,11E-05	-	0,00014272	-5,62E-05
25,68	-8,71	0,46	-1,83	-1,83	-4,70E-04	-1,66E-05	-	0,00015276	-6,20E-05
26,50	-7,31	1,74	-0,66	-0,09	-4,89E-04	-2,24E-05	-	0,00016279	-6,79E-05
27,29	-5,96	2,99	0,46	1,61	-5,07E-04	-2,84E-05	-	0,00017277	-7,38E-05
28,03	-4,64	4,18	1,55	3,27	-5,24E-04	-3,45E-05	-	0,00018268	-7,97E-05
28,72	-3,37	5,34	2,59	4,88	-5,41E-04	-4,08E-05	-	0,00019249	-8,56E-05
29,37	-2,15	6,45	3,58	6,45	-5,57E-04	-4,71E-05	-	0,00020217	-9,14E-05
29,98	-0,97	7,52	4,53	7,97	-5,72E-04	-5,35E-05	-	0,00021168	-9,71E-05
30,55	0,17	8,54	5,44	9,46	-5,86E-04	-5,98E-05	-	0,00022101	-0,0001027
31,07	1,27	9,52	6,31	10,89	-6,00E-04	-6,62E-05	-	0,00023013	0,00010817
31,55	2,32	10,46	7,13	12,29	-6,13E-04	-7,26E-05	-	0,00023902	0,00011348

31,98	3,32	11,35	7,91	13,64	-6,25E-04	-7,89E-05	-	-	-4,66E-04
32,37	4,29	12,20	8,64	14,95	-6,36E-04	-8,51E-05	-	-	-4,82E-04
32,72	5,21	13,00	9,34	16,21	-6,47E-04	-9,12E-05	-	-	-4,99E-04
33,02	6,09	13,77	9,98	17,43	-6,56E-04	-9,72E-05	-	-	-5,14E-04
33,28	6,92	14,48	10,59	18,61	-6,65E-04	-	-	-	-5,29E-04
33,50	7,71	15,16	11,15	19,75	-6,73E-04	-	-	-	-5,44E-04
33,67	8,46	15,79	11,66	20,84	-6,80E-04	-	-	-	-5,59E-04
33,80	9,16	16,38	12,14	21,88	-6,87E-04	-	-	-	-5,72E-04
33,89	9,82	16,92	12,57	22,89	-6,92E-04	-	-	-	-5,86E-04
33,93	10,43	17,43	12,95	23,84	-6,97E-04	-	-	-	-5,98E-04
33,93	11,00	17,88	13,30	24,76	-7,01E-04	-	-	-	-6,10E-04
33,89	11,53	18,30	13,60	25,63	-7,04E-04	-	-	-	-6,22E-04
33,80	12,02	18,67	13,85	26,46	-7,06E-04	-	-	-	-6,33E-04
33,67	12,46	18,99	14,06	27,25	-7,08E-04	-	-	-	-6,43E-04
33,49	12,86	19,28	14,23	27,99	-7,08E-04	-	-	-	-6,52E-04
33,27	13,21	19,52	14,36	28,69	-7,08E-04	-	-	-	-6,61E-04
33,01	13,52	19,71	14,44	29,34	-7,07E-04	-	-	-	-6,69E-04
32,70	13,79	19,86	14,48	29,95	-7,05E-04	-	-	-	-6,77E-04
32,35	14,01	19,97	14,47	30,52	-7,02E-04	-	-	-	-6,83E-04
31,96	14,19	20,04	14,42	31,04	-6,99E-04	-	-	-	-6,89E-04
31,52	14,33	20,06	14,33	31,52	-6,94E-04	-	-	-	-6,94E-04
31,04	14,42	20,04	14,19	31,96	-6,89E-04	-	-	-	-6,99E-04
30,52	14,47	19,97	14,01	32,35	-6,83E-04	-	-	-	-7,02E-04
29,95	14,48	19,86	13,79	32,70	-6,77E-04	-	-	-	-7,05E-04
29,34	14,44	19,71	13,52	33,01	-6,69E-04	-	-	-	-7,07E-04
28,69	14,36	19,52	13,21	33,27	-6,61E-04	-	-	-	-7,08E-04
27,99	14,23	19,28	12,86	33,49	-6,52E-04	-	-	-	-7,08E-04
27,25	14,06	18,99	12,46	33,67	-6,43E-04	-	-	-	-7,08E-04

26,46	13,85	18,67	12,02	33,80	-6,33E-04	-	-	-0,0001421	-7,06E-04
25,63	13,60	18,30	11,53	33,89	-6,22E-04	-0,0001587	-	0,00013812	-7,04E-04
24,76	13,30	17,88	11,00	33,93	-6,10E-04	-	-	-	-7,01E-04
23,84	12,95	17,43	10,43	33,93	-5,98E-04	-	-	-	-6,97E-04
22,89	12,57	16,92	9,82	33,89	-5,86E-04	-	-	-	-6,92E-04
21,88	12,14	16,38	9,16	33,80	-5,72E-04	-	-	-	-6,87E-04
20,84	11,66	15,79	8,46	33,67	-5,59E-04	-0,0001447	-0,0002928	-	-6,80E-04
19,75	11,15	15,16	7,71	33,50	-5,44E-04	-	-	-	-6,73E-04
18,61	10,59	14,48	6,92	33,28	-5,29E-04	-	-	-	-6,65E-04
17,43	9,98	13,77	6,09	33,02	-5,14E-04	-	-	-	-6,56E-04
16,21	9,34	13,00	5,21	32,72	-4,99E-04	-	-	-	-6,47E-04
14,95	8,64	12,20	4,29	32,37	-4,82E-04	-	-	-	-6,36E-04
13,64	7,91	11,35	3,32	31,98	-4,66E-04	-	-	-	-6,25E-04
12,29	7,13	10,46	2,32	31,55	-4,49E-04	-	-	-	-6,13E-04
10,89	6,31	9,52	1,27	31,07	-4,32E-04	-	-	-	-6,00E-04
9,46	5,44	8,54	0,17	30,55	-4,15E-04	-0,0001027	-	-	-5,86E-04
7,97	4,53	7,52	-0,97	29,98	-3,97E-04	-9,71E-05	-	-	-5,72E-04
6,45	3,58	6,45	-2,15	29,37	-3,79E-04	-9,14E-05	-	-	-5,57E-04
4,88	2,59	5,34	-3,37	28,72	-3,61E-04	-8,56E-05	-	-	-5,41E-04
3,27	1,55	4,18	-4,64	28,03	-3,43E-04	-7,97E-05	-	-	-5,24E-04
1,61	0,46	2,99	-5,96	27,29	-3,25E-04	-7,38E-05	-	-	-5,07E-04
-0,09	-0,66	1,74	-7,31	26,50	-3,07E-04	-6,79E-05	-	-	-4,89E-04
-1,83	-1,83	0,46	-8,71	25,68	-2,89E-04	-6,20E-05	-	-	-4,70E-04
-3,62	-3,05	-0,87	-10,16	24,81	-2,71E-04	-5,62E-05	-	-	-4,51E-04
-5,45	-4,31	-2,24	-11,64	23,89	-2,53E-04	-5,04E-05	-0,0001327	-5,73E-06	-4,31E-04
-7,33	-5,61	-3,66	-13,17	22,94	-2,35E-04	-4,47E-05	-	-	-4,11E-04
-9,24	-6,95	-5,12	-14,75	21,94	-2,17E-04	-3,92E-05	-	-	-3,90E-04
-11,21	-8,34	-6,62	-16,36	20,89	-2,00E-04	-3,38E-05	-	-	-3,68E-04
-13,21	-9,77	-8,17	-18,02	19,80	-1,82E-04	-2,87E-05	-9,35E-05	1,23E-05	-3,46E-04



-15,26	-11,25	-9,76	-19,73	18,67	-1,65E-04	-2,38E-05	-8,42E-05	1,58E-05	-3,24E-04
-17,35	-12,77	-11,39	-21,48	17,50	-1,49E-04	-1,91E-05	-7,50E-05	1,88E-05	-3,01E-04
-19,49	-14,33	-13,07	-23,27	16,28	-1,33E-04	-1,48E-05	-6,62E-05	2,13E-05	-2,77E-04
-21,67	-15,93	-14,79	-25,10	15,02	-1,17E-04	-1,08E-05	-5,76E-05	2,32E-05	-2,53E-04
-23,89	-17,58	-16,55	-26,98	13,71	-1,02E-04	-7,28E-06	-4,95E-05	2,45E-05	-2,29E-04
-26,15	-19,28	-18,36	-28,91	12,36	-8,76E-05	-4,15E-06	-4,17E-05	2,51E-05	-2,05E-04
-28,46	-21,01	-20,21	-30,87	10,97	-7,38E-05	-1,49E-06	-3,44E-05	2,50E-05	-1,80E-04
-30,82	-22,79	-22,11	-32,88	9,53	-6,07E-05	6,45E-07	-2,76E-05	2,41E-05	-1,54E-04
-33,21	-24,62	-24,04	-34,93	8,05	-4,83E-05	2,22E-06	-2,14E-05	2,24E-05	-1,29E-04
-35,66	-26,48	-26,03	-37,03	6,53	-3,67E-05	3,18E-06	-1,57E-05	1,99E-05	-1,04E-04
-38,14	-28,40	-28,05	-39,17	4,96	-2,61E-05	3,49E-06	-1,07E-05	1,64E-05	-7,78E-05
-40,67	-30,35	-30,12	-41,35	3,35	-1,64E-05	3,09E-06	-6,36E-06	1,20E-05	-5,19E-05
-43,24	-32,35	-32,23	-43,58	1,70	-7,65E-06	1,95E-06	-2,78E-06	6,53E-06	-2,60E-05
-45,85	-34,39	-34,39	-45,85	0,00	0,00E+00	0	0	0	0,00E+00

**Tabla B.2 Momentos para distancia entre correas de 700 mm**

Momento Flector					
0,00	-3,67	-58,68	-40,47	-58,30	-5,93
0,00	-1,35	-55,61	-37,78	-54,87	-5,81
-0,01	0,90	-52,61	-35,15	-51,50	-5,69
-0,01	3,10	-49,67	-32,57	-48,18	-5,58
-0,02	5,24	-46,79	-30,06	-44,93	-5,46
-0,02	7,32	-43,96	-27,61	-41,73	-5,35
-0,03	9,35	-41,20	-25,22	-38,60	-5,23
-0,04	11,31	-38,49	-22,88	-35,52	-5,12
-0,05	13,21	-35,84	-20,61	-32,50	-5,01
-0,06	15,06	-33,26	-18,39	-29,54	-4,90
-0,07	16,84	-30,73	-16,24	-26,64	-4,79
-0,09	18,57	-28,26	-14,14	-23,80	-4,69
-0,10	20,23	-25,85	-12,10	-21,02	-4,58
-0,12	21,84	-23,50	-10,12	-18,30	-4,47
-0,14	23,39	-21,21	-8,20	-15,64	-4,37
-0,15	24,87	-18,98	-6,34	-13,03	-4,27
-0,17	26,30	-16,81	-4,54	-10,49	-4,17
-0,20	27,67	-14,70	-2,80	-8,01	-4,07
-0,22	28,98	-12,64	-1,12	-5,58	-3,97
-0,24	30,23	-10,65	0,50	-3,22	-3,87
-0,27	31,42	-8,71	2,06	-0,91	-3,78
-0,29	32,56	-6,84	3,57	1,34	-3,68
-0,32	33,63	-5,02	5,01	3,53	-3,59
-0,35	34,64	-3,26	6,40	5,66	-3,49
-0,38	35,60	-1,57	7,72	7,72	-3,40

-0,41	36,49	0,07	8,99	9,73	-3,31
-0,44	37,33	1,65	10,20	11,69	-3,22
-0,47	38,11	3,17	11,35	13,58	-3,14
-0,51	38,82	4,63	12,44	15,41	-3,05
-0,54	39,48	6,03	13,47	17,18	-2,96
-0,58	40,08	7,37	14,44	18,90	-2,88
-0,62	40,62	8,66	15,35	20,55	-2,80
-0,66	41,10	9,88	16,20	22,14	-2,72
-0,70	41,52	11,04	16,99	23,68	-2,64
-0,74	41,88	12,15	17,72	25,16	-2,56
-0,78	42,18	13,20	18,40	26,57	-2,48
-0,83	42,43	14,18	19,01	27,93	-2,40
-0,87	42,61	15,11	19,57	29,23	-2,33
-0,92	42,73	15,98	20,06	30,47	-2,25
-0,97	42,80	16,78	20,50	31,65	-2,18
-1,02	42,81	17,53	20,88	32,77	-2,11
-1,07	42,75	18,22	21,20	33,83	-2,04
-1,12	42,64	18,85	21,46	34,83	-1,97
-1,17	42,47	19,42	21,65	35,78	-1,90
-1,23	42,24	19,94	21,80	36,66	-1,83
-1,28	41,94	20,39	21,88	37,49	-1,76
-1,34	41,59	20,78	21,90	38,25	-1,70
-1,39	41,19	21,12	21,86	38,96	-1,64
-1,45	40,72	21,39	21,76	39,60	-1,57
-1,51	40,19	21,61	21,61	40,19	-1,51
-1,57	39,60	21,76	21,39	40,72	-1,45
-1,64	38,96	21,86	21,12	41,19	-1,39
-1,70	38,25	21,90	20,78	41,59	-1,34
-1,76	37,49	21,88	20,39	41,94	-1,28
-1,83	36,66	21,80	19,94	42,24	-1,23
-1,90	35,78	21,65	19,42	42,47	-1,17
-1,97	34,83	21,46	18,85	42,64	-1,12
-2,04	33,83	21,20	18,22	42,75	-1,07
-2,11	32,77	20,88	17,53	42,81	-1,02
-2,18	31,65	20,50	16,78	42,80	-0,97
-2,25	30,47	20,06	15,98	42,73	-0,92
-2,33	29,23	19,57	15,11	42,61	-0,87
-2,40	27,93	19,01	14,18	42,43	-0,83
-2,48	26,57	18,40	13,20	42,18	-0,78
-2,56	25,16	17,72	12,15	41,88	-0,74
-2,64	23,68	16,99	11,04	41,52	-0,70
-2,72	22,14	16,20	9,88	41,10	-0,66
-2,80	20,55	15,35	8,66	40,62	-0,62

-2,88	18,90	14,44	7,37	40,08	-0,58
-2,96	17,18	13,47	6,03	39,48	-0,54
-3,05	15,41	12,44	4,63	38,82	-0,51
-3,14	13,58	11,35	3,17	38,11	-0,47
-3,22	11,69	10,20	1,65	37,33	-0,44
-3,31	9,73	8,99	0,07	36,49	-0,41
-3,40	7,72	7,72	-1,57	35,60	-0,38
-3,49	5,66	6,40	-3,26	34,64	-0,35
-3,59	3,53	5,01	-5,02	33,63	-0,32
-3,68	1,34	3,57	-6,84	32,56	-0,29
-3,78	-0,91	2,06	-8,71	31,42	-0,27
-3,87	-3,22	0,50	-10,65	30,23	-0,24
-3,97	-5,58	-1,12	-12,64	28,98	-0,22
-4,07	-8,01	-2,80	-14,70	27,67	-0,20
-4,17	-10,49	-4,54	-16,81	26,30	-0,17
-4,27	-13,03	-6,34	-18,98	24,87	-0,15
-4,37	-15,64	-8,20	-21,21	23,39	-0,14
-4,47	-18,30	-10,12	-23,50	21,84	-0,12
-4,58	-21,02	-12,10	-25,85	20,23	-0,10
-4,69	-23,80	-14,14	-28,26	18,57	-0,09
-4,79	-26,64	-16,24	-30,73	16,84	-0,07
-4,90	-29,54	-18,39	-33,26	15,06	-0,06
-5,01	-32,50	-20,61	-35,84	13,21	-0,05
-5,12	-35,52	-22,88	-38,49	11,31	-0,04
-5,23	-38,60	-25,22	-41,20	9,35	-0,03
-5,35	-41,73	-27,61	-43,96	7,32	-0,02
-5,46	-44,93	-30,06	-46,79	5,24	-0,02
-5,58	-48,18	-32,57	-49,67	3,10	-0,01
-5,69	-51,50	-35,15	-52,61	0,90	-0,01
-5,81	-54,87	-37,78	-55,61	-1,35	0,00
-5,93	-58,30	-40,47	-58,68	-3,67	0,00
-6,05	-61,80	-43,21	-61,80	-6,05	0,00

**Tabla B.3 Deflexiones para distancia entre correas de 700 mm**

Deflexiones (m)					
5,86E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5,80E-04	-4,18E-05	9,41E-06	-7,12E-07	-1,14E-05	5,96E-06
5,74E-04	-8,37E-05	1,68E-05	-2,79E-06	-2,49E-05	1,19E-05
5,68E-04	-1,26E-04	2,24E-05	-6,13E-06	-4,01E-05	1,79E-05
5,62E-04	-1,68E-04	2,62E-05	-1,07E-05	-5,71E-05	2,38E-05
5,56E-04	-2,09E-04	2,83E-05	-1,63E-05	-7,57E-05	2,97E-05
5,51E-04	-2,51E-04	2,88E-05	-2,29E-05	-9,59E-05	3,57E-05
5,45E-04	-2,93E-04	2,79E-05	-3,05E-05	-1,17E-04	4,16E-05
5,39E-04	-3,34E-04	2,56E-05	-3,89E-05	-1,40E-04	4,75E-05
5,33E-04	-3,74E-04	2,19E-05	-4,81E-05	-1,64E-04	5,35E-05
5,27E-04	-4,15E-04	1,71E-05	-5,80E-05	-1,89E-04	5,94E-05
5,21E-04	-4,54E-04	1,11E-05	-6,85E-05	-2,16E-04	6,53E-05
5,16E-04	-4,94E-04	4,15E-06	-7,95E-05	-2,43E-04	7,12E-05
5,10E-04	-5,32E-04	-3,79E-06	-9,11E-05	-2,70E-04	7,71E-05
5,04E-04	-5,70E-04	-1,26E-05	-1,03E-04	-2,99E-04	8,31E-05
4,98E-04	-6,07E-04	-2,22E-05	-1,15E-04	-3,28E-04	8,90E-05
4,92E-04	-6,44E-04	-3,25E-05	-1,28E-04	-3,58E-04	9,49E-05
4,87E-04	-6,79E-04	-4,35E-05	-1,41E-04	-3,88E-04	1,01E-04
4,81E-04	-7,14E-04	-5,50E-05	-1,54E-04	-4,18E-04	1,07E-04
4,75E-04	-7,48E-04	-6,70E-05	-1,67E-04	-4,49E-04	1,13E-04
4,69E-04	-7,80E-04	-7,95E-05	-1,80E-04	-4,80E-04	1,18E-04
4,63E-04	-8,12E-04	-9,23E-05	-1,93E-04	-5,11E-04	1,24E-04
4,57E-04	-8,43E-04	-0,00010537	-2,06E-04	-5,42E-04	1,30E-04
4,52E-04	-8,72E-04	-0,00011869	-2,18E-04	-5,73E-04	1,36E-04
4,46E-04	-9,01E-04	-0,00013219	-2,31E-04	-6,04E-04	1,42E-04
4,40E-04	-9,28E-04	-0,0001458	-2,44E-04	-6,35E-04	1,48E-04
4,34E-04	-9,54E-04	-0,00015946	-0,00025576	-0,00066507	1,54E-04
4,28E-04	-9,79E-04	-0,00017311	-0,00026766	-0,00069519	1,60E-04
4,23E-04	-1,00E-03	-0,00018671	-0,00027922	-0,00072492	1,66E-04
4,17E-04	-1,02E-03	-0,00020021	-0,00029039	-0,00075419	1,71E-04
4,11E-04	-1,05E-03	-0,00021355	-0,00030115	-0,00078294	1,77E-04
4,05E-04	-1,07E-03	-0,00022668	-0,00031145	-0,00081111	1,83E-04
3,99E-04	-1,08E-03	-0,00023957	-0,00032126	-0,00083865	1,89E-04
3,93E-04	-0,00110067	-0,00025217	-0,00033056	-0,00086549	1,95E-04
3,88E-04	-0,00111624	-0,00026443	-0,00033932	-0,00089159	2,01E-04
3,82E-04	-0,00113041	-0,00027632	-0,0003475	-0,00091689	2,07E-04
3,76E-04	-0,00114317	-0,00028781	-0,00035508	-0,00094134	2,12E-04
3,70E-04	-0,00115451	-0,00029885	-0,00036205	-0,0009649	2,18E-04
3,64E-04	-0,00116442	-0,00030941	-0,00036837	-0,00098752	2,24E-04
3,58E-04	-0,0011729	-0,00031946	-0,00037404	-0,00100915	2,30E-04
3,53E-04	-0,00117993	-0,00032897	-0,00037903	-0,00102976	2,36E-04

3,47E-04	-0,00118553	-0,00033793	-0,00038333	-0,00104931	2,42E-04
3,41E-04	-0,00118968	-0,00034629	-0,00038693	-0,00106775	2,48E-04
3,35E-04	-0,0011924	-0,00035403	-0,00038982	-0,00108505	2,53E-04
3,29E-04	-0,00119368	-0,00036114	-0,00039198	-0,00110118	2,59E-04
3,23E-04	-0,00119353	-0,0003676	-0,00039341	-0,0011161	2,65E-04
3,18E-04	-0,00119196	-0,00037339	-0,00039411	-0,00112979	2,71E-04
3,12E-04	-0,00118898	-0,00037849	-0,00039408	-0,00114222	2,77E-04
3,06E-04	-0,00118459	-0,00038289	-0,0003933	-0,00115336	2,83E-04
3,00E-04	-0,00117882	-0,00038658	-0,00039179	-0,00116319	2,88E-04
2,94E-04	-0,00117168	-0,00038955	-0,00038955	-0,00117168	2,94E-04
2,88E-04	-0,00116319	-0,00039179	-0,00038658	-0,00117882	3,00E-04
2,83E-04	-0,00115336	-0,0003933	-0,00038289	-0,00118459	3,06E-04
2,77E-04	-0,00114222	-0,00039408	-0,00037849	-0,00118898	3,12E-04
2,71E-04	-0,00112979	-0,00039411	-0,00037339	-0,00119196	3,18E-04
2,65E-04	-0,0011161	-0,00039341	-0,0003676	-0,00119353	3,23E-04
2,59E-04	-0,00110118	-0,00039198	-0,00036114	-0,00119368	3,29E-04
2,53E-04	-0,00108505	-0,00038982	-0,00035403	-0,0011924	3,35E-04
2,48E-04	-0,00106775	-0,00038693	-0,00034629	-0,00118968	3,41E-04
2,42E-04	-0,00104931	-0,00038333	-0,00033793	-0,00118553	3,47E-04
2,36E-04	-0,00102976	-0,00037903	-0,00032897	-0,00117993	3,53E-04
2,30E-04	-0,00100915	-0,00037404	-0,00031946	-0,0011729	3,58E-04
2,24E-04	-0,00098752	-0,00036837	-0,00030941	-0,00116442	3,64E-04
2,18E-04	-0,0009649	-0,00036205	-0,00029885	-0,00115451	3,70E-04
2,12E-04	-0,00094134	-0,00035508	-0,00028781	-0,00114317	3,76E-04
2,07E-04	-0,00091689	-0,0003475	-0,00027632	-0,00113041	3,82E-04
2,01E-04	-0,00089159	-0,00033932	-2,64E-04	-1,12E-03	3,88E-04
1,95E-04	-0,00086549	-0,00033056	-2,52E-04	-1,10E-03	3,93E-04
1,89E-04	-0,00083865	-0,00032126	-2,40E-04	-1,08E-03	3,99E-04
1,83E-04	-0,00081111	-0,00031145	-2,27E-04	-1,07E-03	4,05E-04
1,77E-04	-0,00078294	-0,00030115	-2,14E-04	-1,05E-03	4,11E-04
1,71E-04	-0,00075419	-0,00029039	-2,00E-04	-1,02E-03	4,17E-04
1,66E-04	-0,00072492	-0,00027922	-1,87E-04	-1,00E-03	4,23E-04
1,60E-04	-6,95E-04	-0,00026766	-1,73E-04	-9,79E-04	4,28E-04
1,54E-04	-6,65E-04	-0,00025576	-1,59E-04	-9,54E-04	4,34E-04
1,48E-04	-6,35E-04	-0,00024356	-1,46E-04	-9,28E-04	4,40E-04
1,42E-04	-6,04E-04	-0,0002311	-1,32E-04	-9,01E-04	4,46E-04
1,36E-04	-5,73E-04	-0,00021843	-1,19E-04	-8,72E-04	4,52E-04
1,30E-04	-5,42E-04	-0,00020558	-1,05E-04	-8,43E-04	4,57E-04
1,24E-04	-5,11E-04	-0,00019262	-9,23E-05	-8,12E-04	4,63E-04
1,18E-04	-4,80E-04	-0,00017958	-7,95E-05	-7,80E-04	4,69E-04
1,13E-04	-4,49E-04	-0,00016653	-6,70E-05	-7,48E-04	4,75E-04
1,07E-04	-4,18E-04	-0,00015352	-5,50E-05	-7,14E-04	4,81E-04
1,01E-04	-3,88E-04	-0,0001406	-4,35E-05	-6,79E-04	4,87E-04

