



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y

MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

**TEMA: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MODELAMIENTO DEL
MATERIAL COMPUESTO ENTRE POLIALUMINIO TETRA PAK®
RECICLADO, POLIPROPILENO Y POLIETILENO TEREFTALATO
RECICLADO.**

**AUTORES: ALBARACIN CABRERA, PAÚL ANDRÉS
HURTADO RIVERA, LAURA GABRIELA**

DIRECTOR: ING. SÁNCHEZ SÁNCHEZ, XAVIER ROLANDO PHD.

SANGOLQUÍ

2020



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

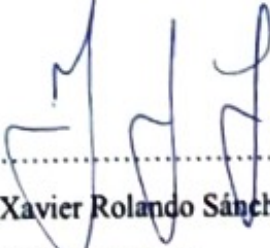
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MODELAMIENTO DEL MATERIAL COMPUESTO ENTRE POLIALUMINIO TETRA PAK® RECICLADO, POLIPROPILENO Y POLIETILENO TEREFTALATO RECICLADO”** realizado por el señor **ALBARACIN CABRERA, PAÚL ANDRÉS** y la señorita **HURTADO RIVERA, LAURA GABRIELA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **ALBARACIN CABRERA, PAÚL ANDRÉS** y la señorita **HURTADO RIVERA, LAURA GABRIELA** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 14 de enero de 2020


.....
Ing. Xavier Rolando Sánchez Sánchez PhD.
Director del proyecto



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ALBARACIN CABRERA, PAÚL ANDRÉS**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Caracterización mecánica y modelamiento del material compuesto entre polialuminio Tetra Pak® reciclado, polipropileno y polietileno tereftalato reciclado**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la **UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE**, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de enero de 2020

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Paúl'.

Paúl Andrés Albaracin Cabrera

Autor del proyecto



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **HURTADO RIVERA, LAURA GABRIELA**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Caracterización mecánica y modelamiento del material compuesto entre polialuminio Tetra Pak® reciclado, polipropileno y polietileno tereftalato reciclado**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 14 de enero de 2020


.....
Laura Gabriela Hurtado Rivera
Autora del proyecto

DEDICATORIA

Quiero dedicar a mis padres
gracias a su esfuerzo y dedicación
estoy en esta etapa de mi vida
culminando los estudios, por su formación
con el ejemplo que hicieron de mis hermanos
y de mí, personas de bien y sin ellos esto no
hubiese sido posible.

Paúl Andrés Albaracin Cabrera

DEDICATORIA

 Mi esfuerzo dedicó principalmente a Nieves por ser mi compañera incondicional, a mi sobrina Sabah por ser mi apoyo emocional, a Paúl por ser mi motor y dedico también a Dios que me permite cumplir un sueño que me ha forjado como mejor mujer y ser humano.

Laura Gabriela Hurtado Rivera

AGRADECIMIENTO

Primeramente, quisiera agradecer a Dios por su bendición, a mis padres por siempre apoyarme en todas las circunstancias, a mis hermanos por siempre estar en los momentos que más los necesitaba y a mi novia por ser el pilar fundamental y su apoyo incondicional en el transcurso de toda mi carrera estudiantil y a toda mi familia que estuvo directa o indirectamente en mi formación.

Paúl Andrés Albaracín Cabrera

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre
por ser un ejemplo de superación y
perseverancia,
a mi abuelo Pison y a mi abuela Faby
por ser mi apoyo en momentos difíciles,
a mis hermanas que han sido mis compañeras
en esta travesía y agradezco a toda mi familia
por siempre creer en mí y permitirme
demostrar que puedo salir adelante sin
importar las circunstancias de la vida.
Agradezco a mi tía Marianita por siempre
tenerme presente en sus oraciones, a mi tía
Mónica por su apoyo incondicional
y finalmente agradezco a Dios por su
oportunidad de un nuevo reto.

Laura Gabriela Hurtado Rivera

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
DEDICATORIAS.....	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE SÍMBOLOS.....	xviii
RESUMEN.....	xxii
ABSTRACT	xxiii
1. CAPÍTULO I.- DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	4
1.5 ALCANCE.....	6
2. CAPÍTULO II.- ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1 MATERIALES COMPUESTOS.....	7
2.1.1 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS EN FUNCIÓN AL TIPO DE MATRIZ	8
2.1.2 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS EN FUNCIÓN A LA FORMA QUE POSEE EL REFUERZO	8
2.1.3 MATRICES POLIMÉRICAS.....	10
2.1.3.1 MATRIZ TERMOESTABLE.....	11
2.1.3.2 MATRIZ TERMOPLÁSTICA	11
2.2 POLÍMEROS	11