9,49E-05	-3,58E-04	-0,00012783	-3,25E-05	-6,44E-04	4,92E-04
8,90E-05	-3,28E-04	-1,15E-04	-2,22E-05	-6,07E-04	4,98E-04
8,31E-05	-2,99E-04	-1,03E-04	-1,26E-05	-5,70E-04	5,04E-04
7,71E-05	-2,70E-04	-9,11E-05	-3,79E-06	-5,32E-04	5,10E-04
7,12E-05	-2,43E-04	-7,95E-05	4,15E-06	-4,94E-04	5,16E-04
6,53E-05	-2,16E-04	-6,85E-05	1,11E-05	-4,54E-04	5,21E-04
5,94E-05	-1,89E-04	-5,80E-05	1,71E-05	-4,15E-04	5,27E-04
5,35E-05	-1,64E-04	-4,81E-05	2,19E-05	-3,74E-04	5,33E-04
4,75E-05	-1,40E-04	-3,89E-05	2,56E-05	-3,34E-04	5,39E-04
4,16E-05	-1,17E-04	-3,05E-05	2,79E-05	-2,93E-04	5,45E-04
3,57E-05	-9,59E-05	-2,29E-05	2,88E-05	-2,51E-04	5,51E-04
2,97E-05	-7,57E-05	-1,63E-05	2,83E-05	-2,09E-04	5,56E-04
2,38E-05	-5,71E-05	-1,07E-05	2,62E-05	-1,68E-04	5,62E-04
1,79E-05	-4,01E-05	-6,13E-06	2,24E-05	-1,26E-04	5,68E-04
1,19E-05	-2,49E-05	-2,79E-06	1,68E-05	-8,37E-05	5,74E-04
5,96E-06	-1,14E-05	-7,12E-07	9,41E-06	-4,18E-05	5,80E-04

**Tabla B.4 Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 800 mm**

Momento Me (Nm)					Deflexiones (m)				
-0,01	-50,74	-62,72	-62,60	-53,37	-3,37E-04	-1,45E-05	3,00E-06	-5,87E-06	4,82E-06
-0,02	-47,10	-58,96	-58,72	-52,29	-3,31E-04	-3,12E-05	3,24E-06	-1,45E-05	9,31E-06
-0,05	-43,55	-55,28	-54,92	-51,23	-3,24E-04	-5,00E-05	8,88E-07	-2,57E-05	1,35E-05
-0,09	-40,07	-51,68	-51,20	-50,18	-3,18E-04	-7,07E-05	-3,90E-06	-3,93E-05	1,73E-05
-0,14	-36,66	-48,16	-47,55	-49,14	-3,12E-04	-9,31E-05	-1,10E-05	-5,52E-05	2,09E-05
-0,20	-33,34	-44,71	-43,99	-48,11	-3,06E-04	-1,17E-04	-2,01E-05	-7,32E-05	2,41E-05
-0,27	-30,09	-41,34	-40,50	-47,09	-2,99E-04	-1,43E-04	-3,13E-05	-9,31E-05	2,71E-05
-0,35	-26,92	-38,05	-37,08	-46,09	-2,93E-04	-1,70E-04	-4,42E-05	-1,15E-04	2,97E-05
-0,44	-23,83	-34,84	-33,75	-45,09	-2,87E-04	-1,98E-04	-5,89E-05	-1,38E-04	3,21E-05
-0,54	-20,81	-31,70	-30,49	-44,10	-2,81E-04	-2,27E-04	-7,50E-05	-1,63E-04	3,41E-05
-0,66	-17,87	-28,64	-27,31	-43,13	-2,74E-04	-2,57E-04	-9,26E-05	-1,89E-04	3,60E-05
-0,78	-15,01	-25,66	-24,21	-42,17	-2,68E-04	-2,87E-04	-1,11E-04	-2,16E-04	3,75E-05
-0,92	-12,23	-22,76	-21,18	-41,21	-2,62E-04	-3,19E-04	-1,31E-04	-2,45E-04	3,88E-05
-1,07	-9,53	-19,93	-18,24	-40,27	-2,56E-04	-3,51E-04	-1,52E-04	-2,74E-04	3,98E-05
-1,23	-6,90	-17,18	-15,37	-39,34	-2,50E-04	-3,83E-04	-1,74E-04	-3,04E-04	4,06E-05
-1,39	-4,35	-14,51	-12,57	-38,42	-2,43E-04	-4,16E-04	-1,97E-04	-3,35E-04	4,11E-05
-1,57	-1,87	-11,92	-9,86	-37,51	-2,37E-04	-4,49E-04	-2,20E-04	-3,66E-04	4,14E-05
-1,76	0,52	-9,40	-7,22	-36,61	-2,31E-04	-4,82E-04	-2,44E-04	-3,98E-04	4,15E-05
-1,97	2,84	-6,96	-4,66	-35,72	-2,25E-04	-5,15E-04	-2,68E-04	-4,30E-04	4,13E-05
-2,18	5,08	-4,60	-2,18	-34,85	-2,19E-04	-5,48E-04	-2,92E-04	-4,63E-04	4,10E-05
-2,40	7,25	-2,31	0,23	-33,98	-2,13E-04	-5,80E-04	-3,17E-04	-4,95E-04	4,04E-05
-2,64	9,33	-0,11	2,56	-33,13	-2,06E-04	-6,13E-04	-3,42E-04	-5,27E-04	3,96E-05
-2,88	11,34	2,02	4,81	-32,28	-2,00E-04	-6,45E-04	-0,00036655	-5,60E-04	3,85E-05

-3,14	13,27	4,08	6,98	-31,45	-1,94E-04	-6,76E-04	-0,00039124	-5,92E-04	3,73E-05
-3,40	15,12	6,05	9,07	-30,63	-1,88E-04	-7,07E-04	-0,00041575	-6,24E-04	3,59E-05
-3,68	16,90	7,95	11,09	-29,82	-1,82E-04	-7,37E-04	-0,00043999	-6,55E-04	3,43E-05
-3,97	18,60	9,77	13,03	-29,02	-1,76E-04	-7,66E-04	-0,00046389	-0,0006859	3,26E-05
-4,27	20,22	11,51	14,90	-28,23	-1,70E-04	-7,95E-04	-0,00048735	-0,00071623	3,06E-05
-4,58	21,77	13,17	16,68	-27,45	-1,64E-04	-8,23E-04	-0,00051031	-0,00074589	2,85E-05
-4,90	23,23	14,76	18,39	-26,68	-1,58E-04	-8,49E-04	-0,00053269	-0,00077483	2,62E-05
-5,23	24,62	16,27	20,02	-25,92	-1,52E-04	-8,75E-04	-0,00055442	-0,00080295	2,37E-05
-5,58	25,93	17,70	21,58	-25,18	-1,46E-04	-9,00E-04	-0,00057544	-0,0008302	2,11E-05
-5,93	27,17	19,06	23,05	-24,44	-1,41E-04	-9,23E-04	-0,00059568	-0,00085649	1,83E-05
-6,29	28,32	20,34	24,45	-23,72	-1,35E-04	-0,00094546	-0,00061508	-0,00088177	1,53E-05
-6,67	29,40	21,54	25,77	-23,01	-1,29E-04	-0,00096651	-0,00063358	-0,00090598	1,23E-05
-7,06	30,40	22,66	27,02	-22,30	-1,23E-04	-0,00098627	-0,00065114	-0,00092906	9,04E-06
-7,45	31,33	23,71	28,18	-21,61	-1,18E-04	-0,00100469	-0,0006677	-0,00095094	5,68E-06
-7,86	32,18	24,67	29,27	-20,93	-1,12E-04	-0,00102174	-0,00068322	-0,00097159	2,19E-06
-8,28	32,95	25,56	30,28	-20,26	-1,06E-04	-0,00103737	-0,00069766	-0,00099095	-1,44E-06
-8,71	33,64	26,38	31,22	-19,60	-1,01E-04	-0,00105155	-0,00071097	-0,00100898	-5,19E-06
-9,15	34,25	27,11	32,07	-18,95	-9,52E-05	-0,00106425	-0,00072312	-0,00102563	-9,06E-06
-9,60	34,79	27,77	32,85	-18,32	-8,98E-05	-0,00107545	-0,00073408	-0,00104088	-1,30E-05
-10,07	35,25	28,35	33,56	-17,69	-8,44E-05	-0,00108511	-0,00074381	-0,00105468	-1,72E-05
-10,54	35,63	28,86	34,18	-17,08	-7,91E-05	-0,00109323	-0,0007523	-0,001067	-2,14E-05
-11,03	35,94	29,28	34,73	-16,47	-7,39E-05	-0,00109978	-0,00075953	-0,00107782	-2,57E-05
-11,52	36,16	29,63	35,20	-15,88	-6,87E-05	-0,00110474	-0,00076546	-0,00108712	-3,01E-05
-12,03	36,31	29,90	35,59	-15,30	-6,36E-05	-0,00110812	-0,00077009	-0,00109487	-3,46E-05
-12,55	36,39	30,10	35,90	-14,72	-5,86E-05	-0,0011099	-0,00077341	-0,00110105	-3,92E-05
-13,07	36,38	30,21	36,14	-14,16	-5,36E-05	-0,00111009	-0,0007754	-0,00110565	-4,39E-05
-13,61	36,30	30,25	36,30	-13,61	-4,87E-05	-0,00110867	-0,00077607	-0,00110867	-4,87E-05
-14,16	36,14	30,21	36,38	-13,07	-4,39E-05	-0,00110565	-0,0007754	-0,00111009	-5,36E-05
-14,72	35,90	30,10	36,39	-12,55	-3,92E-05	-0,00110105	-0,00077341	-0,0011099	-5,86E-05
-15,30	35,59	29,90	36,31	-12,03	-3,46E-05	-0,00109487	-0,00077009	-0,00110812	-6,36E-05
-15,88	35,20	29,63	36,16	-11,52	-3,01E-05	-0,00108712	-0,00076546	-0,00110474	-6,87E-05
-16,47	34,73	29,28	35,94	-11,03	-2,57E-05	-0,00107782	-0,00075953	-0,00109978	-7,39E-05
-17,08	34,18	28,86	35,63	-10,54	-2,14E-05	-0,001067	-0,0007523	-0,00109323	-7,91E-05
-17,69	33,56	28,35	35,25	-10,07	-1,72E-05	-0,00105468	-0,00074381	-0,00108511	-8,44E-05
-18,32	32,85	27,77	34,79	-9,60	-1,30E-05	-0,00104088	-0,00073408	-0,00107545	-8,98E-05
-18,95	32,07	27,11	34,25	-9,15	-9,06E-06	-0,00102563	-0,00072312	-0,00106425	-9,52E-05
-19,60	31,22	26,38	33,64	-8,71	-5,19E-06	-0,00100898	-0,00071097	-0,00105155	-1,01E-04
-20,26	30,28	25,56	32,95	-8,28	-1,44E-06	-0,00099095	-0,00069766	-0,00103737	-1,06E-04
-20,93	29,27	24,67	32,18	-7,86	2,19E-06	-0,00097159	-0,00068322	-0,00102174	-1,12E-04
-21,61	28,18	23,71	31,33	-7,45	5,68E-06	-0,00095094	-0,0006677	-0,00100469	-1,18E-04
-22,30	27,02	22,66	30,40	-7,06	9,04E-06	-0,00092906	-0,00065114	-0,00098627	-1,23E-04
-23,01	25,77	21,54	29,40	-6,67	1,23E-05	-0,00090598	-0,00063358	-0,00096651	-1,29E-04
-23,72	24,45	20,34	28,32	-6,29	1,53E-05	-0,00088177	-0,00061508	-0,00094546	-1,35E-04

-24,44	23,05	19,06	27,17	-5,93	1,83E-05	-0,00085649	-0,00059568	-9,23E-04	-1,41E-04
-25,18	21,58	17,70	25,93	-5,58	2,11E-05	-0,0008302	-0,00057544	-9,00E-04	-1,46E-04
-25,92	20,02	16,27	24,62	-5,23	2,37E-05	-0,00080295	-0,00055442	-8,75E-04	-1,52E-04
-26,68	18,39	14,76	23,23	-4,90	2,62E-05	-0,00077483	-0,00053269	-8,49E-04	-1,58E-04
-27,45	16,68	13,17	21,77	-4,58	2,85E-05	-0,00074589	-0,00051031	-8,23E-04	-1,64E-04
-28,23	14,90	11,51	20,22	-4,27	3,06E-05	-0,00071623	-0,00048735	-7,95E-04	-1,70E-04
-29,02	13,03	9,77	18,60	-3,97	3,26E-05	-0,0006859	-0,00046389	-7,66E-04	-1,76E-04
-29,82	11,09	7,95	16,90	-3,68	3,43E-05	-6,55E-04	-0,00043999	-7,37E-04	-1,82E-04
-30,63	9,07	6,05	15,12	-3,40	3,59E-05	-6,24E-04	-0,00041575	-7,07E-04	-1,88E-04
-31,45	6,98	4,08	13,27	-3,14	3,73E-05	-5,92E-04	-0,00039124	-6,76E-04	-1,94E-04
-32,28	4,81	2,02	11,34	-2,88	3,85E-05	-5,60E-04	-0,00036655	-6,45E-04	-2,00E-04
-33,13	2,56	-0,11	9,33	-2,64	3,96E-05	-5,27E-04	-0,00034178	-6,13E-04	-2,06E-04
-33,98	0,23	-2,31	7,25	-2,40	4,04E-05	-4,95E-04	-0,000317	-5,80E-04	-2,13E-04
-34,85	-2,18	-4,60	5,08	-2,18	4,10E-05	-4,63E-04	-0,00029233	-5,48E-04	-2,19E-04
-35,72	-4,66	-6,96	2,84	-1,97	4,13E-05	-4,30E-04	-0,00026787	-5,15E-04	-2,25E-04
-36,61	-7,22	-9,40	0,52	-1,76	4,15E-05	-3,98E-04	-0,0002437	-4,82E-04	-2,31E-04
-37,51	-9,86	-11,92	-1,87	-1,57	4,14E-05	-3,66E-04	-0,00021996	-4,49E-04	-2,37E-04
-38,42	-12,57	-14,51	-4,35	-1,39	4,11E-05	-3,35E-04	-0,00019673	-4,16E-04	-2,43E-04
-39,34	-15,37	-17,18	-6,90	-1,23	4,06E-05	-3,04E-04	-0,00017415	-3,83E-04	-2,50E-04
-40,27	-18,24	-19,93	-9,53	-1,07	3,98E-05	-2,74E-04	-1,52E-04	-3,51E-04	-2,56E-04
-41,21	-21,18	-22,76	-12,23	-0,92	3,88E-05	-2,45E-04	-1,31E-04	-3,19E-04	-2,62E-04
-42,17	-24,21	-25,66	-15,01	-0,78	3,75E-05	-2,16E-04	-1,11E-04	-2,87E-04	-2,68E-04
-43,13	-27,31	-28,64	-17,87	-0,66	3,60E-05	-1,89E-04	-9,26E-05	-2,57E-04	-2,74E-04
-44,10	-30,49	-31,70	-20,81	-0,54	3,41E-05	-1,63E-04	-7,50E-05	-2,27E-04	-2,81E-04
-45,09	-33,75	-34,84	-23,83	-0,44	3,21E-05	-1,38E-04	-5,89E-05	-1,98E-04	-2,87E-04
-46,09	-37,08	-38,05	-26,92	-0,35	2,97E-05	-1,15E-04	-4,42E-05	-1,70E-04	-2,93E-04
-47,09	-40,50	-41,34	-30,09	-0,27	2,71E-05	-9,31E-05	-3,13E-05	-1,43E-04	-2,99E-04
-48,11	-43,99	-44,71	-33,34	-0,20	2,41E-05	-7,32E-05	-2,01E-05	-1,17E-04	-3,06E-04
-49,14	-47,55	-48,16	-36,66	-0,14	2,09E-05	-5,52E-05	-1,10E-05	-9,31E-05	-3,12E-04
-50,18	-51,20	-51,68	-40,07	-0,09	1,73E-05	-3,93E-05	-3,90E-06	-7,07E-05	-3,18E-04
-51,23	-54,92	-55,28	-43,55	-0,05	1,35E-05	-2,57E-05	8,88E-07	-5,00E-05	-3,24E-04
-52,29	-58,72	-58,96	-47,10	-0,02	9,31E-06	-1,45E-05	3,24E-06	-3,12E-05	-3,31E-04
-53,37	-62,60	-62,72	-50,74	-0,01	4,82E-06	-5,87E-06	3,00E-06	-1,45E-05	-3,37E-04
-54,45	-66,55	-66,55	-54,45	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	-3,43E-04



**Tabla B.5 Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 900 mm**

Momento Me (Nm)					Deflexiones (m)				
0,00	-9,58	-90,44	-89,62	-13,34	1,82E-03	-1,14E-04	3,53E-05	-4,05E-05	1,89E-05
-0,01	-5,64	-85,68	-84,05	-13,07	1,81E-03	-2,29E-04	6,55E-05	-8,60E-05	3,78E-05
-0,01	-1,80	-81,03	-78,58	-12,81	1,79E-03	-3,43E-04	9,10E-05	-1,36E-04	5,67E-05
-0,02	1,94	-76,47	-73,20	-12,55	1,77E-03	-4,58E-04	1,12E-04	-1,91E-04	7,56E-05
-0,03	5,58	-72,01	-67,93	-12,29	1,75E-03	-5,73E-04	1,29E-04	-2,49E-04	9,45E-05
-0,05	9,13	-67,65	-62,75	-12,03	1,73E-03	-6,88E-04	1,41E-04	-3,12E-04	1,13E-04
-0,07	12,57	-63,39	-57,67	-11,77	1,71E-03	-8,02E-04	1,50E-04	-3,77E-04	1,32E-04
-0,09	15,92	-59,22	-52,69	-11,52	1,70E-03	-9,15E-04	1,56E-04	-4,47E-04	1,51E-04
-0,11	19,17	-55,15	-47,80	-11,27	1,68E-03	-1,03E-03	1,58E-04	-5,19E-04	1,70E-04
-0,14	22,32	-51,18	-43,02	-11,03	1,66E-03	-1,14E-03	1,57E-04	-5,93E-04	1,88E-04
-0,16	25,38	-47,31	-38,33	-10,78	1,64E-03	-1,25E-03	1,53E-04	-6,70E-04	2,07E-04
-0,20	28,34	-43,54	-33,74	-10,54	1,62E-03	-1,36E-03	1,47E-04	-7,50E-04	2,26E-04
-0,23	31,19	-39,86	-29,25	-10,30	1,60E-03	-1,46E-03	1,38E-04	-8,31E-04	2,45E-04
-0,27	33,96	-36,29	-24,85	-10,07	1,59E-03	-1,57E-03	1,27E-04	-9,13E-04	2,63E-04
-0,31	36,62	-32,81	-20,55	-9,84	1,57E-03	-1,67E-03	1,14E-04	-9,97E-04	2,82E-04
-0,35	39,18	-29,42	-16,36	-9,60	1,55E-03	-1,78E-03	9,86E-05	-1,08E-03	3,01E-04
-0,39	41,65	-26,14	-12,26	-9,38	1,53E-03	-1,87E-03	8,20E-05	-1,17E-03	3,19E-04
-0,44	44,02	-22,96	-8,25	-9,15	1,51E-03	-1,97E-03	6,40E-05	-1,26E-03	3,38E-04
-0,49	46,29	-19,87	-4,35	-8,93	1,50E-03	-2,07E-03	4,47E-05	-1,34E-03	3,57E-04
-0,54	48,46	-16,88	-0,54	-8,71	1,48E-03	-2,16E-03	2,42E-05	-1,43E-03	3,75E-04
-0,60	50,54	-13,99	3,16	-8,50	1,46E-03	-2,25E-03	2,89E-06	-1,52E-03	3,94E-04
-0,66	52,51	-11,19	6,77	-8,28	1,44E-03	-2,33E-03	-1,92E-05	-1,61E-03	4,12E-04
-0,72	54,39	-8,50	10,29	-8,07	1,42E-03	-2,42E-03	-4,20E-05	-1,69E-03	4,31E-04
-0,78	56,17	-5,90	13,70	-7,86	1,40E-03	-2,50E-03	-6,52E-05	-1,78E-03	4,49E-04
-0,85	57,85	-3,40	17,02	-7,66	1,39E-03	-2,58E-03	-8,88E-05	-1,86E-03	4,68E-04
-0,92	59,44	-1,00	20,23	-7,45	1,37E-03	-2,65E-03	-0,00011254	-1,95E-03	4,87E-04
-0,99	60,92	1,30	23,35	-7,25	1,35E-03	-2,72E-03	-0,00013635	-0,00203302	5,05E-04
-1,07	62,31	3,51	26,38	-7,06	1,33E-03	-2,79E-03	-0,00016009	-0,00211533	5,24E-04
-1,14	63,60	5,61	29,30	-6,86	1,31E-03	-2,85E-03	-0,00018363	-0,00219617	5,42E-04
-1,23	64,80	7,62	32,13	-6,67	1,29E-03	-2,91E-03	-0,00020685	-0,00227539	5,61E-04
-1,31	65,89	9,53	34,85	-6,48	1,28E-03	-2,97E-03	-0,00022966	-0,00235282	5,79E-04
-1,39	66,89	11,35	37,48	-6,29	1,26E-03	-3,02E-03	-0,00025193	-0,0024283	5,98E-04
-1,48	67,78	13,06	40,02	-6,11	1,24E-03	-3,07E-03	-0,00027357	-0,0025017	6,16E-04
-1,57	68,59	14,68	42,45	-5,93	1,22E-03	-0,00311697	-0,00029449	-0,00257288	6,34E-04
-1,67	69,29	16,20	44,79	-5,75	1,20E-03	-0,00315883	-0,00031459	-0,00264169	6,53E-04
-1,76	69,89	17,62	47,02	-5,58	1,18E-03	-0,00319682	-0,00033379	-0,00270801	6,71E-04
-1,86	70,40	18,94	49,16	-5,40	1,17E-03	-0,00323093	-0,00035201	-0,00277171	6,90E-04
-1,97	70,81	20,17	51,20	-5,23	1,15E-03	-0,00326112	-0,00036917	-0,00283268	7,08E-04
-2,07	71,12	21,30	53,15	-5,07	1,13E-03	-0,00328737	-0,00038521	-0,0028908	7,27E-04
-2,18	71,33	22,32	54,99	-4,90	1,11E-03	-0,00330966	-0,00040007	-0,00294596	7,45E-04
-2,29	71,44	23,26	56,74	-4,74	1,09E-03	-0,00332798	-0,00041368	-0,00299806	7,63E-04

-2,40	71,46	24,09	58,39	-4,58	1,07E-03	-0,00334232	-0,000426	-0,003047	7,82E-04
-2,52	71,38	24,82	59,94	-4,42	1,06E-03	-0,00335269	-0,00043698	-0,00309269	8,00E-04
-2,64	71,20	25,46	61,40	-4,27	1,04E-03	-0,00335908	-0,00044658	-0,00313504	8,18E-04
-2,76	70,92	26,00	62,75	-4,12	1,02E-03	-0,00336151	-0,00045477	-0,00317398	8,37E-04
-2,88	70,55	26,44	64,01	-3,97	1,00E-03	-0,00336	-0,0004615	-0,00320942	8,55E-04
-3,01	70,07	26,78	65,17	-3,82	9,83E-04	-0,00335455	-0,00046676	-0,00324131	8,73E-04
-3,14	69,50	27,03	66,23	-3,68	9,65E-04	-0,00334521	-0,00047054	-0,00326956	8,92E-04
-3,27	68,83	27,18	67,20	-3,54	9,47E-04	-0,003332	-0,00047281	-0,00329413	9,10E-04
-3,40	68,06	27,22	68,06	-3,40	9,28E-04	-0,00331496	-0,00047357	-0,00331496	9,28E-04
-3,54	67,20	27,18	68,83	-3,27	9,10E-04	-0,00329413	-0,00047281	-0,003332	9,47E-04
-3,68	66,23	27,03	69,50	-3,14	8,92E-04	-0,00326956	-0,00047054	-0,00334521	9,65E-04
-3,82	65,17	26,78	70,07	-3,01	8,73E-04	-0,00324131	-0,00046676	-0,00335455	9,83E-04
-3,97	64,01	26,44	70,55	-2,88	8,55E-04	-0,00320942	-0,0004615	-0,00336	1,00E-03
-4,12	62,75	26,00	70,92	-2,76	8,37E-04	-0,00317398	-0,00045477	-0,00336151	1,02E-03
-4,27	61,40	25,46	71,20	-2,64	8,18E-04	-0,00313504	-0,00044658	-0,00335908	1,04E-03
-4,42	59,94	24,82	71,38	-2,52	8,00E-04	-0,00309269	-0,00043698	-0,00335269	1,06E-03
-4,58	58,39	24,09	71,46	-2,40	7,82E-04	-0,003047	-0,000426	-0,00334232	1,07E-03
-4,74	56,74	23,26	71,44	-2,29	7,63E-04	-0,00299806	-0,00041368	-0,00332798	1,09E-03
-4,90	54,99	22,32	71,33	-2,18	7,45E-04	-0,00294596	-0,00040007	-0,00330966	1,11E-03
-5,07	53,15	21,30	71,12	-2,07	7,27E-04	-0,0028908	-0,00038521	-0,00328737	1,13E-03
-5,23	51,20	20,17	70,81	-1,97	7,08E-04	-0,00283268	-0,00036917	-0,00326112	1,15E-03
-5,40	49,16	18,94	70,40	-1,86	6,90E-04	-0,00277171	-0,00035201	-0,00323093	1,17E-03
-5,58	47,02	17,62	69,89	-1,76	6,71E-04	-0,00270801	-0,00033379	-0,00319682	1,18E-03
-5,75	44,79	16,20	69,29	-1,67	6,53E-04	-0,00264169	-0,00031459	-0,00315883	1,20E-03
-5,93	42,45	14,68	68,59	-1,57	6,34E-04	-0,00257288	-0,00029449	-0,00311697	1,22E-03
-6,11	40,02	13,06	67,78	-1,48	6,16E-04	-0,0025017	-0,00027357	-3,07E-03	1,24E-03
-6,29	37,48	11,35	66,89	-1,39	5,98E-04	-0,0024283	-0,00025193	-3,02E-03	1,26E-03
-6,48	34,85	9,53	65,89	-1,31	5,79E-04	-0,00235282	-0,00022966	-2,97E-03	1,28E-03
-6,67	32,13	7,62	64,80	-1,23	5,61E-04	-0,00227539	-0,00020685	-2,91E-03	1,29E-03
-6,86	29,30	5,61	63,60	-1,14	5,42E-04	-0,00219617	-0,00018363	-2,85E-03	1,31E-03
-7,06	26,38	3,51	62,31	-1,07	5,24E-04	-0,00211533	-0,00016009	-2,79E-03	1,33E-03
-7,25	23,35	1,30	60,92	-0,99	5,05E-04	-0,00203302	-0,00013635	-2,72E-03	1,35E-03
-7,45	20,23	-1,00	59,44	-0,92	4,87E-04	-1,95E-03	-0,00011254	-2,65E-03	1,37E-03
-7,66	17,02	-3,40	57,85	-0,85	4,68E-04	-1,86E-03	-8,88E-05	-2,58E-03	1,39E-03
-7,86	13,70	-5,90	56,17	-0,78	4,49E-04	-1,78E-03	-6,52E-05	-2,50E-03	1,40E-03
-8,07	10,29	-8,50	54,39	-0,72	4,31E-04	-1,69E-03	-4,20E-05	-2,42E-03	1,42E-03
-8,28	6,77	-11,19	52,51	-0,66	4,12E-04	-1,61E-03	-1,92E-05	-2,33E-03	1,44E-03
-8,50	3,16	-13,99	50,54	-0,60	3,94E-04	-1,52E-03	2,89E-06	-2,25E-03	1,46E-03
-8,71	-0,54	-16,88	48,46	-0,54	3,75E-04	-1,43E-03	2,42E-05	-2,16E-03	1,48E-03
-8,93	-4,35	-19,87	46,29	-0,49	3,57E-04	-1,34E-03	4,47E-05	-2,07E-03	1,50E-03
-9,15	-8,25	-22,96	44,02	-0,44	3,38E-04	-1,26E-03	6,40E-05	-1,97E-03	1,51E-03
-9,38	-12,26	-26,14	41,65	-0,39	3,19E-04	-1,17E-03	8,20E-05	-1,87E-03	1,53E-03
-9,60	-16,36	-29,42	39,18	-0,35	3,01E-04	-1,08E-03	9,86E-05	-1,78E-03	1,55E-03

-9,84	-20,55	-32,81	36,62	-0,31	2,82E-04	-9,97E-04	0,00011351	-1,67E-03	1,57E-03
-10,07	-24,85	-36,29	33,96	-0,27	2,63E-04	-9,13E-04	1,27E-04	-1,57E-03	1,59E-03
-10,30	-29,25	-39,86	31,19	-0,23	2,45E-04	-8,31E-04	1,38E-04	-1,46E-03	1,60E-03
-10,54	-33,74	-43,54	28,34	-0,20	2,26E-04	-7,50E-04	1,47E-04	-1,36E-03	1,62E-03
-10,78	-38,33	-47,31	25,38	-0,16	2,07E-04	-6,70E-04	1,53E-04	-1,25E-03	1,64E-03
-11,03	-43,02	-51,18	22,32	-0,14	1,88E-04	-5,93E-04	1,57E-04	-1,14E-03	1,66E-03
-11,27	-47,80	-55,15	19,17	-0,11	1,70E-04	-5,19E-04	1,58E-04	-1,03E-03	1,68E-03
-11,52	-52,69	-59,22	15,92	-0,09	1,51E-04	-4,47E-04	1,56E-04	-9,15E-04	1,70E-03
-11,77	-57,67	-63,39	12,57	-0,07	1,32E-04	-3,77E-04	1,50E-04	-8,02E-04	1,71E-03
-12,03	-62,75	-67,65	9,13	-0,05	1,13E-04	-3,12E-04	1,41E-04	-6,88E-04	1,73E-03
-12,29	-67,93	-72,01	5,58	-0,03	9,45E-05	-2,49E-04	1,29E-04	-5,73E-04	1,75E-03
-12,55	-73,20	-76,47	1,94	-0,02	7,56E-05	-1,91E-04	1,12E-04	-4,58E-04	1,77E-03
-12,81	-78,58	-81,03	-1,80	-0,01	5,67E-05	-1,36E-04	9,10E-05	-3,43E-04	1,79E-03
-13,07	-84,05	-85,68	-5,64	-0,01	3,78E-05	-8,60E-05	6,55E-05	-2,29E-04	1,81E-03
-13,34	-89,62	-90,44	-9,58	0,00	1,89E-05	-4,05E-05	3,53E-05	-1,14E-04	1,82E-03
-13,61	-95,29	-95,29	-13,61	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,84E-03

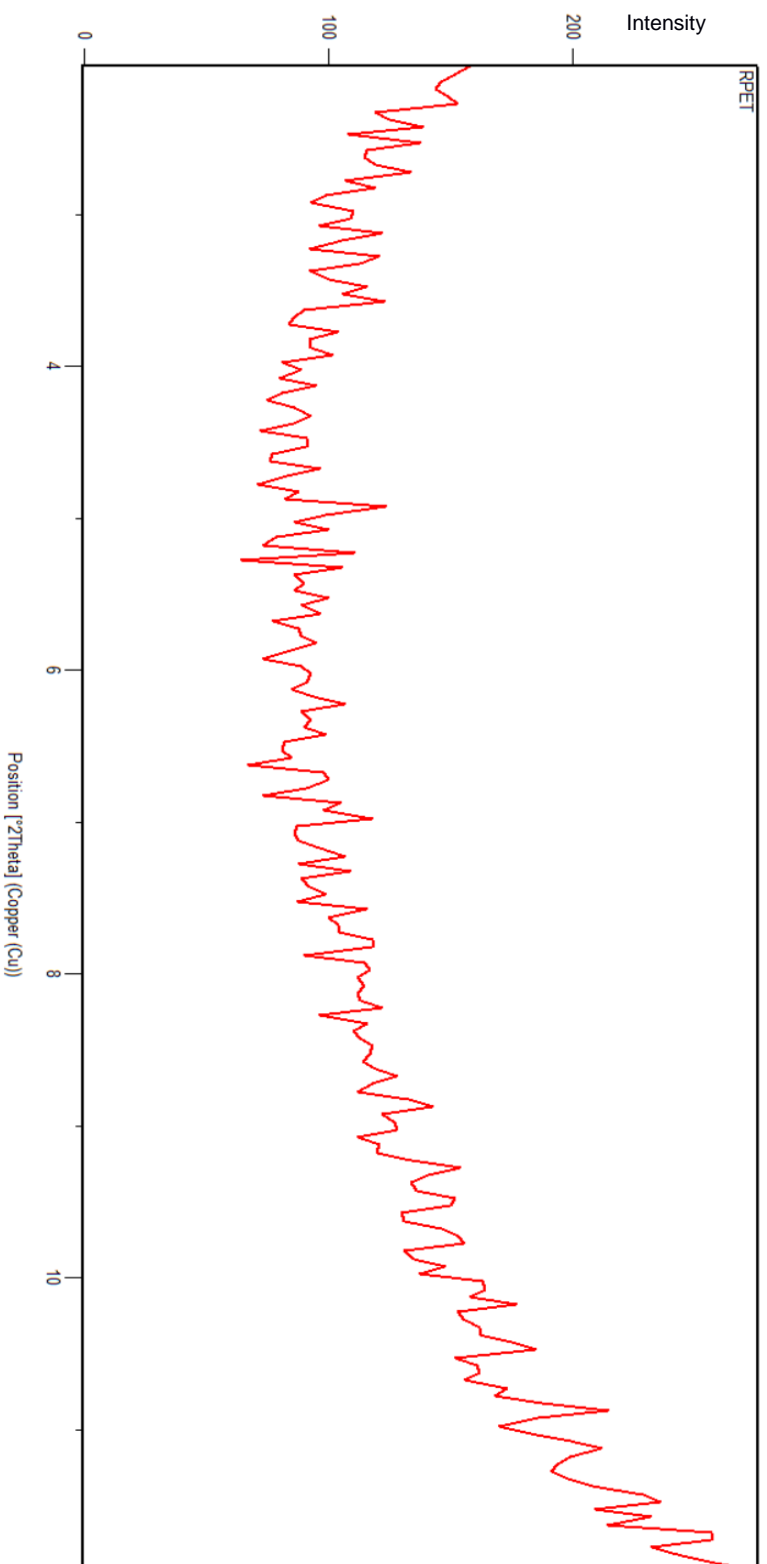
**Tabla B.6 Momentos y deflexiones para distancia entre correas de 1000 mm**

Momento Me (Nm)			Deflexiones (m)		
4,78	-115,01	-113,80	-2,08E-04	6,52E-05	-7,34E-05
9,44	-109,14	-106,72	-4,15E-04	1,23E-04	-1,55E-04
13,98	-103,39	-99,76	-6,22E-04	1,72E-04	-2,43E-04
18,39	-97,77	-92,93	-8,28E-04	2,15E-04	-3,38E-04
22,69	-92,26	-86,21	-1,03E-03	2,51E-04	-4,40E-04
26,86	-86,88	-79,62	-1,24E-03	2,81E-04	-5,48E-04
30,92	-81,61	-73,14	-1,44E-03	3,04E-04	-6,61E-04
34,85	-76,47	-66,79	-1,64E-03	3,22E-04	-7,79E-04
38,66	-71,45	-60,56	-1,83E-03	3,35E-04	-9,02E-04
42,35	-66,55	-54,45	-2,03E-03	3,43E-04	-1,03E-03
45,92	-61,77	-48,46	-2,22E-03	3,46E-04	-1,16E-03
49,37	-57,11	-42,59	-2,41E-03	3,45E-04	-1,29E-03
52,70	-52,57	-36,84	-2,59E-03	3,41E-04	-1,43E-03
55,90	-48,16	-31,22	-2,77E-03	3,32E-04	-1,57E-03
58,99	-43,86	-25,71	-2,95E-03	3,20E-04	-1,71E-03
61,95	-39,69	-20,33	-3,12E-03	3,05E-04	-1,86E-03
64,80	-35,63	-15,06	-3,29E-03	2,88E-04	-2,00E-03
67,52	-31,70	-9,92	-3,45E-03	2,68E-04	-2,15E-03
70,12	-27,89	-4,90	-3,61E-03	2,46E-04	-2,29E-03
72,60	-24,20	0,00	-3,77E-03	2,22E-04	-2,44E-03
74,96	-20,63	4,78	-3,92E-03	1,96E-04	-2,59E-03
77,20	-17,18	9,44	-4,06E-03	1,69E-04	-2,73E-03

79,32	-13,85	13,98	-4,20E-03	1,41E-04	-2,88E-03
81,31	-10,65	18,39	-4,34E-03	1,11E-04	-3,02E-03
83,19	-7,56	22,69	-4,47E-03	8,12E-05	-3,17E-03
84,94	-4,60	26,86	-4,59E-03	5,07E-05	-3,31E-03
86,58	-1,75	30,92	-4,71E-03	1,98E-05	-3,45E-03
88,09	0,97	34,85	-4,82E-03	-1,12E-05	-3,59E-03
89,48	3,57	38,66	-4,92E-03	-4,21E-05	-3,72E-03
90,75	6,05	42,35	-5,02E-03	-7,28E-05	-3,86E-03
91,90	8,41	45,92	-5,11E-03	-0,00010301	-3,99E-03
92,93	10,65	49,37	-5,20E-03	-0,00013269	-4,11E-03
93,84	12,77	52,70	-5,28E-03	-0,00016163	-4,24E-03
94,62	14,76	55,90	-5,35E-03	-0,0001897	-4,36E-03
95,29	16,64	58,99	-5,42E-03	-0,00021675	-4,47E-03
95,83	18,39	61,95	-5,48E-03	-0,00024267	-4,59E-03
96,26	20,03	64,80	-5,53E-03	-0,00026731	-4,69E-03
96,56	21,54	67,52	-5,58E-03	-0,00029059	-4,80E-03
96,74	22,93	70,12	-5,62E-03	-0,00031238	-4,90E-03
96,80	24,20	72,60	-5,65E-03	-0,0003326	-4,99E-03
96,74	25,35	74,96	-5,68E-03	-0,00035116	-5,08E-03
96,56	26,38	77,20	-5,70E-03	-0,00036797	-5,16E-03
96,26	27,29	79,32	-5,72E-03	-0,00038298	-5,24E-03
95,83	28,07	81,31	-5,72E-03	-0,0003961	-5,31E-03
95,29	28,74	83,19	-5,72E-03	-0,00040731	-5,38E-03
94,62	29,28	84,94	-5,72E-03	-0,00041653	-5,44E-03
93,84	29,71	86,58	-5,71E-03	-0,00042375	-5,50E-03
92,93	30,01	88,09	-5,69E-03	-0,00042892	-5,55E-03
91,90	30,19	89,48	-5,66E-03	-0,00043203	-5,59E-03
90,75	30,25	90,75	-5,63E-03	-0,00043307	-5,63E-03
89,48	30,19	91,90	-5,59E-03	-0,00043203	-5,66E-03
88,09	30,01	92,93	-5,55E-03	-0,00042892	-5,69E-03
86,58	29,71	93,84	-5,50E-03	-0,00042375	-5,71E-03
84,94	29,28	94,62	-5,44E-03	-0,00041653	-5,72E-03
83,19	28,74	95,29	-5,38E-03	-0,00040731	-5,72E-03
81,31	28,07	95,83	-5,31E-03	-0,0003961	-5,72E-03
79,32	27,29	96,26	-5,24E-03	-0,00038298	-5,72E-03
77,20	26,38	96,56	-5,16E-03	-0,00036797	-5,70E-03
74,96	25,35	96,74	-5,08E-03	-0,00035116	-5,68E-03
72,60	24,20	96,80	-4,99E-03	-0,0003326	-5,65E-03
70,12	22,93	96,74	-4,90E-03	-0,00031238	-5,62E-03
67,52	21,54	96,56	-4,80E-03	-0,00029059	-5,58E-03
64,80	20,03	96,26	-4,69E-03	-0,00026731	-5,53E-03
61,95	18,39	95,83	-4,59E-03	-0,00024267	-5,48E-03
58,99	16,64	95,29	-4,47E-03	-0,00021675	-5,42E-03

55,90	14,76	94,62	-4,36E-03	-0,0001897	-5,35E-03
52,70	12,77	93,84	-4,24E-03	-1,62E-04	-5,28E-03
49,37	10,65	92,93	-4,11E-03	-1,33E-04	-5,20E-03
45,92	8,41	91,90	-3,99E-03	-1,03E-04	-5,11E-03
42,35	6,05	90,75	-3,86E-03	-7,28E-05	-5,02E-03
38,66	3,57	89,48	-3,72E-03	-4,21E-05	-4,92E-03
34,85	0,97	88,09	-3,59E-03	-1,12E-05	-4,82E-03
30,92	-1,75	86,58	-3,45E-03	1,98E-05	-4,71E-03
26,86	-4,60	84,94	-3,31E-03	5,07E-05	-4,59E-03
22,69	-7,56	83,19	-3,17E-03	8,12E-05	-4,47E-03
18,39	-10,65	81,31	-3,02E-03	1,11E-04	-4,34E-03
13,98	-13,85	79,32	-2,88E-03	1,41E-04	-4,20E-03
9,44	-17,18	77,20	-2,73E-03	1,69E-04	-4,06E-03
4,78	-20,63	74,96	-2,59E-03	1,96E-04	-3,92E-03
0,00	-24,20	72,60	-2,44E-03	2,22E-04	-3,77E-03
-4,90	-27,89	70,12	-2,29E-03	2,46E-04	-3,61E-03
-9,92	-31,70	67,52	-2,15E-03	2,68E-04	-3,45E-03
-15,06	-35,63	64,80	-2,00E-03	2,88E-04	-3,29E-03
-20,33	-39,69	61,95	-1,86E-03	3,05E-04	-3,12E-03
-25,71	-43,86	58,99	-1,71E-03	3,20E-04	-2,95E-03
-31,22	-48,16	55,90	-1,57E-03	3,32E-04	-2,77E-03
-36,84	-52,57	52,70	-1,43E-03	3,41E-04	-2,59E-03
-42,59	-57,11	49,37	-1,29E-03	3,45E-04	-2,41E-03
-48,46	-61,77	45,92	-1,16E-03	3,46E-04	-2,22E-03
-54,45	-66,55	42,35	-1,03E-03	3,43E-04	-2,03E-03
-60,56	-71,45	38,66	-9,02E-04	3,35E-04	-1,83E-03
-66,79	-76,47	34,85	-7,79E-04	3,22E-04	-1,64E-03
-73,14	-81,61	30,92	-6,61E-04	3,04E-04	-1,44E-03
-79,62	-86,88	26,86	-5,48E-04	2,81E-04	-1,24E-03
-86,21	-92,26	22,69	-4,40E-04	2,51E-04	-1,03E-03
-92,93	-97,77	18,39	-3,38E-04	2,15E-04	-8,28E-04
-99,76	-103,39	13,98	-2,43E-04	1,72E-04	-6,22E-04
-106,72	-109,14	9,44	-1,55E-04	1,23E-04	-4,15E-04
-113,80	-115,01	4,78	-7,34E-05	6,52E-05	-2,08E-04
-121,00	-121,00	0,00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