2.2.1	POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS	12
2.2.1.1	POLIPROPILENO.....	12
2.2.1.2	POLIETILENO TEREFTALATO	13
2.3	TETRA BRIK DE TETRA PAK®.....	14
2.4	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	14
2.5	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA MATERIALES COMPUESTOS.....	16
3.	CAPÍTULO III.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TRITURADORA	18
3.1	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	18
3.2	DISEÑO DE LA TRITURADORA	18
3.2.1	POTENCIA DEL MOTOR	19
3.2.2	DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA	20
3.2.3	DISEÑO DE LA FLECHA	21
3.2.4	ANÁLISIS DE LA FLECHA	22
3.2.5	DISEÑO POR FATIGA.....	24
3.2.6	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	26
3.2.7	SELECCIÓN DE MATERIAL	26
4.	CAPÍTULO IV.- CONFORMADO DEL MATERIAL COMPUESTO	27
4.1	REGLA DE MEZCLAS	27
4.2	SIMULACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO	30
4.2.1	CONDICIONES.....	30
4.2.2	MALLADO	31
4.2.3	SIMULACIÓN.....	31
4.3	PARAMETRIZACIÓN DEL PRENSADO	38
4.4	OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO	39
5.	CAPÍTULO V.- DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO	42
5.1	DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS	42
5.2	ENSAYO DE TRACCIÓN.....	43
5.3	ENSAYO DE FLEXIÓN	44

5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	45
5.5 RESULTADO DE LOS ENSAYOS.....	45
6. CAPÍTULO VI.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	66
6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.....	67
6.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO Y SIMULACIÓN	83
7. CAPÍTULO VII.- ANÁLISIS FINANCIERO.....	87
7.1 COSTOS DIRECTOS.....	87
7.2 COSTOS INDIRECTOS	89
7.3 COSTOS TOTALES.....	89
8. CAPÍTULO VIII.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
8.1 CONCLUSIONES.....	91
8.2 RECOMENDACIONES.....	94
9. BIBLIOGRAFÍA.....	96
10. ANEXOS	102
Anexo A. Diseño de la trituradora.....	102
Anexo B. Diseño del engranaje recto.....	102
Anexo C. Regla de mezclas.....	102
Anexo D. Dimensiones de las probetas ensayadas	102
Anexo E. Resultados de los ensayos de tracción.....	102
Anexo F. Resultados de los ensayos de flexión	102
Anexo G. Resultados de los ensayos de compresión	102
Anexo H. Normas utilizadas	102
Anexo I. Planos	102
Anexo J. Fichas técnicas	102
Anexo K. Respaldo fotográfico.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Datos técnicos Polipropileno Homopolímero</i>	12
Tabla 2. <i>Datos técnicos Polietileno Tereftalato</i>	13
Tabla 3. <i>Parámetros de diseño</i>	19
Tabla 4. <i>Fuerzas aplicadas y potencia requerida</i>	19
Tabla 5. <i>Distribución Geométrica</i>	20
Tabla 6. <i>Dimensiones del Engrane Recto</i>	21
Tabla 7. <i>Fuerzas y Momentos</i>	22
Tabla 8. <i>Análisis de la flecha</i>	23
Tabla 9. <i>Diseño por Fatiga</i>	25
Tabla 10. <i>Propiedades del Polietileno-Aluminio de los envases de Tetra Pak®</i>	27
Tabla 11. <i>Densidades y volúmenes de las materias primas</i>	29
Tabla 12. <i>Densidades de los materiales compuestos</i>	29
Tabla 13. <i>Parámetros de simulación</i>	30
Tabla 14. <i>Parámetros de prensado</i>	38
Tabla 15. <i>Resultados compilados del ensayo de tracción de las distintas probetas</i>	63
Tabla 16. <i>Resultados compilados del ensayo de flexión de las distintas probetas</i>	64
Tabla 17. <i>Resultados compilados del ensayo de compresión de las distintas probetas</i>	65
Tabla 18. <i>Resultados de la simulación del material compuesto entre PET y polialuminio</i>	66
Tabla 19. <i>Resultados de la simulación del material compuesto entre PP y polialuminio</i>	67
Tabla 20. <i>Resultados del ensayo a tracción de los materiales vírgenes y planchas Ecopak</i>	69
Tabla 21. <i>Resultados de los ensayos de tracción con material PET</i>	69
Tabla 22. <i>Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	70
Tabla 23. <i>Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	71
Tabla 24. <i>Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	71
Tabla 25. <i>Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	71