**APÉNDICE C**  
**DIFRACTOMETRÍA DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON**  
**rPET/rHDPE**



**Figura C.1** Difractograma del material puro rPET

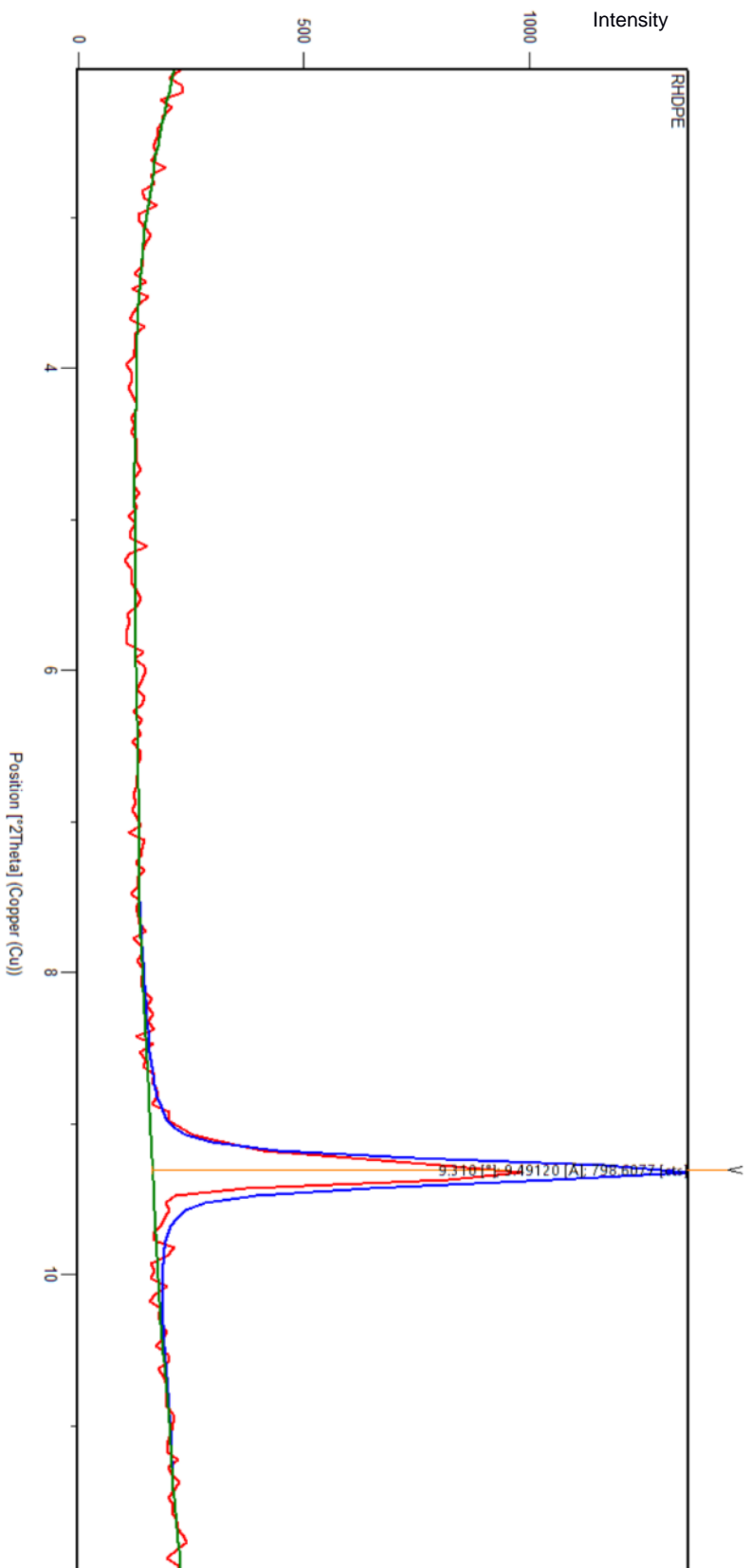
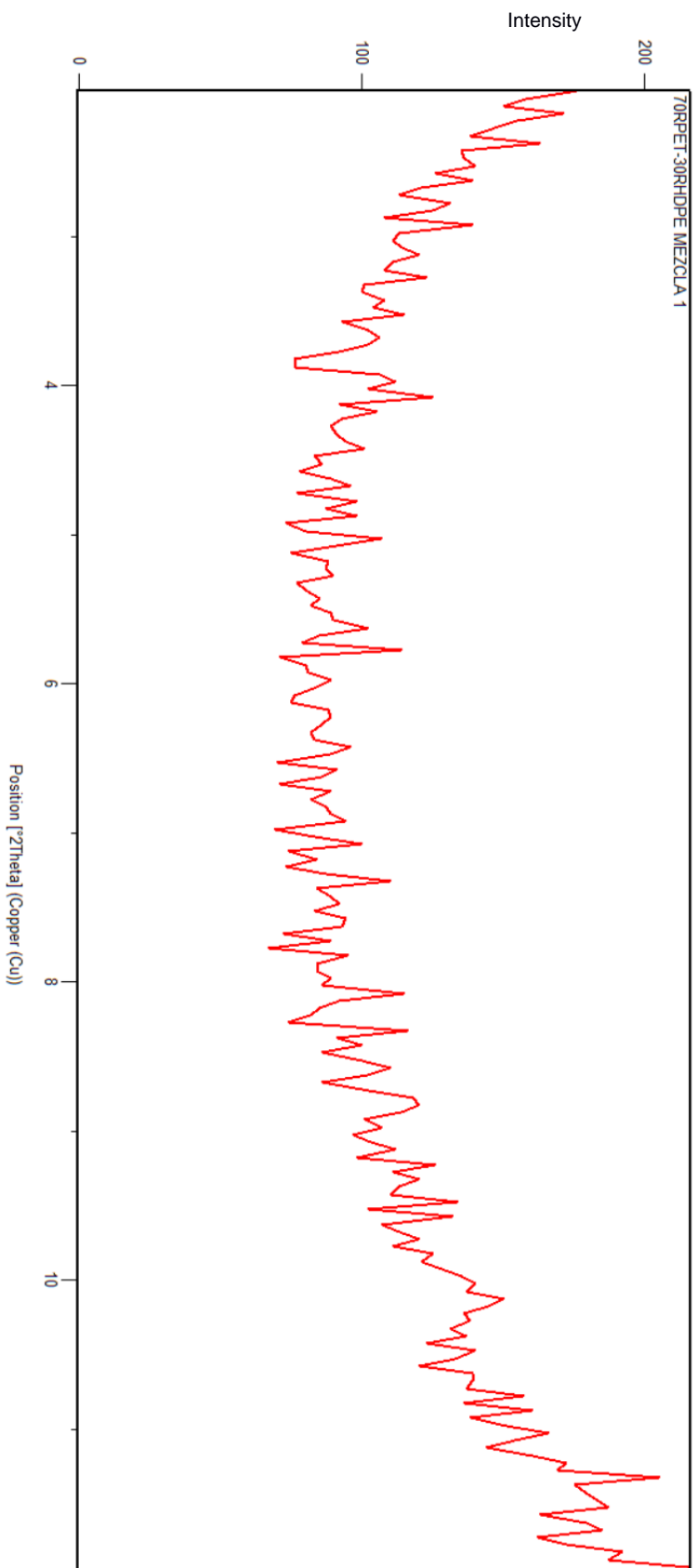
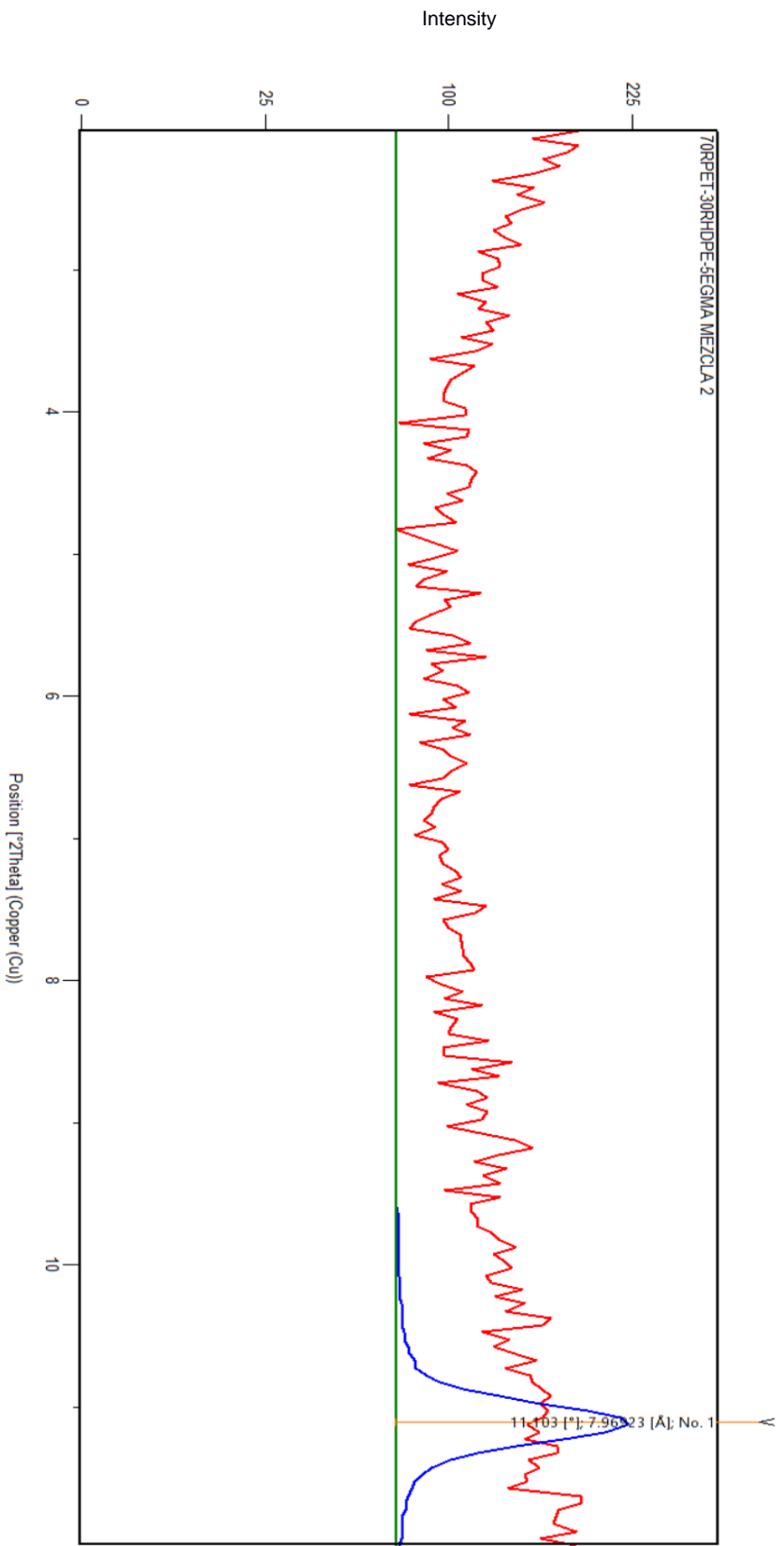


Figura C.2 Difractograma del material puro rHDPE





**Figura C.3** Difractograma de la mezcla 1 : 100rPET/30rHDPE



**Figura C.4** Difractograma de la mezcla 2: 100rPET/30rHDPE/5EGMA

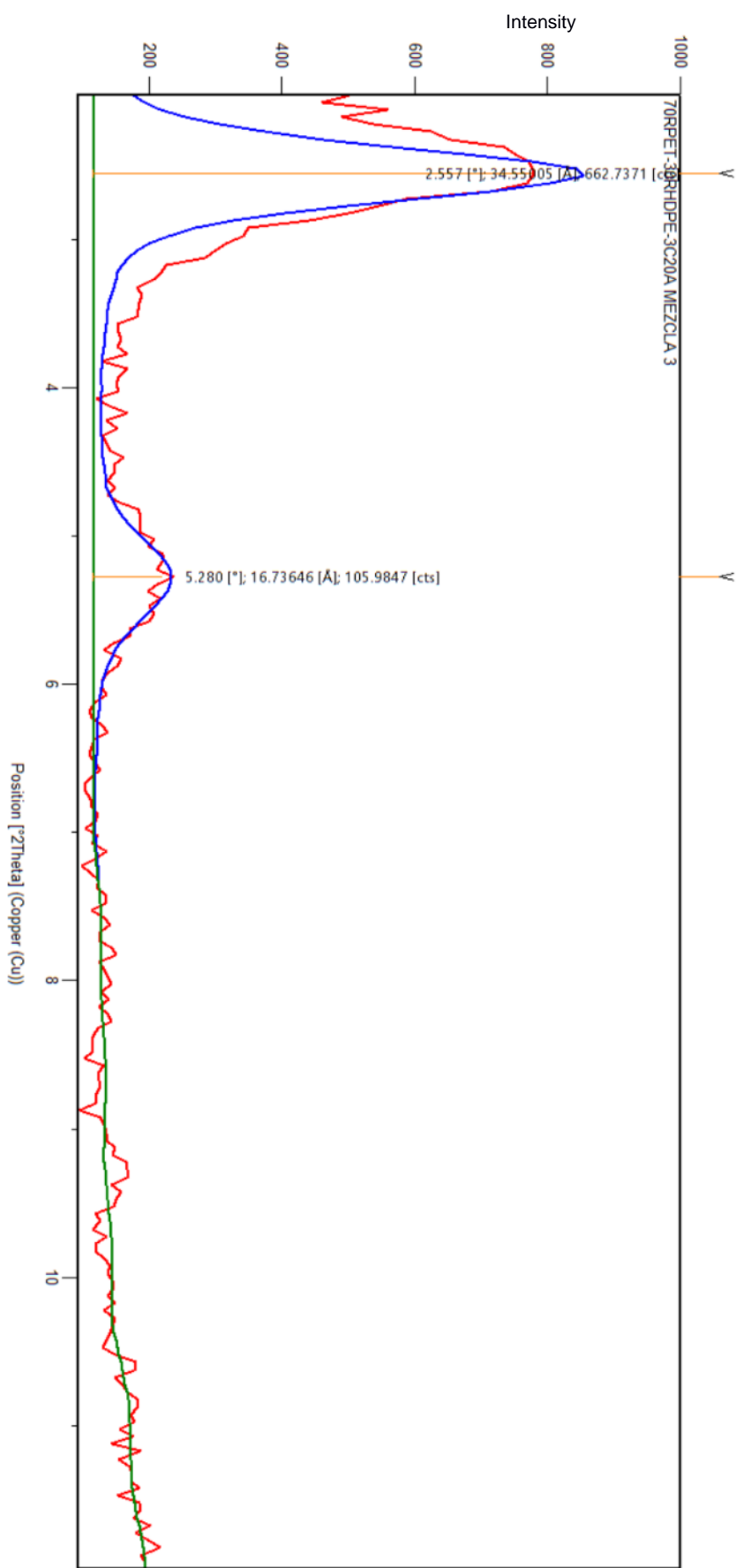


Figura C.5 Difractograma de la mezcla 3: 100rPET/30rHDPE/3C20A

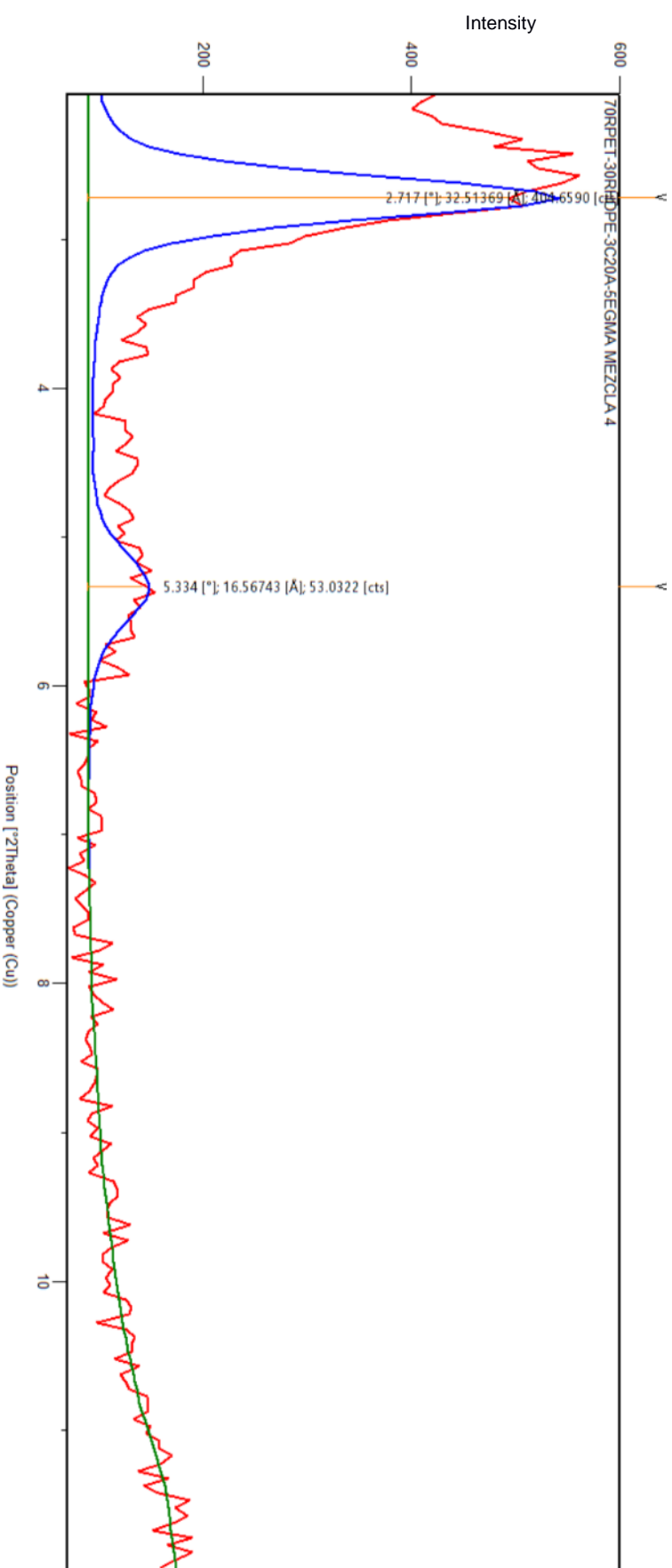
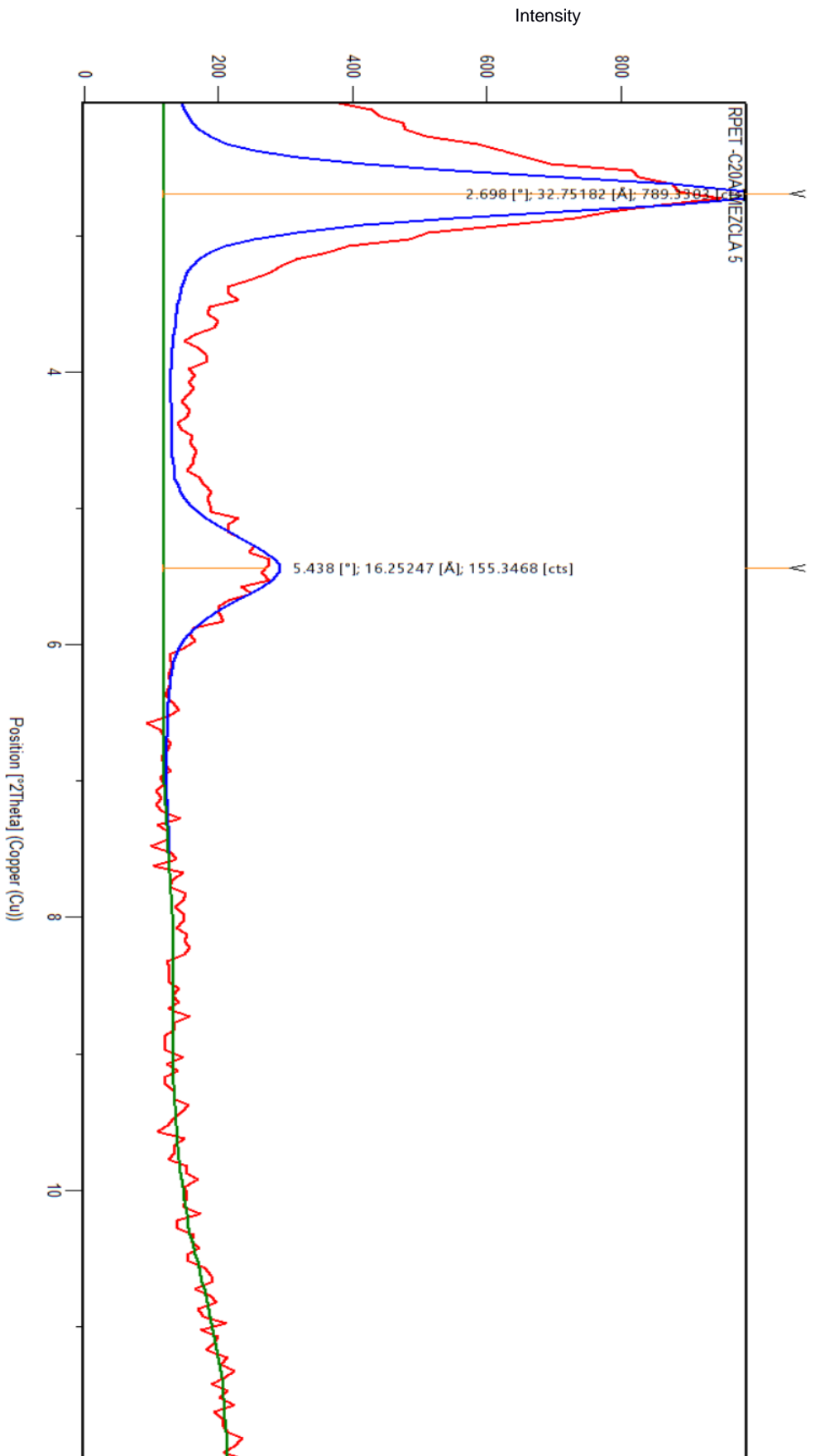


Figura C.6 Difractograma de la mezcla 4: 100RPE1/30R3HDPE/3C20A/5EGMA



FiguraC.7 Difractograma de la mezcla 5: 100rPET/3C20A

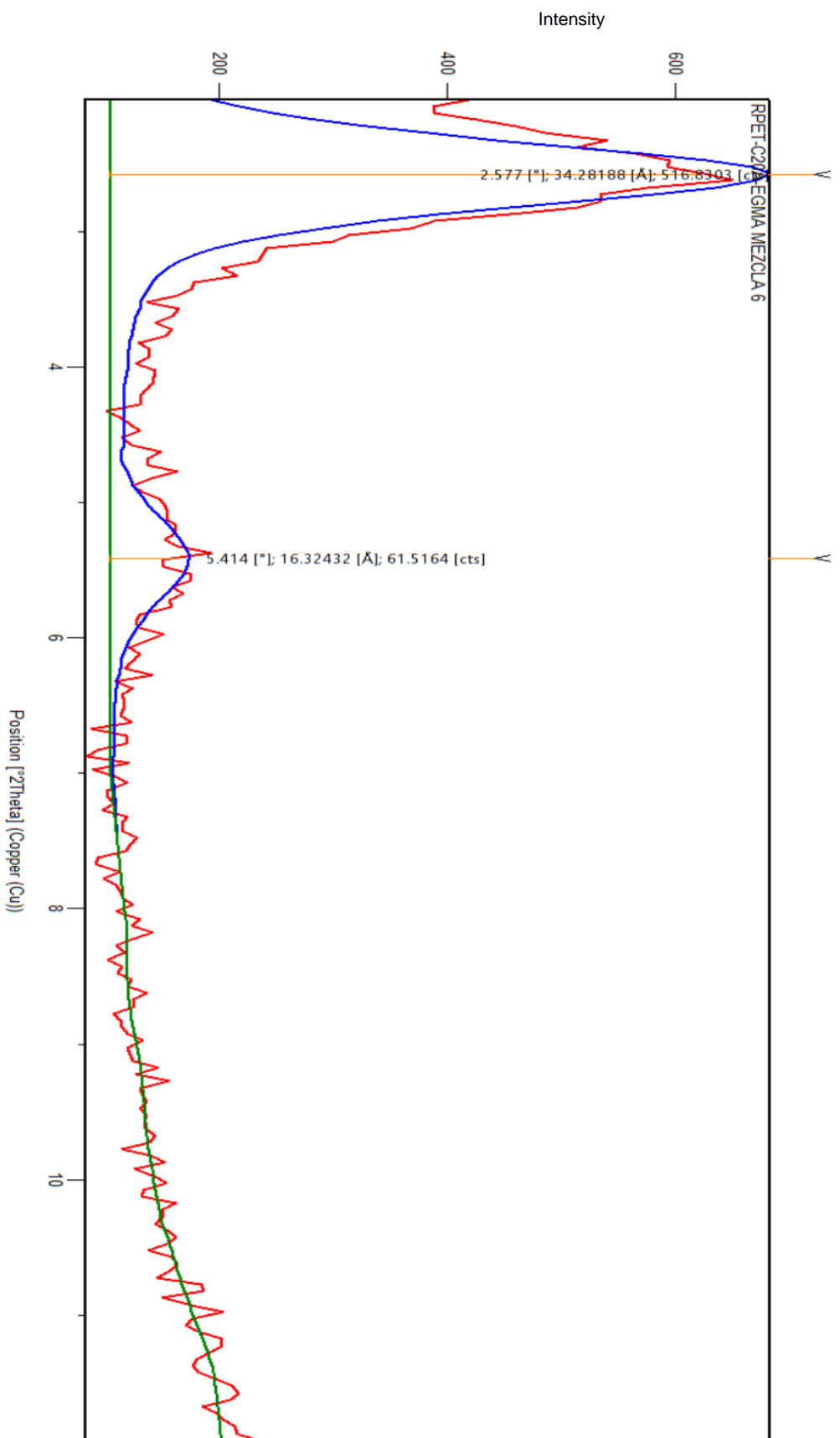


Figura C.8 Difractograma de la mezcla 6: 100rPET/3cC20A/5EGMA

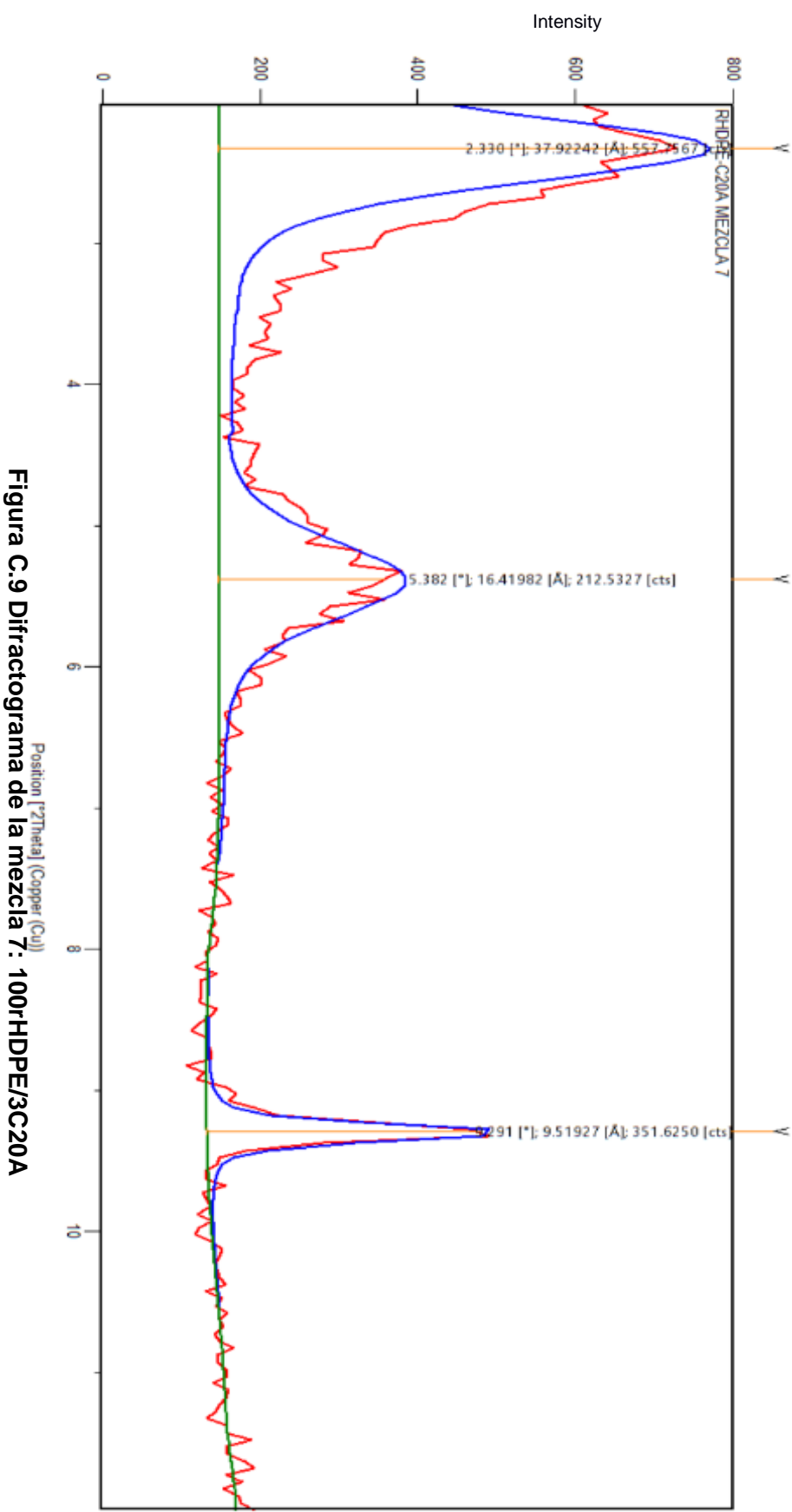


Figura C.9 Difractograma de la mezcla 7: 100rHDPE/30C20A

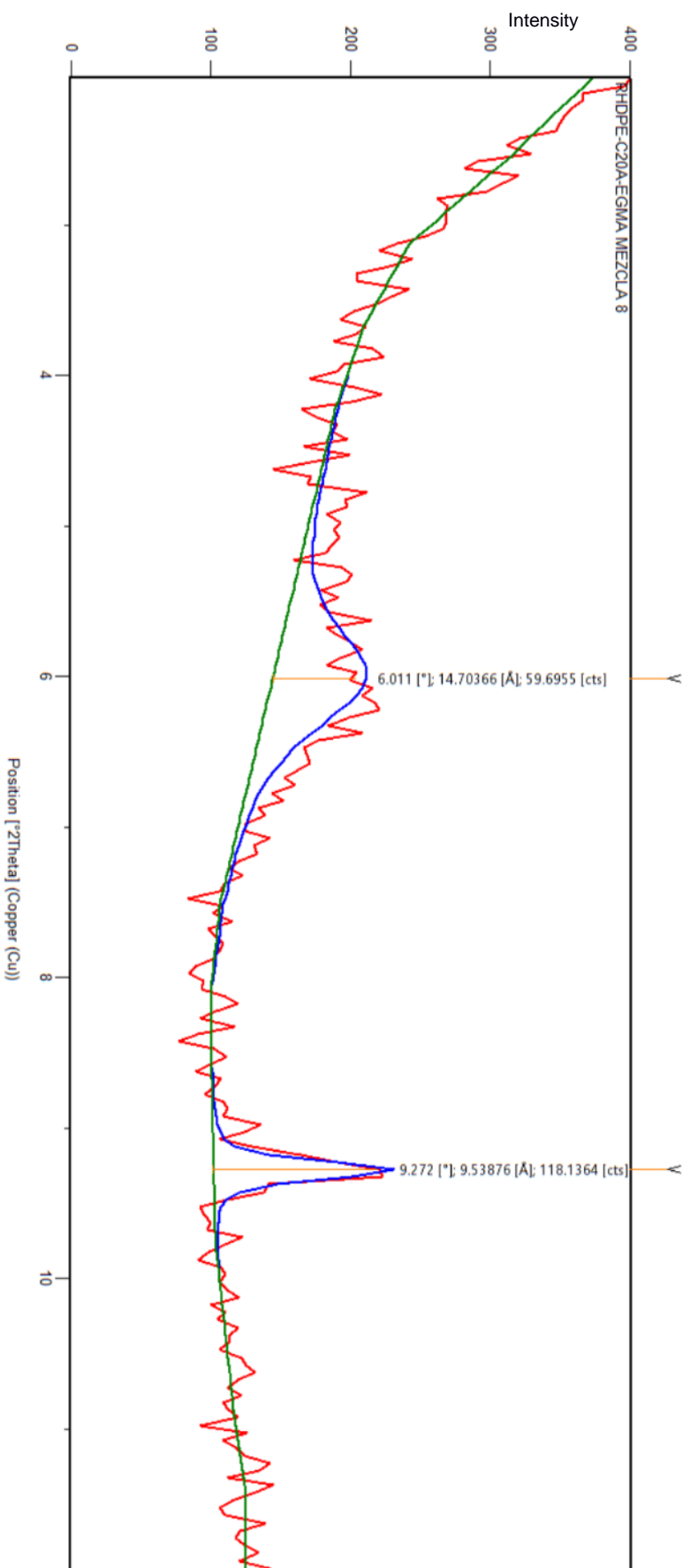
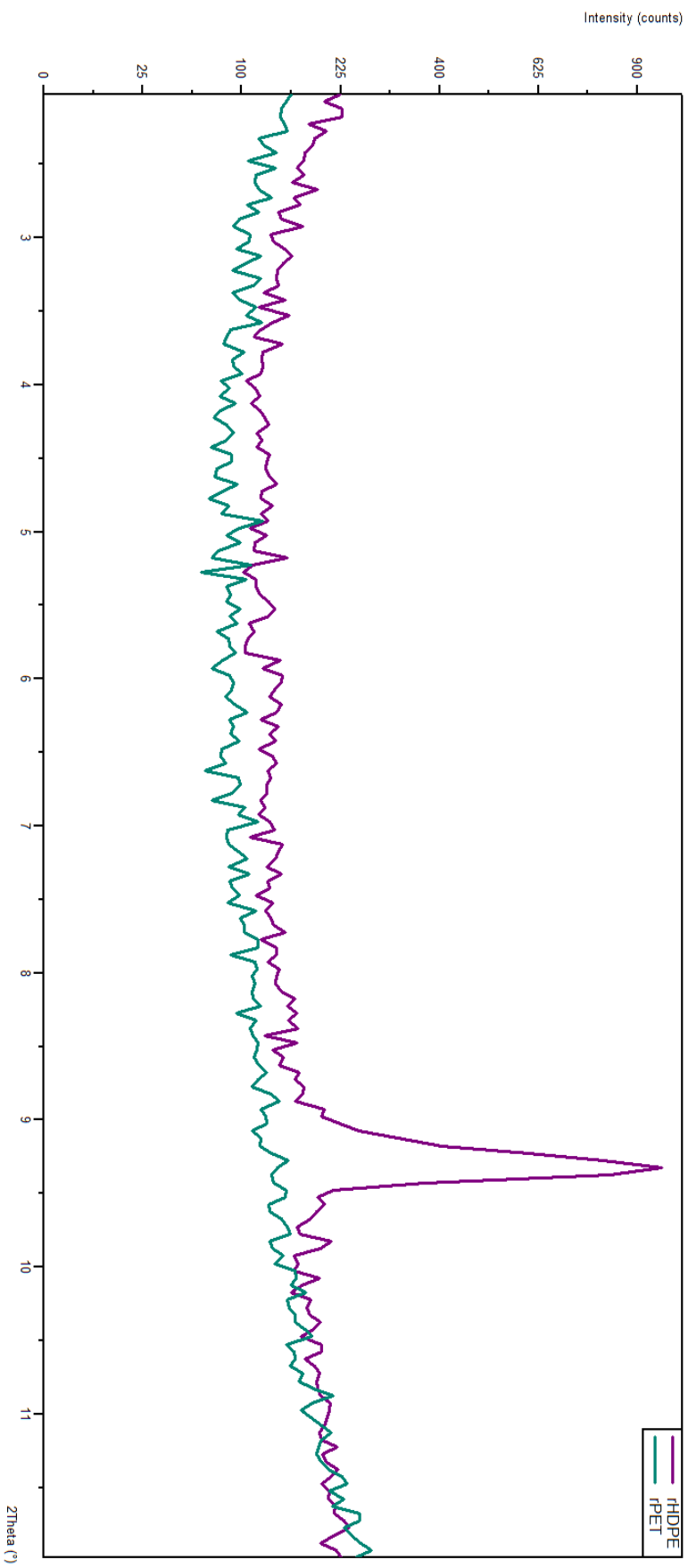
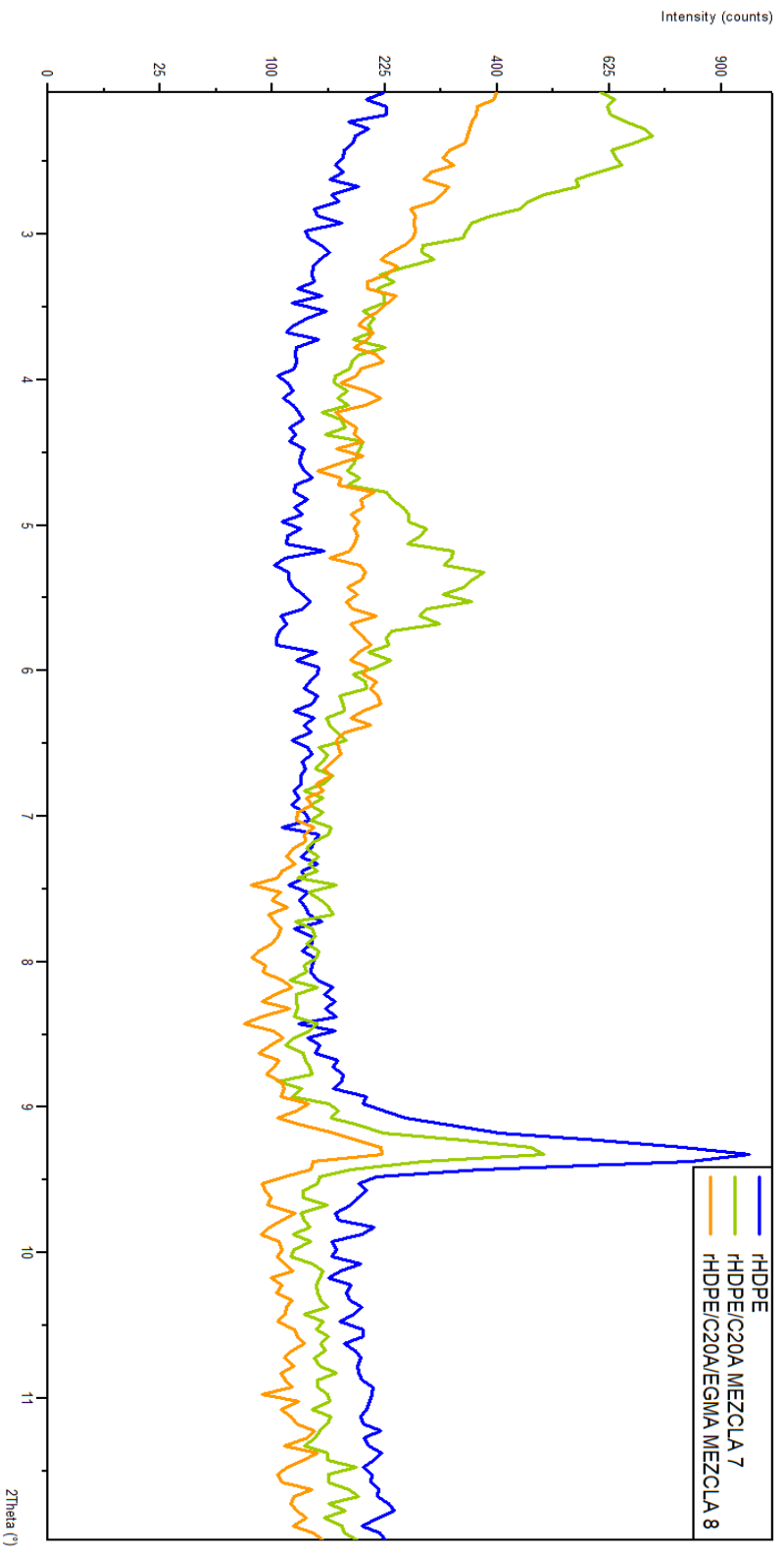


Figura C. 10 Difractograma de la mezcla 8: 100rHDPE/3C20A/5EGMA

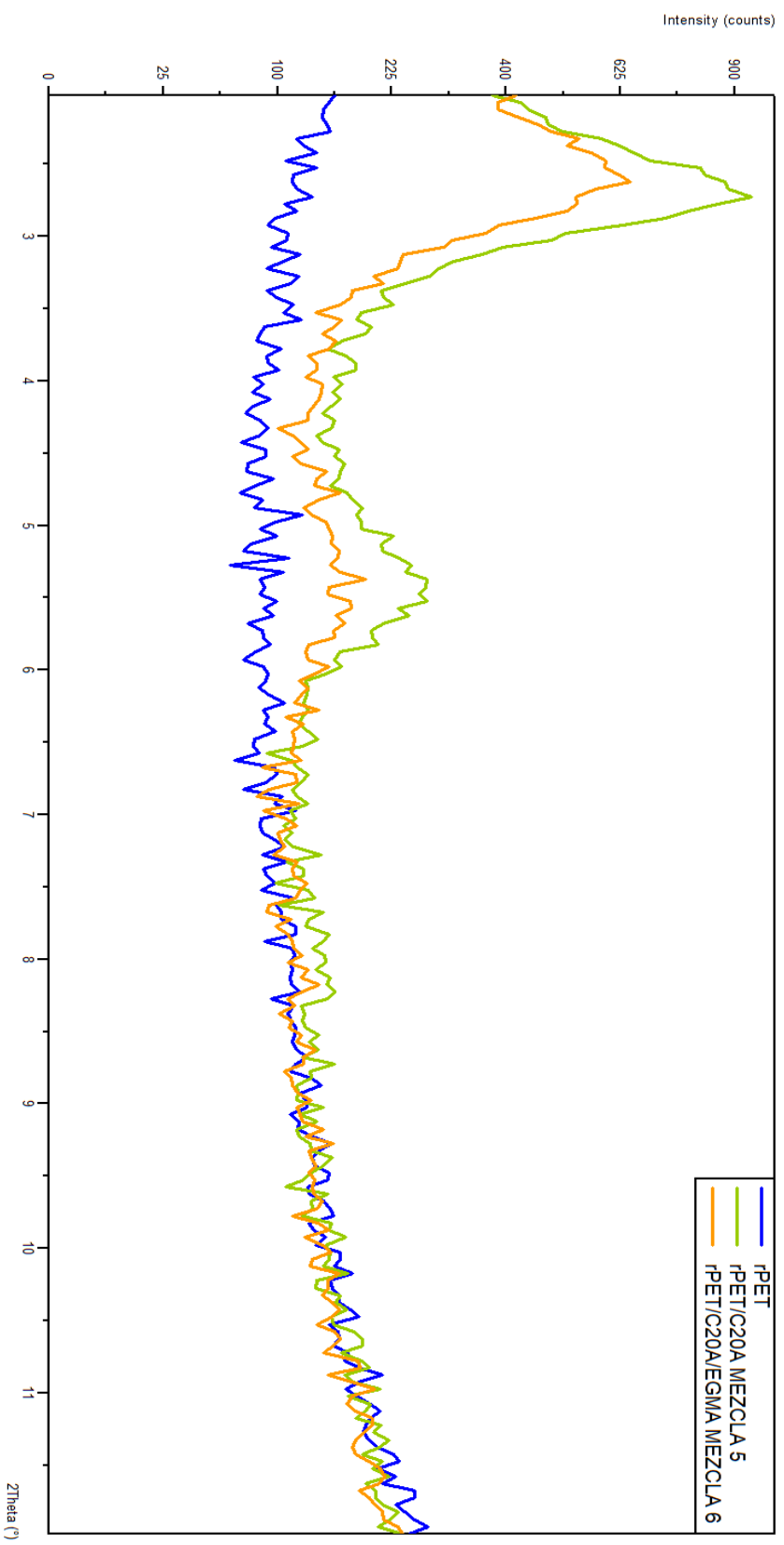




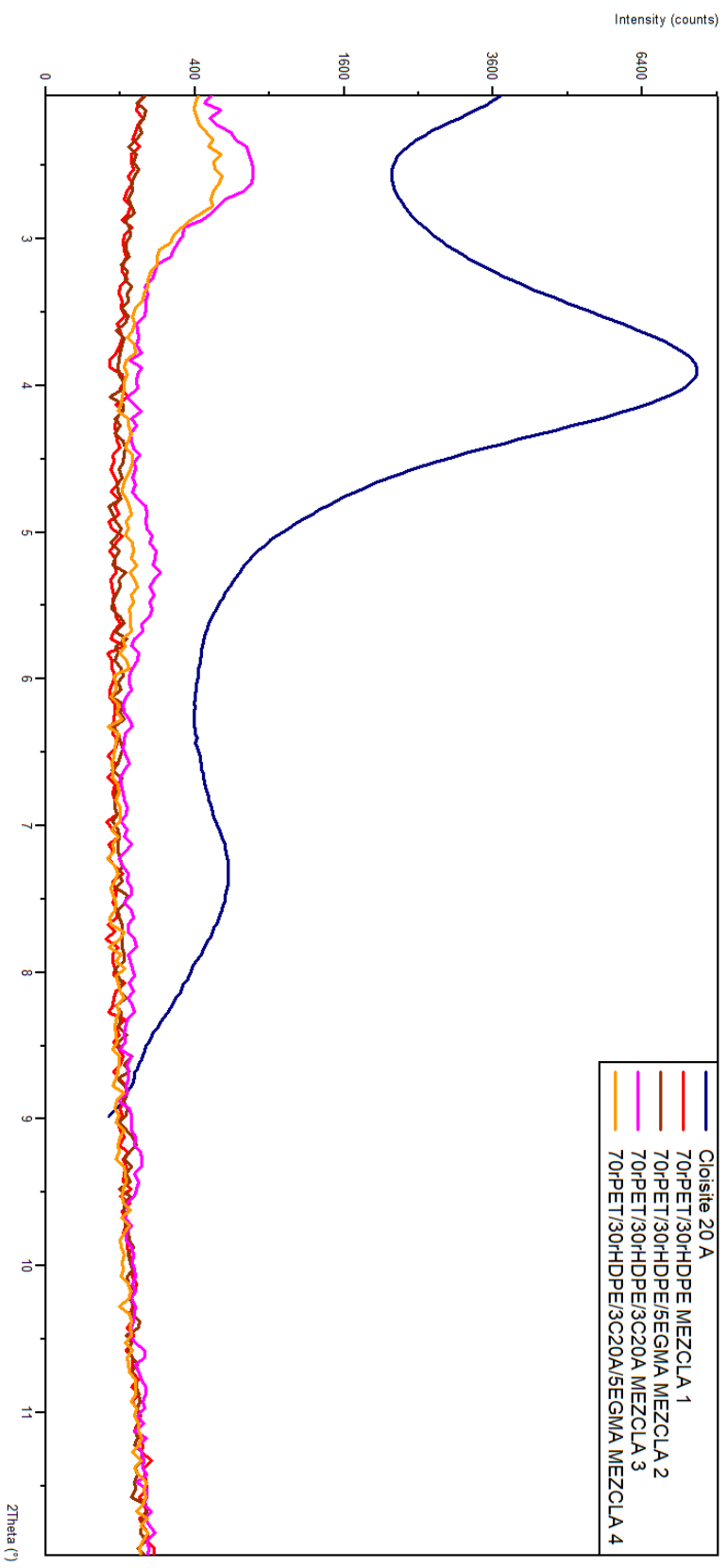
**Figura C.11** Difractogramas superpuestos de los materiales puros



**Figura C.12** Difractogramas superpuestos de las mezclas 7 y 8 en referencia con el difractograma del material puro rHDPE.



**Figura C.13** Difractogramas superpuestos de las mezclas 5 y 6 en referencia con el difractograma del rPET



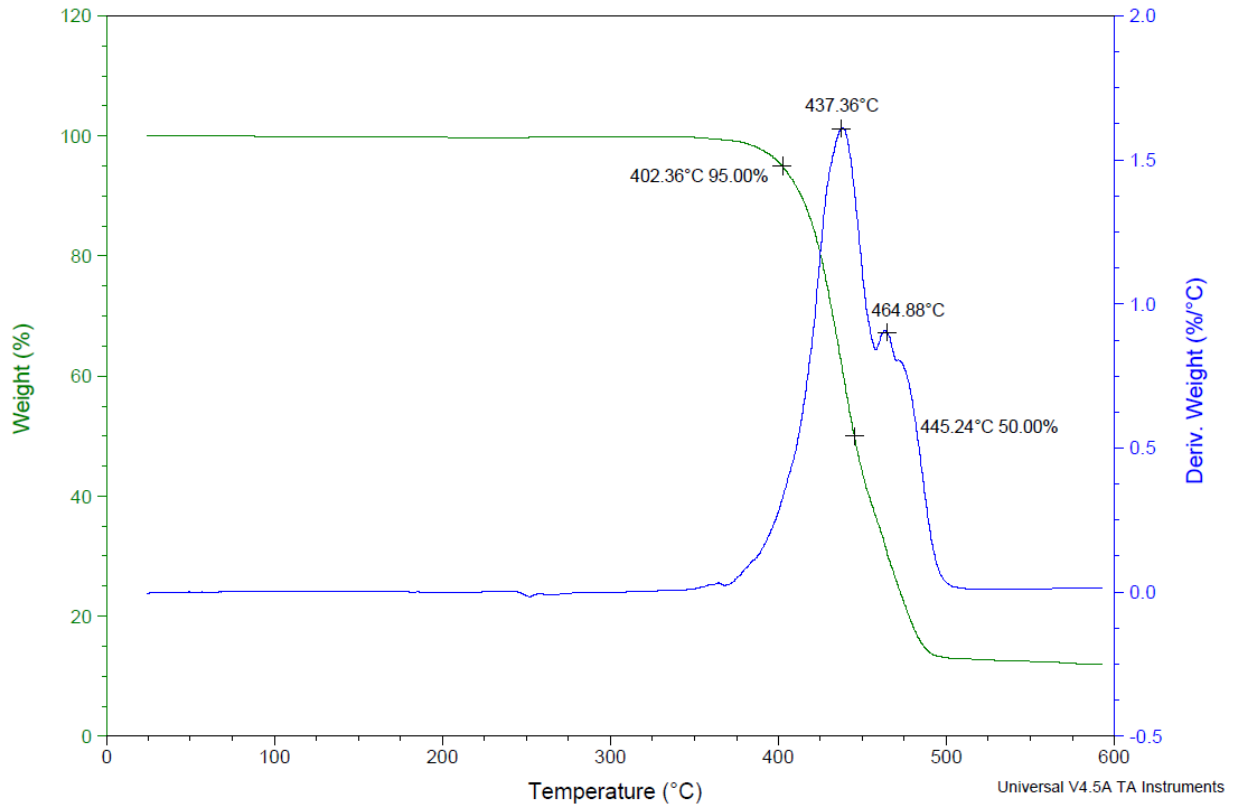
**Figura C.14** Difractogramas superpuestos de las mezclas 1,2,3, y 4 en referencia con el difractograma de la organoarcilla Cloisite 20A

**APÉNDICE D**  
**TERMOGRAMAS TGA DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON**  
**rPET/rHDPE**

Sample: Mezcla 1  
Size: 10.7840 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 1.001  
Operator: CY  
Run Date: 18-Jan-2018 11:24  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

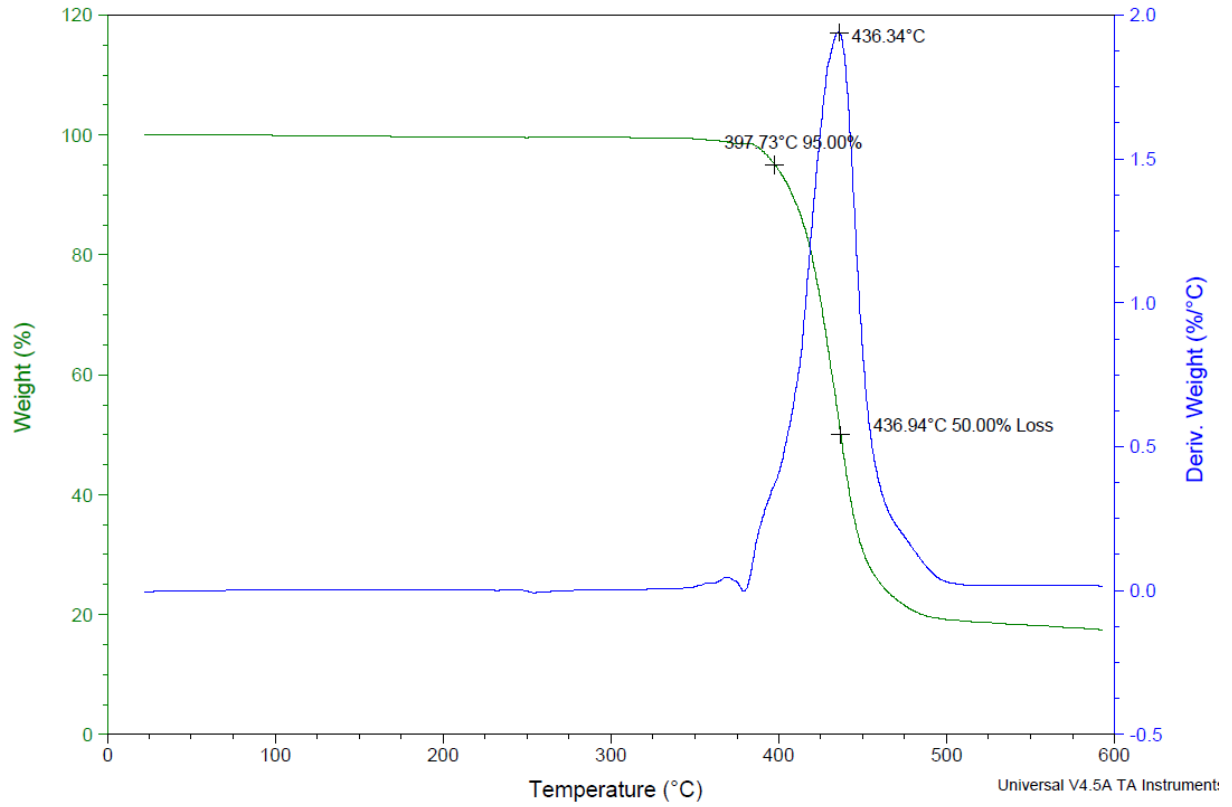


**Figura D.1. Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE**

Sample: Mezcla 2  
Size: 10.1850 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 2.001  
Operator: CY  
Run Date: 19-Jan-2018 07:12  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

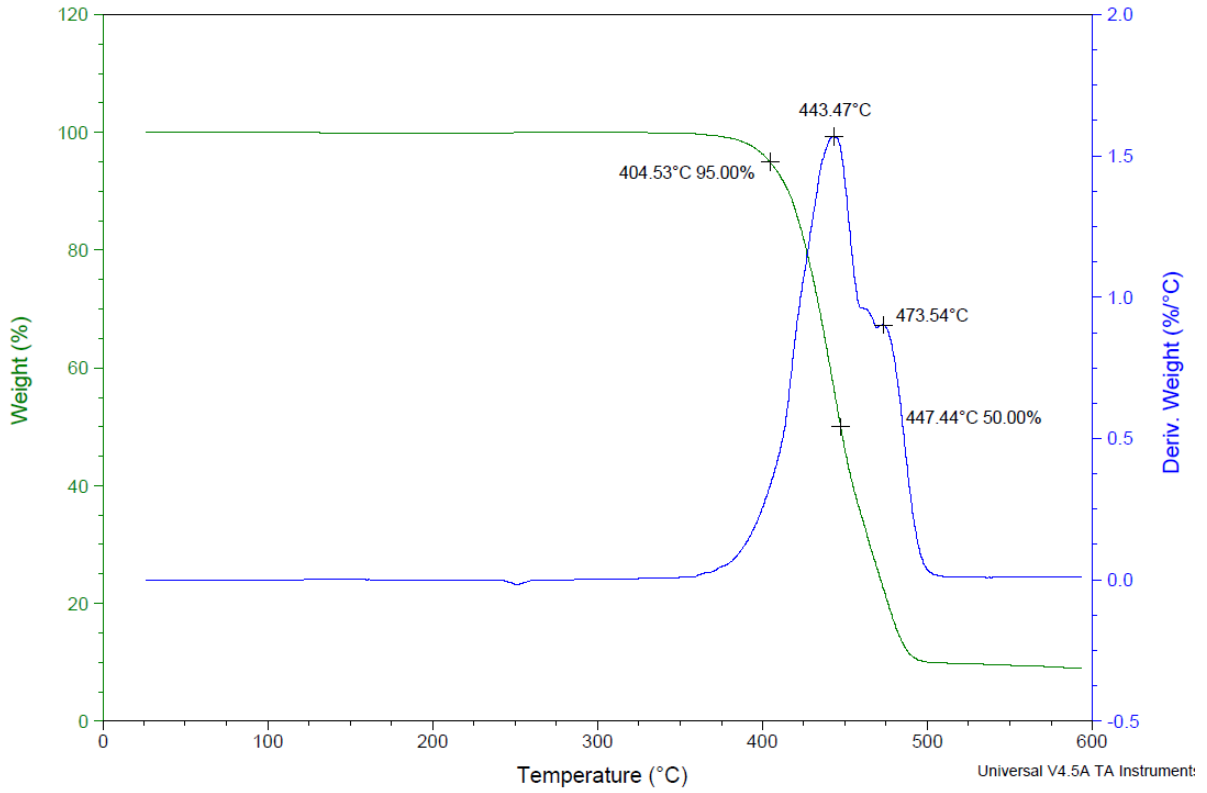


**Figura D.2. Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 2: 70rPET/30rHDPE/5EGMA**

Sample: Mezcla 3  
Size: 10.3220 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 3.001  
Operator: CY  
Run Date: 19-Jan-2018 09:09  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15



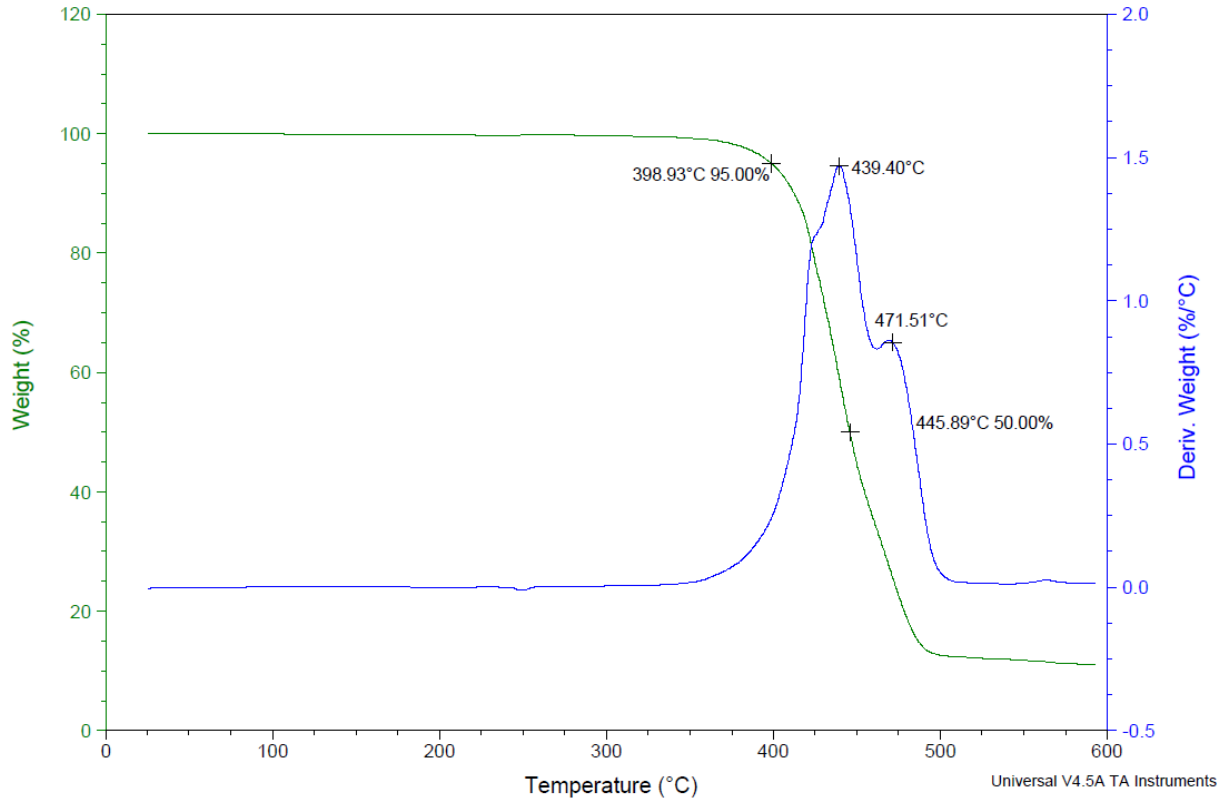
**Figura D.3 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A**



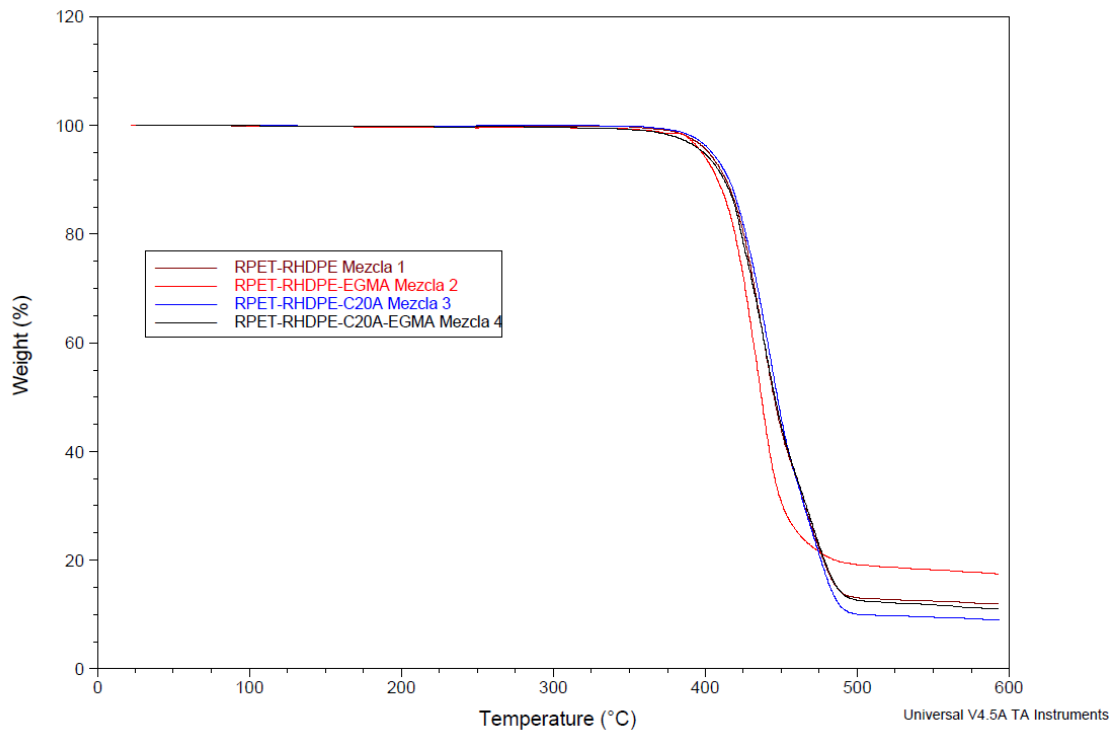
Sample: Mezcla 4  
Size: 10.3800 mg

### DSC-TGA

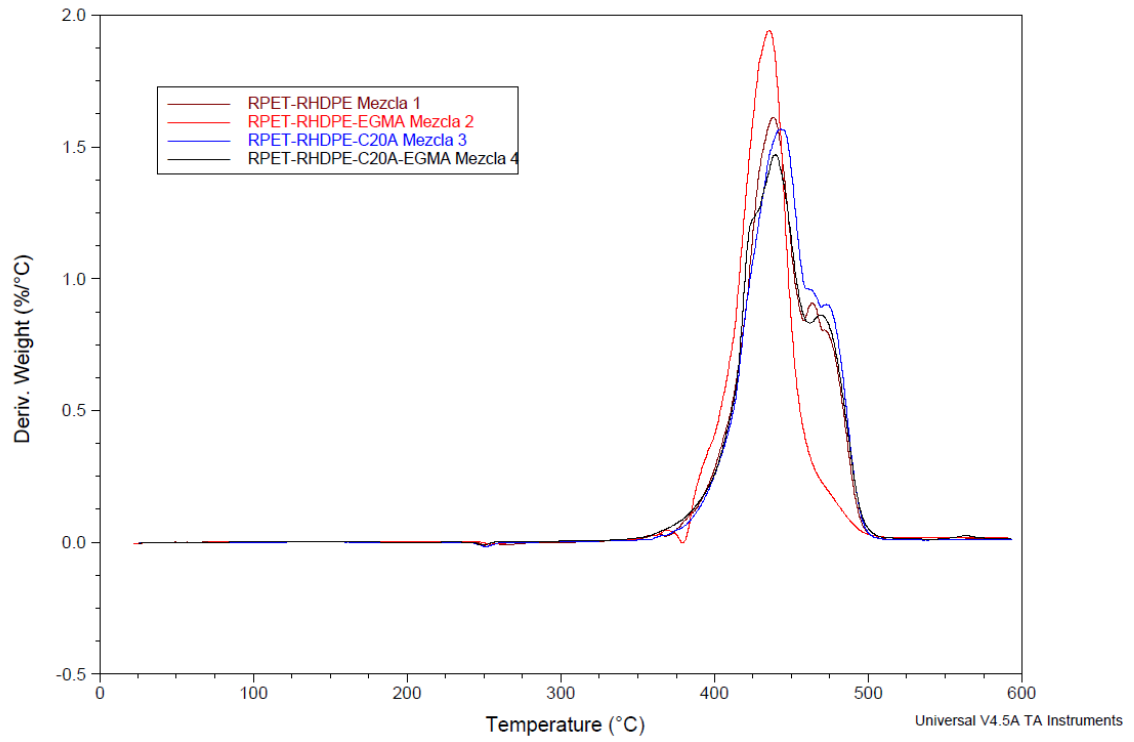
File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 4.001  
Operator: CY  
Run Date: 18-Jan-2018 14:09  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15



**Figura D.4 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/3C20A/5EGMA**



**Figura D.5 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 1, 2, 3 y 4.**

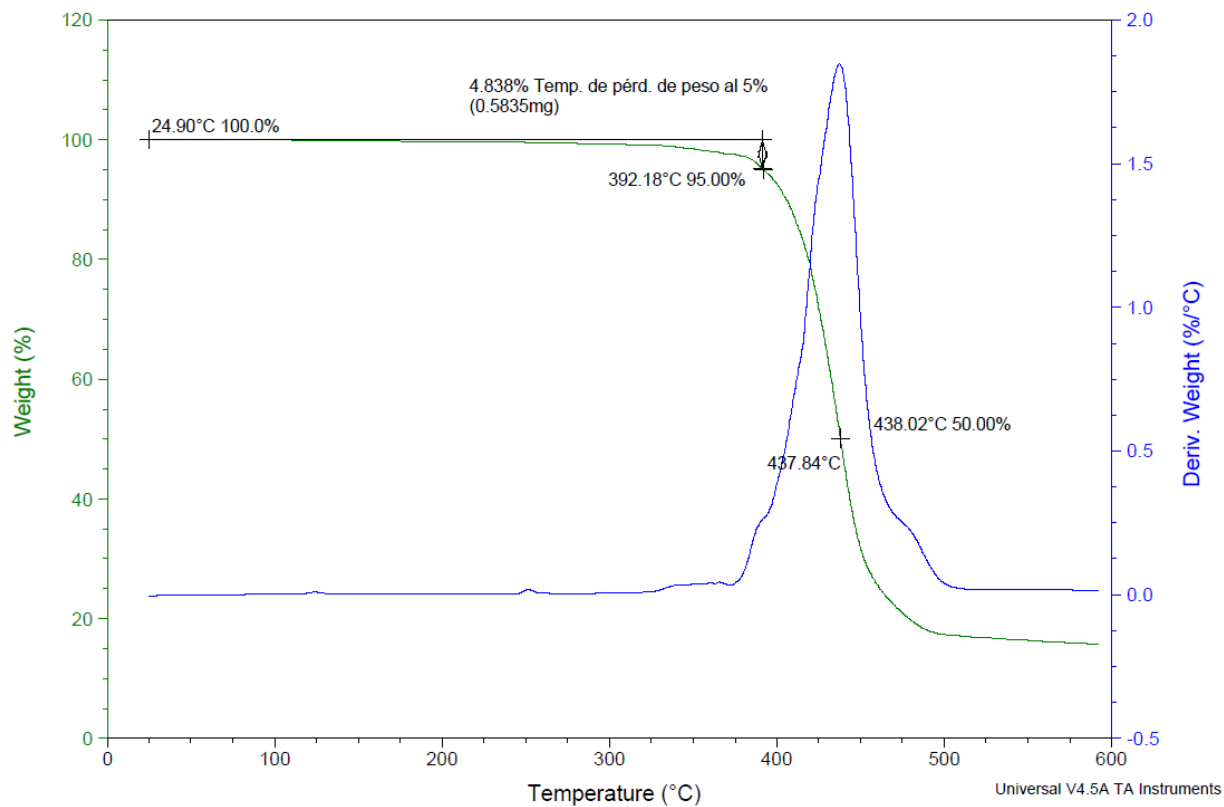


**Figura D.6 Termogramas TGA de la primera derivada del Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 1, 2, 3 y 4.**

Sample: Mezcla 5  
Size: 12.0610 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 5.001  
Operator: CY  
Run Date: 12-Jan-2018 08:58  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

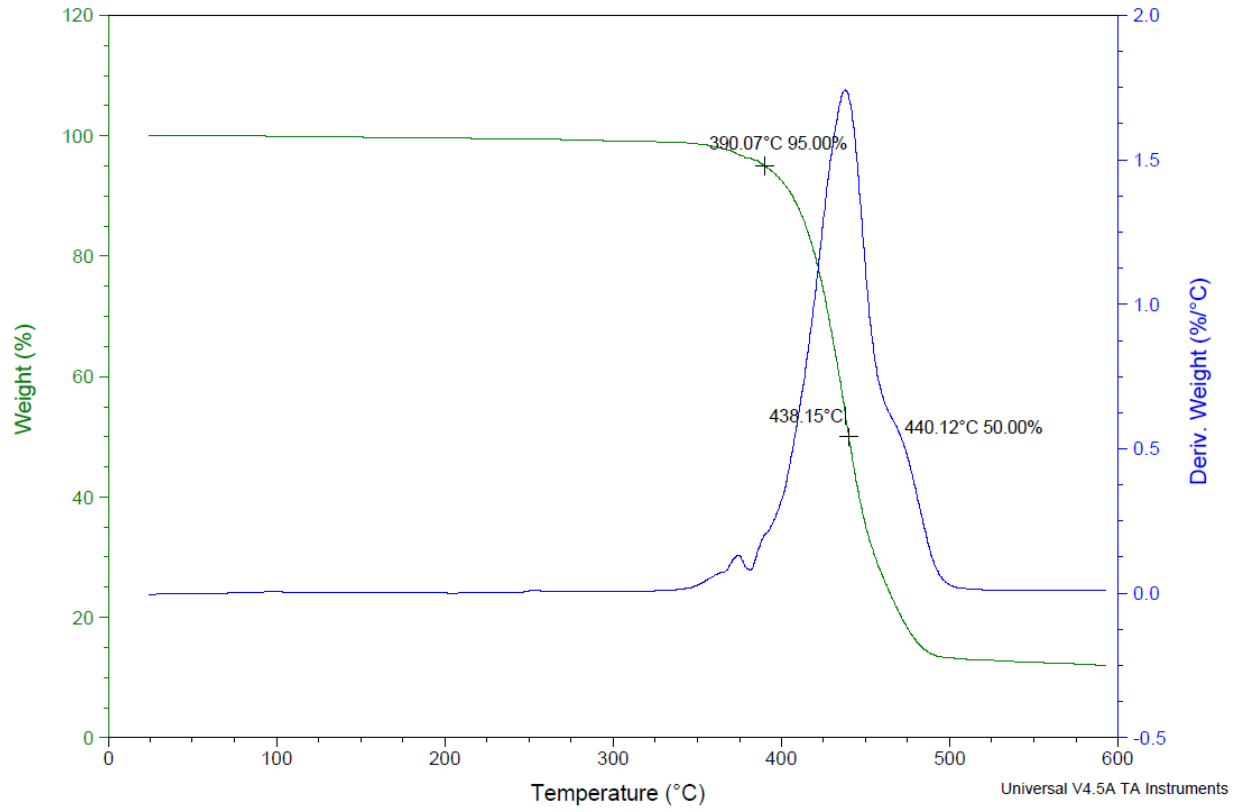


**Figura D.7 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 5: 100rPET/3C20A**

Sample: Mezcla 6  
Size: 9.7620 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 6.001  
Operator: CY  
Run Date: 16-Jan-2018 11:42  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

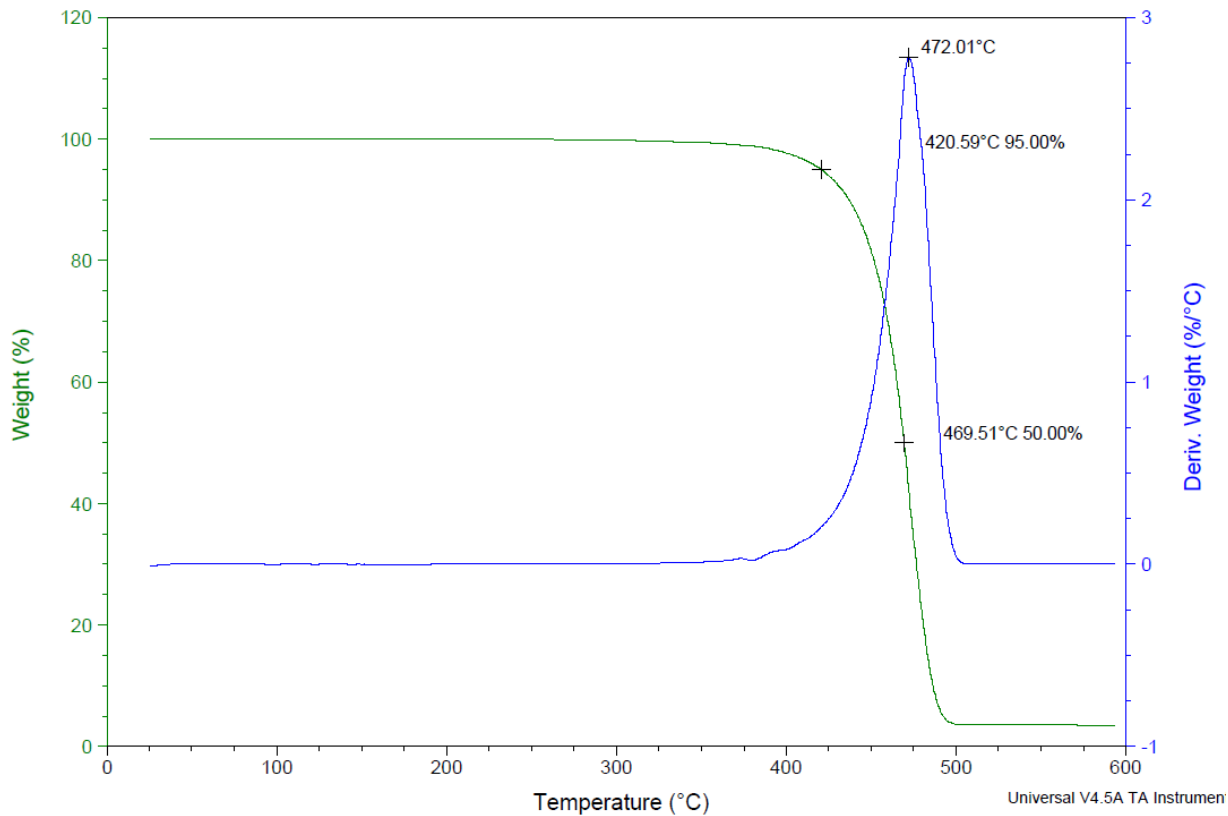


**Figura D.8 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 6: 100rPET/3C20A/5EGMA**

Sample: Mezcla 7  
Size: 9.5640 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 7.001  
Operator: CY  
Run Date: 17-Jan-2018 11:45  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

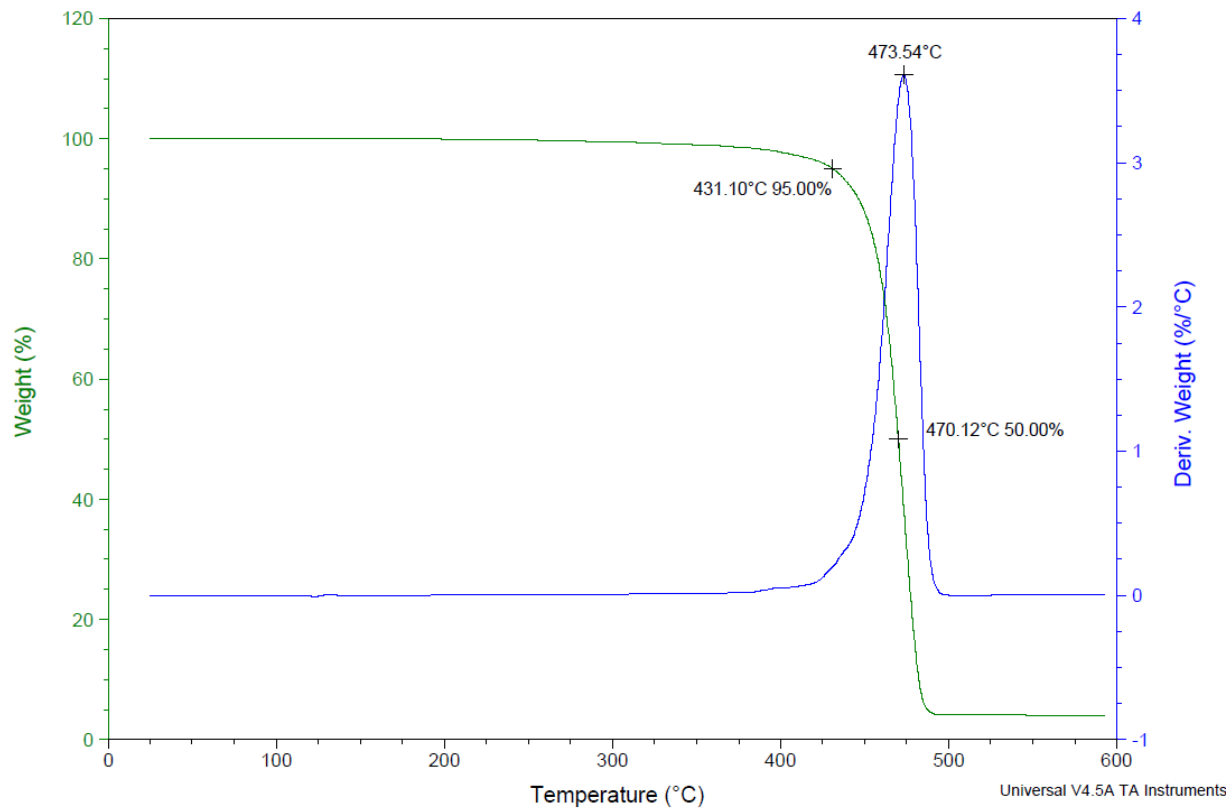


**Figura D.9 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 7: 100rHDPE/3C20A**

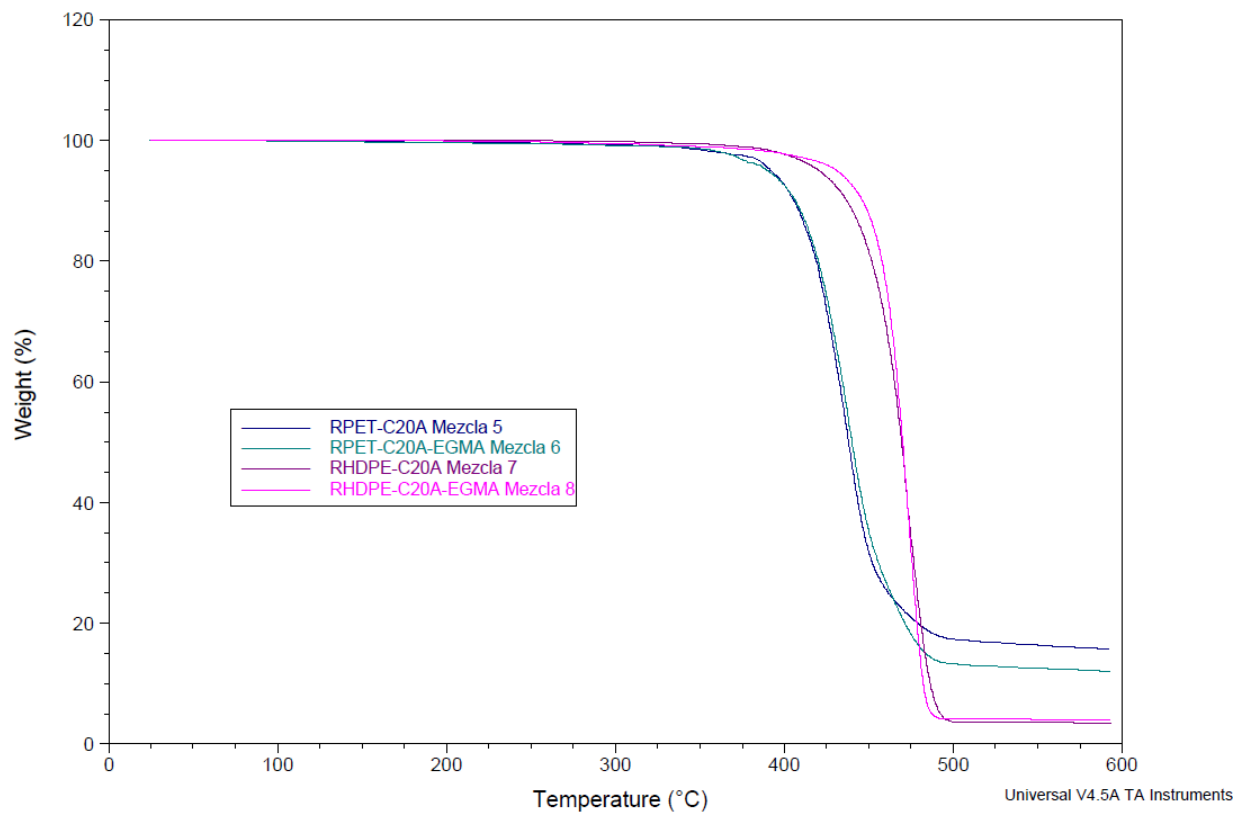
Sample: Mezcla 8  
Size: 9.6400 mg

### DSC-TGA

File: C:\...TGA-DSC\TGA\TGA\Mezcla 8.001  
Operator: CY  
Run Date: 12-Jan-2018 12:37  
Instrument: SDT Q600 V20.5 Build 15

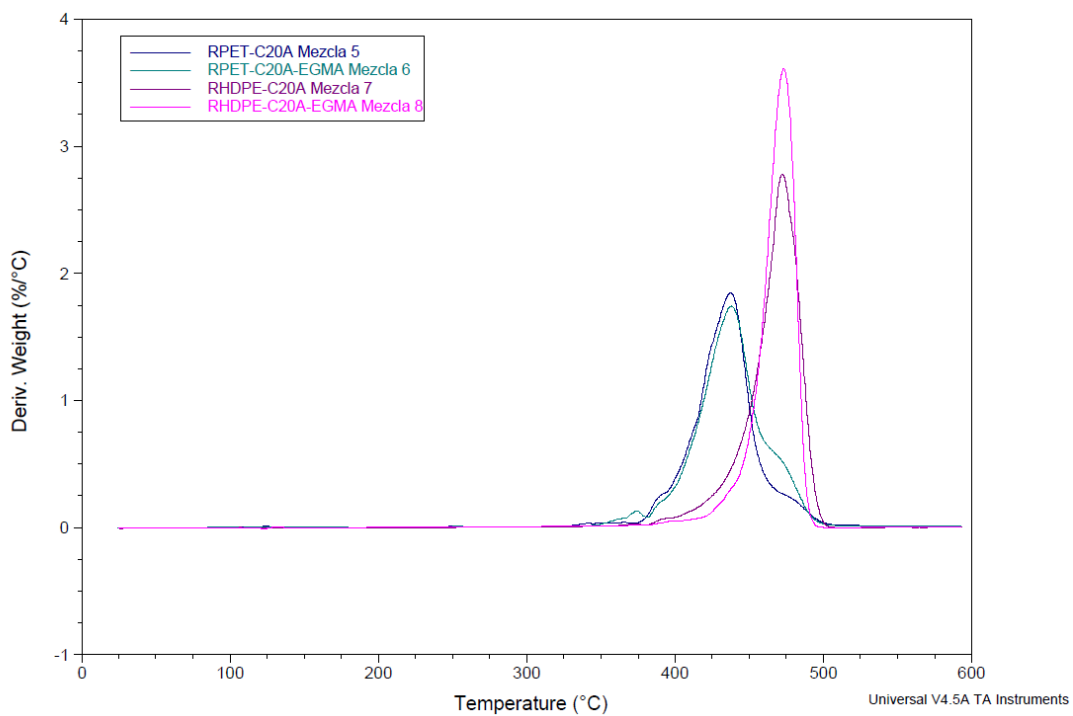


**Figura D.10 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) y su correspondiente primera derivada de la mezcla 8: 100rHDPE/3C20A/5EGMA**



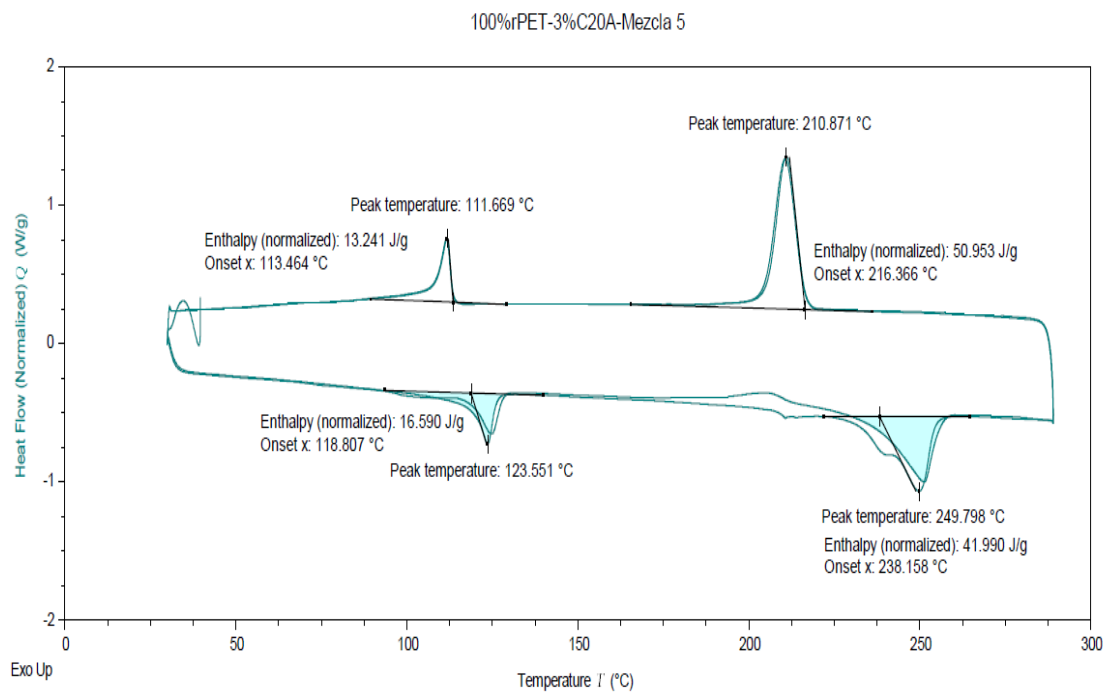
**Figura D.11 Termogramas TGA Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 5,6,7 y 8.**



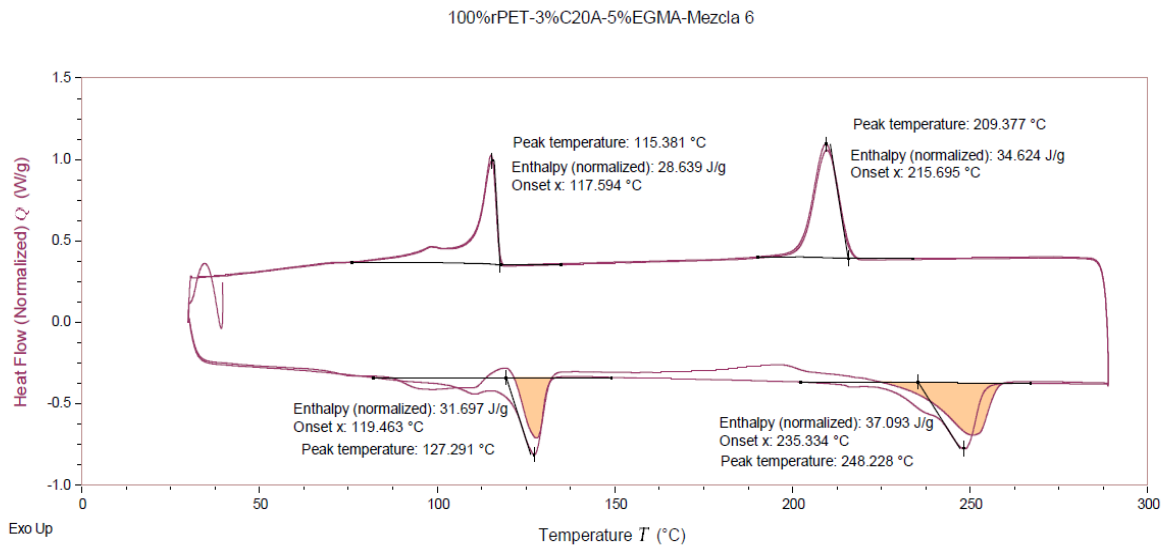


**Figura D.12 Termogramas TGA de la primera derivada del Peso (%) vs Temperatura (°C) de las mezclas 5,6,7 y 8.**

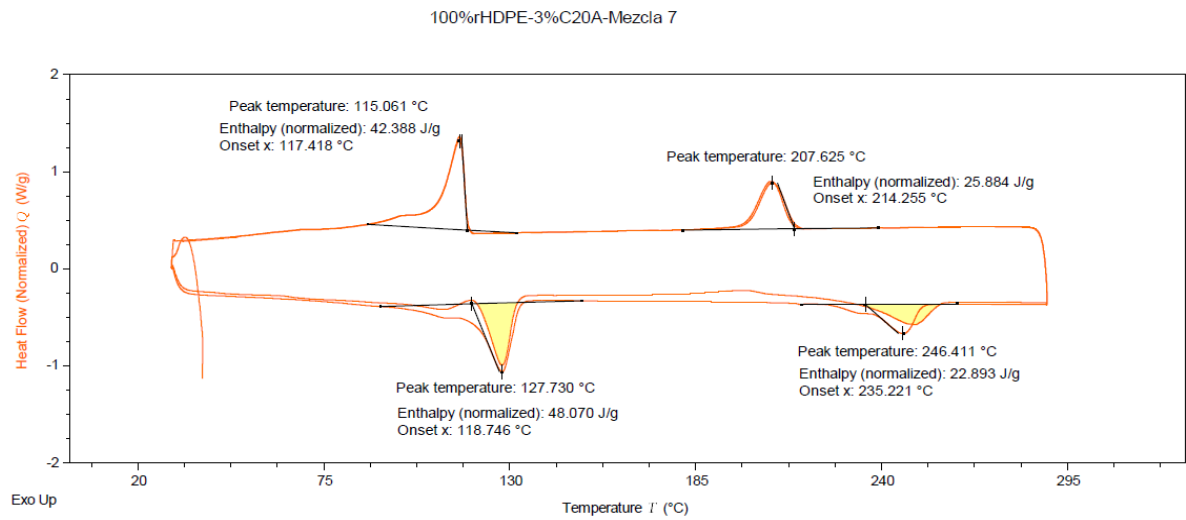
**APÉNDICE E**  
**TERMOGRAMAS DSC DE LAS MEZCLAS REALIZADAS CON**  
**rPET/rHDPE**



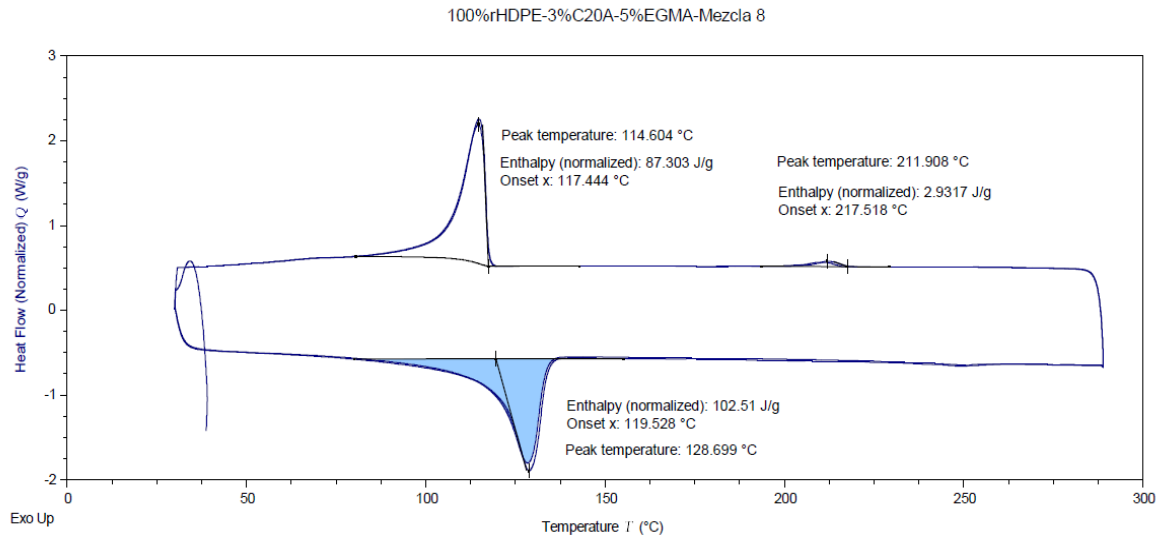
**Figura E.1. Termograma DSC de la Mezcla 5 correspondiente a 100rPET/3C20A**



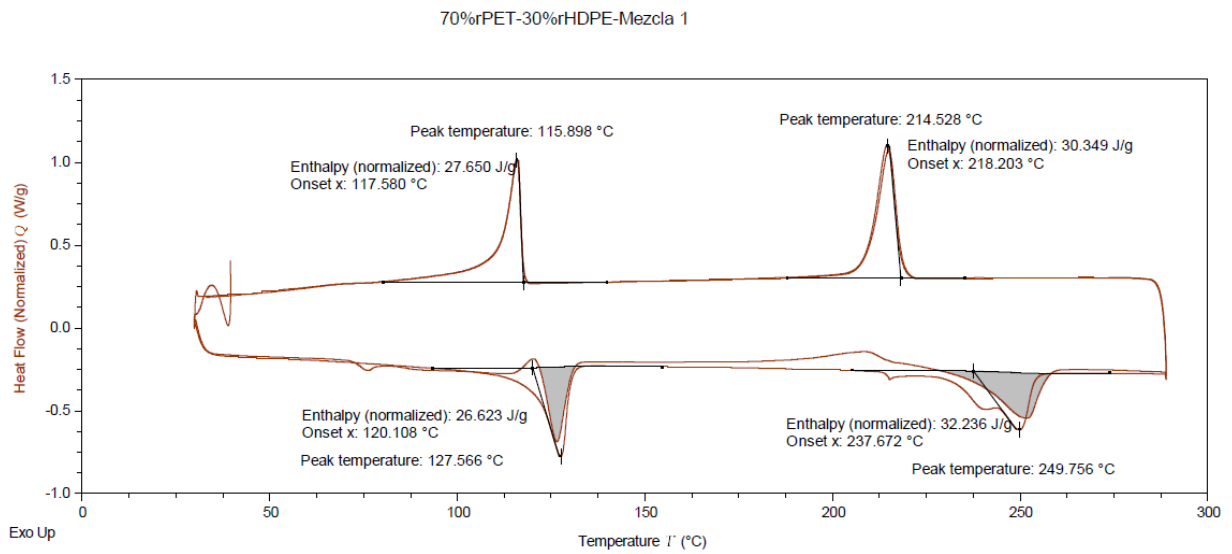
**Figura E.2. Termograma DSC de la Mezcla 6 correspondiente a 100rPET/3C20A/5EGMA**



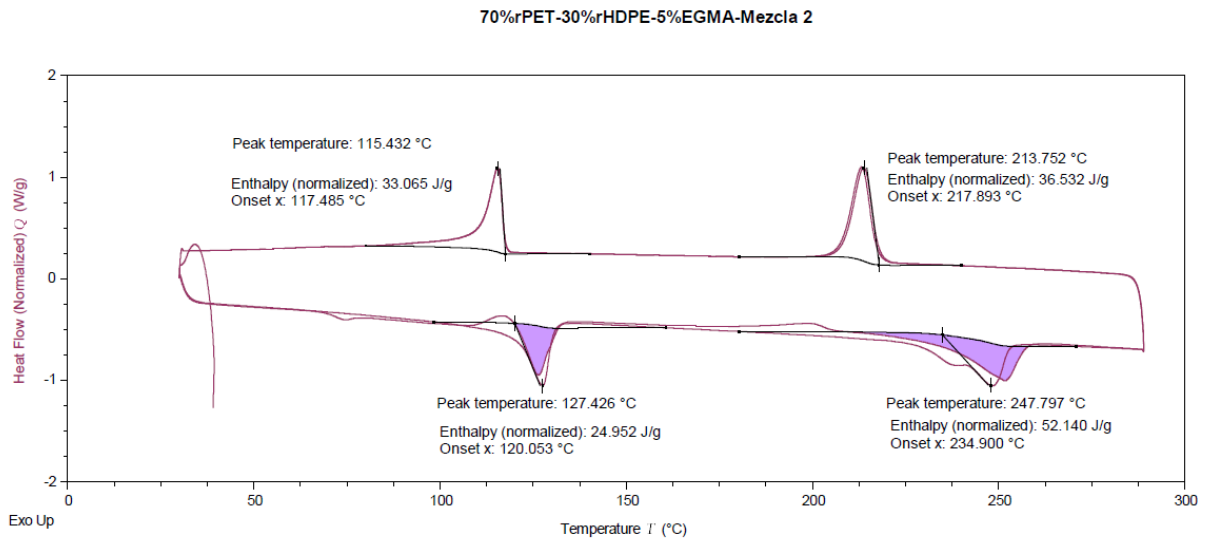
**Figura E.3. Termograma DSC de la Mezcla 7 correspondiente a 100rHDPE/3C20A**



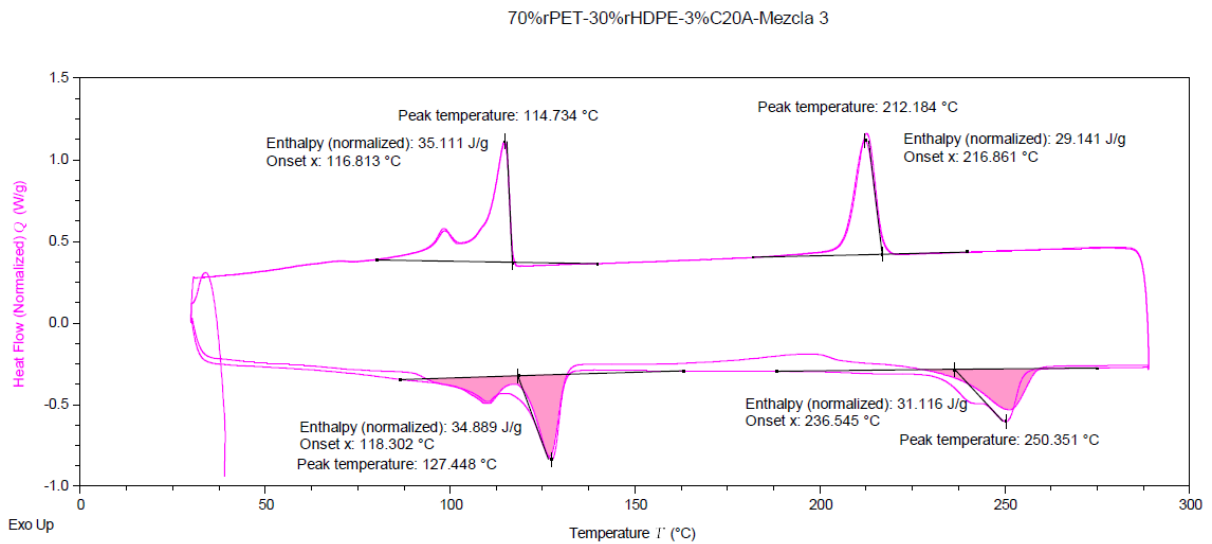
**Figura E.4. Termograma DSC de la Mezcla 8 correspondiente a 100rHDPE/3C20A/5EGMA**



**Figura E.5. Termograma DSC de la Mezcla 1 correspondiente a 70rPET/30rHDPE**

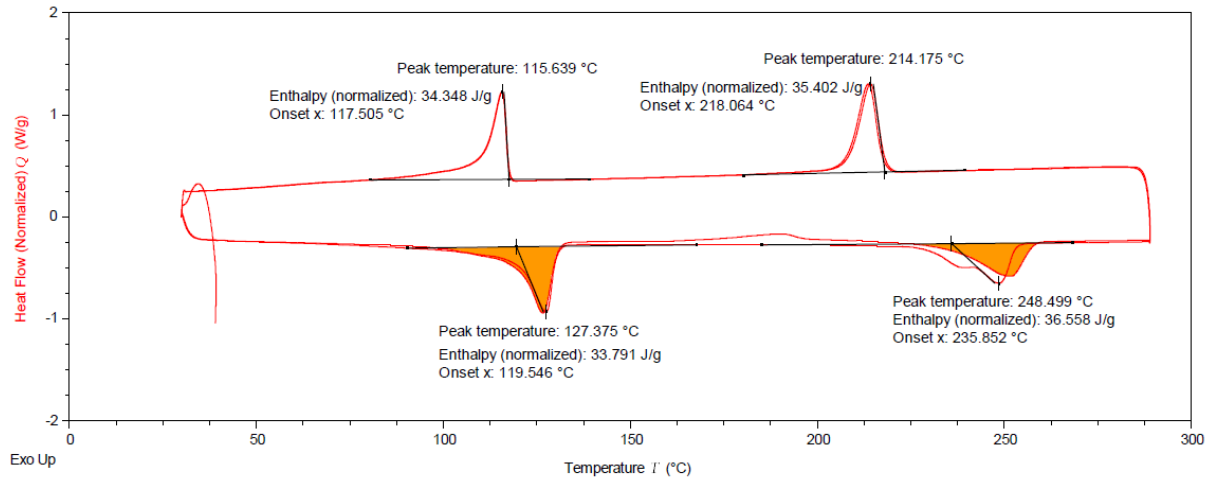


**Figura E.6. Termograma DSC de la Mezcla 2 correspondiente a 70rPET/30rHDPE/5EGMA**



**Figura E.7. Termograma DSC de la Mezcla 3 correspondiente a 70rPET/30rHDPE/3C20A**

70rPET-30rHDPE-3%C20A-5%EGMA-Mezcla 4



**Figura E.8. Termograma DSC de la Mezcla 4 correspondiente a  
70rPET/30rHDPE3C20A/5EGMA**

**APÉNDICE F**  
**RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN EN**  
**PROBETAS CON rPET/rHDPE**



MEZCLA 1: 70rPET/30rHDPE

Tabla F.1 Propiedades mecánicas de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máx. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.764	0.764	2.59	19.1	852.48
2	0.799	0.798	2.77	19.7	863.19
3	0.767	0.767	2.73	19.2	838.29
4	0.800	0.800	2.67	20.0	871.62
<b>Media</b>	0.783	0.782	2.69	19.5	830.42
$\sigma$	0.0197	0.0194	0.0783	0.424	40.2

MEZCLA 1: rPET/rHDPE BP90

Tabla F.2 Propiedades mecánicas de la mezcla 1: 70rPET/30rHDPE con Backpressure de 90 kg/cm<sup>2</sup>

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máx. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.705	0.686	2.55	17.5	782.04
2	0.707	0.691	2.65	17.8	767.51
3	0.710	0.710	2.56	17.6	773.94
4	0.710	0.710	2.42	17.7	823.36
<b>Media</b>	0.708	0.699	2.51	17.7	786.71
$\sigma$	0.00245	0.0126	0.0947	0.129	25.1

MEZCLA 2: rPET/rHDPE/EGMA

Tabla F.3 Propiedades mecánicas de la mezcla 2: 70rPET/30rHDPE/5EGMA

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máx. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.911	0.911	2.41	23.6	1151.27
2	0.851	0.851	2.37	21.5	1035.36
3	0.820	0.820	2.25	20.8	1038.12
4	0.832	0.832	2.29	21.2	1046.50
<b>Media</b>	0.854	0.854	2.33	21.8	1067.81
$\sigma$	0.0404	0.0404	0.0730	1.25	55.8

MEZCLA 3: rPET/rHDPE/C20A

Tabla F.4 Propiedades mecánicas de la mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máx. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.641	0.641	1.46	16.0	1126.27
2	0.647	0.647	1.48	16.1	1135.81
3	0.676	0.675	1.55	17.0	1163.19
4	0.645	0.645	1.48	16.1	1124.18
5	0.667	0.667	1.60	16.5	1086.50
6	0.668	0.668	1.57	16.8	1122.07
<b>Media</b>	0.657	0.657	1.52	16.4	1126.34
$\sigma$	0.0147	0.0145	0.0575	0.417	24.7

MEZCLA 3: rPET/rHDPE/C20A BP90

**Tabla F.5 Propiedades mecánicas mezcla 3: 70rPET/30rHDPE/3C20A con Backpressure de 90 kg/cm<sup>2</sup>**

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máy. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.537	0.537	1.18	13.4	1113.65
2	0.561	0.561	1.33	13.9	1062.03
<b>Media</b>	0.549	0.549	1.26	13.7	1096.84
$\sigma$	0.017	0.017	0.106	0.354	49.2

MEZCLA 4: rPET/rHDPE/EGMA/C20A

**Tabla F.6 Propiedades mecánicas mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A**

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máy. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.682	0.667	2.27	17.1	831.21
2	0.682	0.682	2.51	17.2	769.42
3	0.730	0.730	2.29	18.3	894.92
4	0.681	0.681	2.01	17.5	935.31
5	0.684	0.684	2.75	17.3	732.08
6	0.722	0.722	3.11	18.4	730.47
<b>Media</b>	0.697	0.694	2.49	17.6	815.57
$\sigma$	0.0228	0.0254	0.393	0.572	86.3

MEZCLA 4: rPET/rHDPE/EGMA/C20A BP 90

Tabla F.7 Propiedades mecánicas mezcla 4: 70rPET/30rHDPE/5EGMA/3C20A con Backpressure de 90 kg/cm<sup>2</sup>

No. Probeta	Carga máxima (kN)	Carga de rotura (kN)	Deformación (%)	Máx. Esfuerzo (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
1	0.701	0.701	1.96	17.6	969.61
2	0.726	0.724	2.09	18.2	954.78
3	0.753	0.753	2.27	18.9	941.59
4	0.749	0.749	2.10	19.1	1010.14
<b>Media</b>	0.732	0.732	2.11	18.5	969.03
$\sigma$	0.024	0.024	0.127	0.685	29.7

**APÉNDICE G**  
**SIMULACIÓN ANSYS**

## MODELO

Distancia entre correas 700 mm

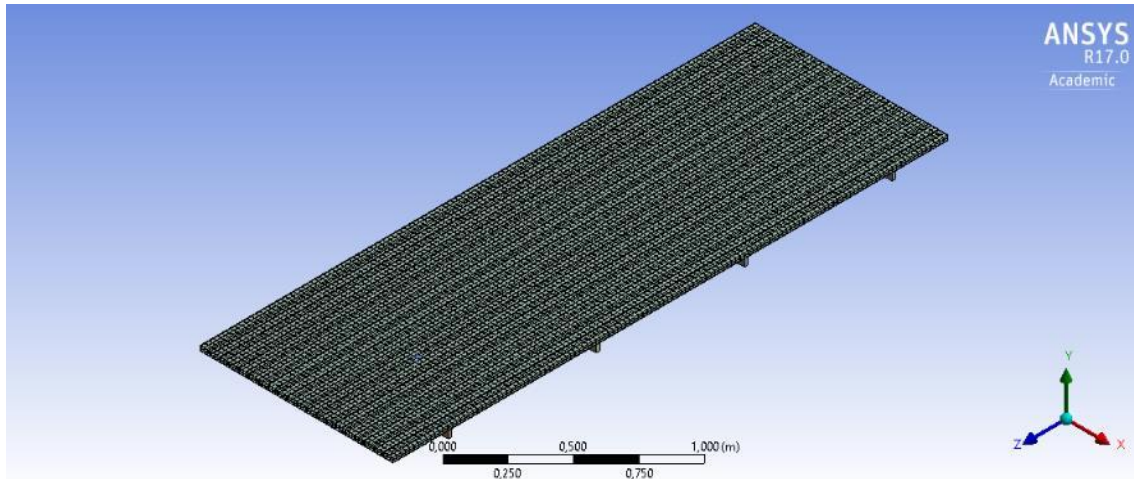


Figura G.1 Mallado del ensamble para distancia entre correas de 700 mm

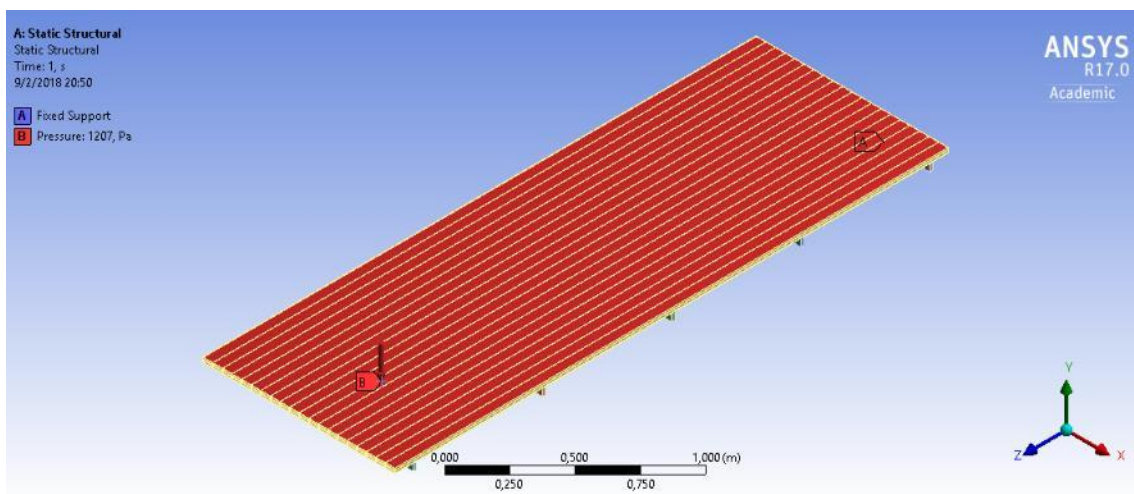
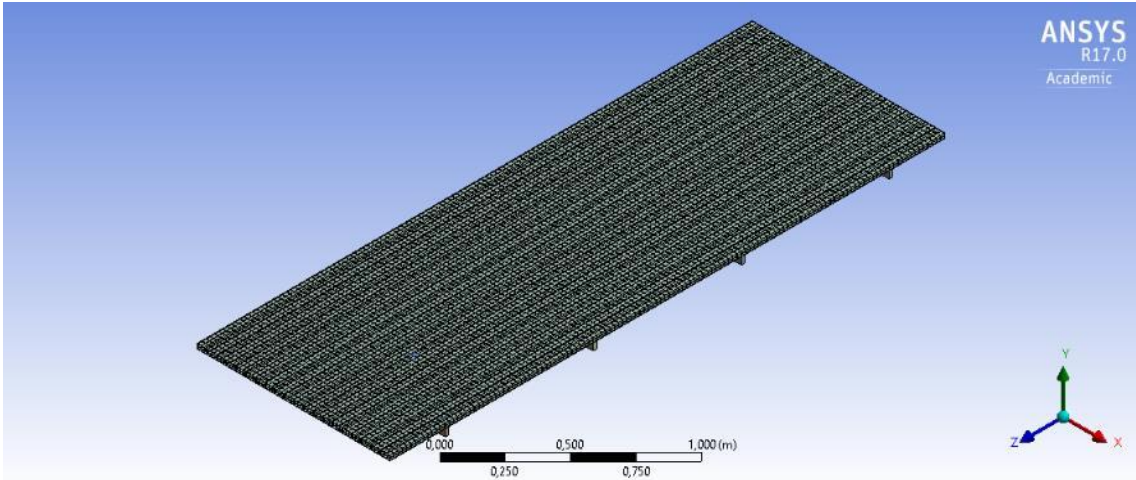
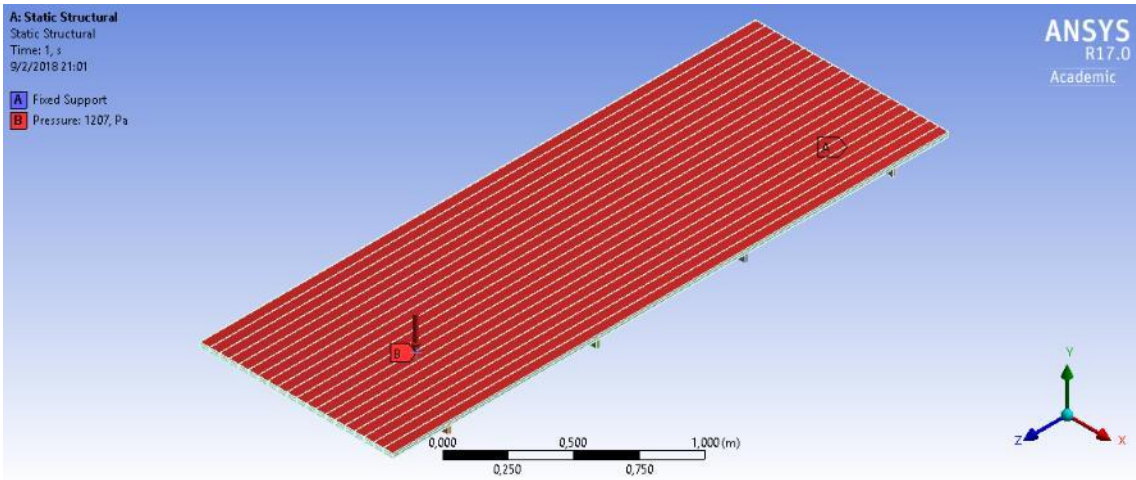


Figura G.2 Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 700 mm

**Distancia entre correas de 800 mm**

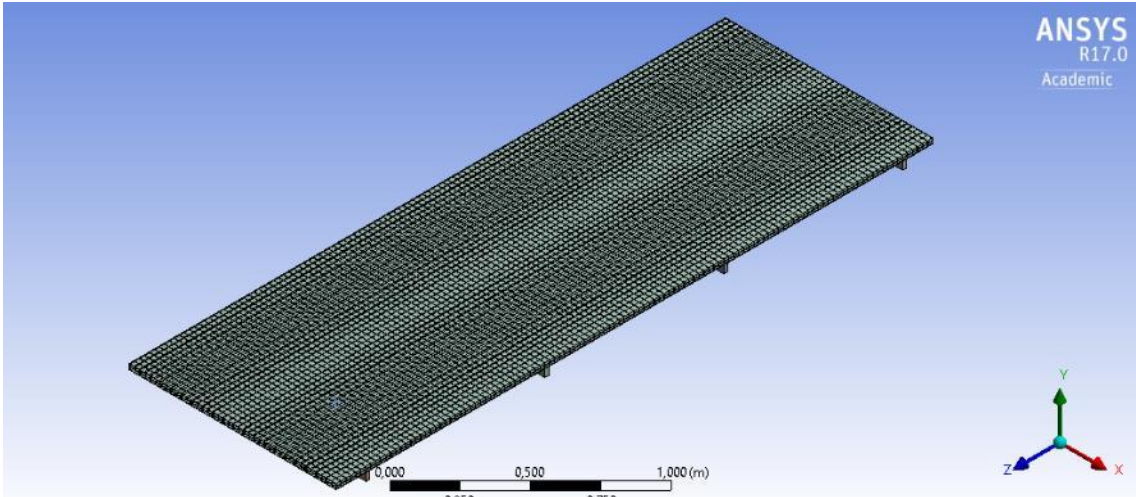


**Figura G.3 Mallado del ensamble para distancia entre correas de 800 mm**

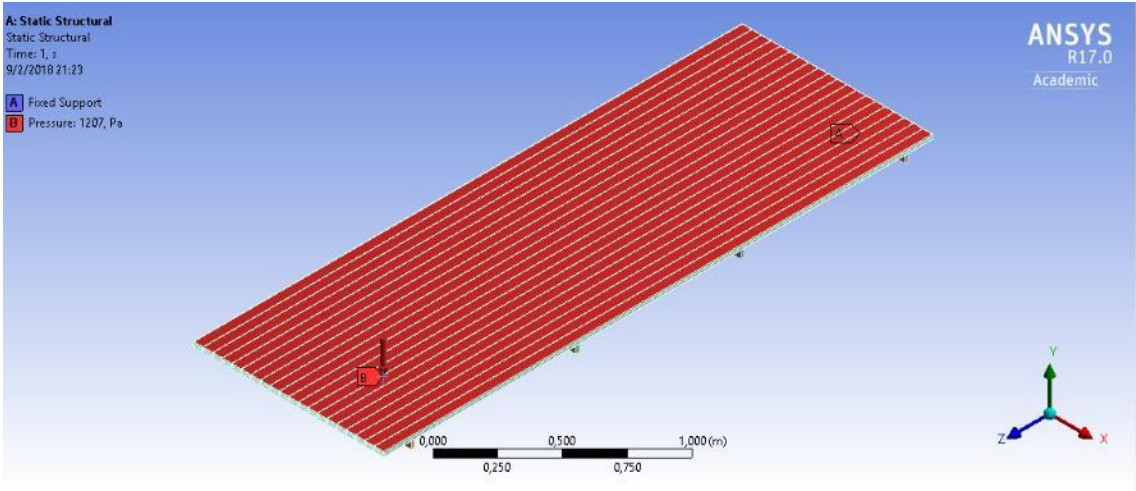


**Figura G.4 Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 800 mm**

**Distancia entre correas de 900 mm**



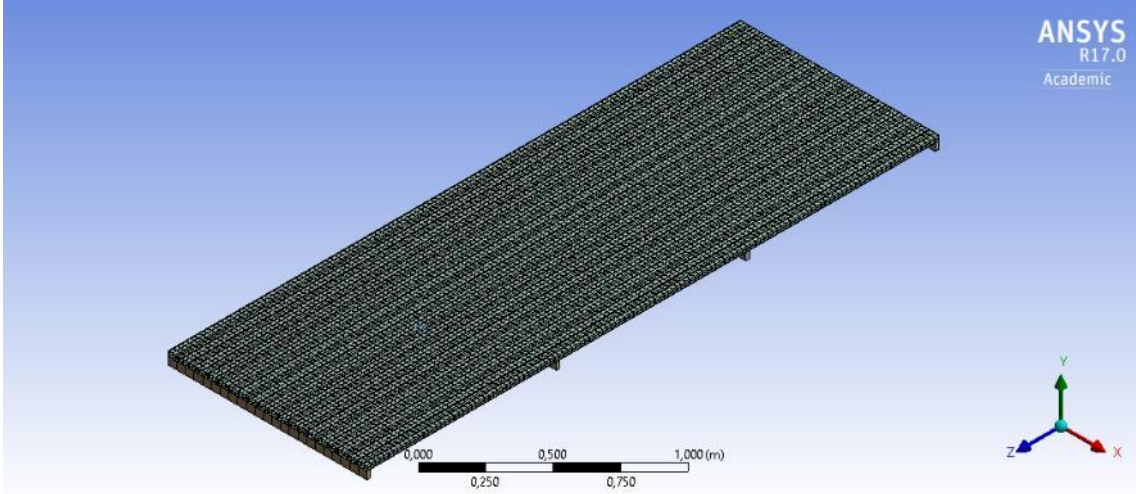
**Figura G.5 Mallado del ensamble para distancia entre correas de 900 mm**



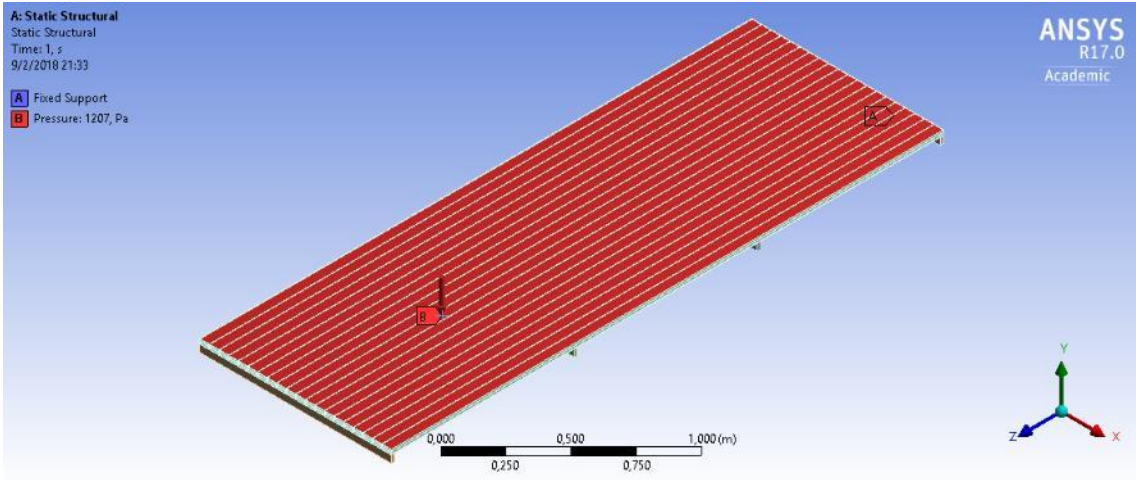
**Figura G.6 Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 900 mm**



**Distancia entre correas de 1000 mm**



**Figura G.7 Mallado del ensamble para distancia entre correas de 1000 mm**



**Figura G.8 Aplicación de cargas y restricciones sobre el panel para distancia entre correas de 1000 mm**

**APÉNDICE H**  
**FICHAS TÉCNICAS**

# LOTADER® AX8840

## Ethylene - Glycidyl Methacrylate copolymer

### DESCRIPTION

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

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

### TYPICAL PROPERTIES

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

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

### APPLICATIONS

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

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

# LOTADER® AX8840

## PROCESSING

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

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

## STORAGE, HANDLING AND SAFETY

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

Safety data sheet as well as information on handling and storage of the **LOTADER® AX8840** is available upon request to your ARKEMA representative or on the web site [lotader.com](http://lotader.com).

## SHELF LIFE

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

April 2014

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

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

Arkema Functional Polyolefins  
420, rue d'Estienne d'Orves  
92705 Colombes Cedex - France  
[arkema.com](http://arkema.com) - [lotader.com](http://lotader.com)

**ARKEMA**  
INNOVATIVE CHEMISTRY

ARKEMA, Société anonyme au capital de 614 507 900 euros - 416 074 685 RCS Nanterre

SOUTHERN CLAY PRODUCTS / A SUBSIDIARY OF ROCKWOOD SPECIALTIES, INC.

## PRODUCT BULLETIN/Cloisite®



Southern Clay Products, Inc.  
1212 Church Street  
Gonzales, TX 78629  
Phone: 800-324-2891  
Fax: 830-672-1903  
www.scprod.com

### Cloisite® 20A

#### Typical Physical Properties Bulletin

**Description:**

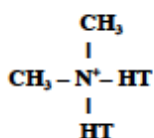
Cloisite® 20A is a natural montmorillonite modified with a quaternary ammonium salt.

**Designed Used:**

Cloisite® 20A is an additive for plastics to improve various plastic physical properties, such as reinforcement, HDT, CLTE and barrier.

**Typical Properties:**

<u>Treatment/Properties:</u>	Organic Modifier (1)	Modifier Concentration	% Moisture	% Weight Loss on Ignition
Cloisite® 20A	2M2HT	95 meq/100g clay	< 2%	38%



Where HT is Hydrogenated Tallow (~65% C18; ~30% C16; ~5% C14)

**Anion: Chloride**

(1) 2M2HT: dimethyl, dehydrogenated tallow, quaternary ammonium

Typical Dry Particle Sizes: (microns, by volume)

10% less than:	50% less than:	90% less than:
2 $\mu$	6 $\mu$	13 $\mu$

Color: Off White

Density:

Loose Bulk, lbs/ft <sup>3</sup>	Packed Bulk, lbs/ft <sup>3</sup>	Density, g/cc
7.35	13.55	1.77

X Ray Results:  $d_{001} = 24.2\text{\AA}$

For additional information or technical assistance contact Southern Clay Products, Inc. toll free at 800-324-2891.

Disclaimer of Warranty: The information presented herein is believed to be accurate but is not to be taken as a warranty, guarantee, or representation for which we assume legal responsibility. This information does not grant permission, license, or any rights or recommendations to practice any form of proprietary intellectual property without obtaining the appropriate license or grant from the property owner. The information is offered solely for your consideration, investigation and verification, but you must determine the suitability of the product for your specific application. The purchaser assumes all risk of use of handling the material, including but not limited to transferring the material within purchaser's facilities, using the material in applications specified by the purchaser and handling any product which includes the material, whether or not in accordance with any statements made herein.