Tabla 26. <i>Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	72
Tabla 27. <i>Resultados de los ensayos de tracción con material PP</i>	72
Tabla 28. <i>Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	73
Tabla 29. <i>Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	73
Tabla 30. <i>Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	74
Tabla 31. <i>Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	74
Tabla 32. <i>Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	74
Tabla 33. <i>Resultados del ensayo a flexión de las planchas Ecopak</i>	75
Tabla 34. <i>Resultados de los ensayos de flexión con material compuesto PET</i>	75
Tabla 35. <i>Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	75
Tabla 36. <i>Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	76
Tabla 37. <i>Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	76
Tabla 38. <i>Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	76
Tabla 39. <i>Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	77
Tabla 40. <i>Resultados de los ensayos de flexión con material compuesto PP</i>	77
Tabla 41. <i>Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	77
Tabla 42. <i>Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	78
Tabla 43. <i>Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	78
Tabla 44. <i>Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	78
Tabla 45. <i>Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	79
Tabla 46. <i>Resultados de los ensayos de compresión de las planchas Ecopak</i>	79

Tabla 47. <i>Resultados de los ensayos de compresión con material compuesto PET y planchas Ecopak</i>	79
Tabla 48. <i>Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	80
Tabla 49. <i>Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	80
Tabla 50. <i>Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	80
Tabla 51. <i>Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	80
Tabla 52. <i>Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	81
Tabla 53. <i>Resultados de los ensayos de compresión con material compuesto PP</i>	81
Tabla 54. <i>Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	81
Tabla 55. <i>Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	82
Tabla 56. <i>Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	82
Tabla 57. <i>Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	82
Tabla 58. <i>Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak</i>	83
Tabla 59. <i>Resultados compilados para las planchas con matriz polimérica de PET</i>	84
Tabla 60. <i>Resultados compilados para las planchas con matriz polimérica de PP</i>	85
Tabla 61. <i>Materiales utilizados para la fabricación de la máquina trituradora</i>	87
Tabla 62. <i>Elementos eléctricos utilizados para la fabricación de la máquina trituradora</i>	88
Tabla 63. <i>Materiales para el conformado del material compuesto</i>	88
Tabla 64. <i>Servicios de corte, torneado y prensado de material</i>	88
Tabla 65. <i>Total de costos directos</i>	88
Tabla 66. <i>Uso de laboratorios</i>	89
Tabla 67. <i>Varios</i>	89
Tabla 68. <i>Total de costos indirectos</i>	89
Tabla 69. <i>Total de costos del proyecto</i>	90

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Material compuesto y su clasificación	7
<i>Figura 2.</i> Material compuesto	8
<i>Figura 3.</i> Material compuesto	9
<i>Figura 4.</i> Material sánduche	10
<i>Figura 5.</i> Tetra Brik Tetra Pak®	14
<i>Figura 6.</i> Botella compactada	19
<i>Figura 7.</i> Diseño Geométrico.....	20
<i>Figura 8.</i> a) Diagrama de fuerzas y momentos en plano X-Y b) Diagrama de fuerzas y momentos en plano X-Z.....	23
<i>Figura 9.</i> a) Diagrama esfuerzos cortantes en plano X-Y b) Diagrama esfuerzos cortantes en plano X-Z.....	23
<i>Figura 10.</i> a) Diagrama momentos flectores en plano X-Y b) Diagrama momentos flectores en plano X-Z.....	23
<i>Figura 11.</i> Sección crítica	24
<i>Figura 12.</i> Propiedades mecánicas acero AISI 1018 Fuente: (Acero, 2018).....	25
<i>Figura 13.</i> Rodamiento de bolas rígidas NTN	26
<i>Figura 14.</i> Láminas de PEAL	28
<i>Figura 15.</i> Distribución de material	30
<i>Figura 16.</i> a) Aplicación de fuerzas para simular tracción b) Restricción de los grados de libertad	32
<i>Figura 17.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PET virgen, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento	33
<i>Figura 18.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento	33
<i>Figura 19.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento.....	34
<i>Figura 20.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento.....	34

<i>Figura 21.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento	35
<i>Figura 22.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PP virgen, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento	35
<i>Figura 23.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento.....	36
<i>Figura 24.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento.....	36
<i>Figura 25.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento.....	37
<i>Figura 26.</i> Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento	37
<i>Figura 27.</i> Prensa térmica	39
<i>Figura 28.</i> Diagrama de obtención de polialuminio	40
<i>Figura 29.</i> Proceso para la fabricación de una plancha de material compuesto	41
<i>Figura 30.</i> Esquema funcional de ensayos.....	42
<i>Figura 31.</i> Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a tracción	43
<i>Figura 32.</i> Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a flexión.....	44
<i>Figura 33.</i> Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a compresión.....	45
<i>Figura 34.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PET virgen.....	46
<i>Figura 35.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado.....	47
<i>Figura 36.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado.....	47
<i>Figura 37.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado.....	48
<i>Figura 38.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PET reciclado	48

<i>Figura 39.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PP virgen.....	49
<i>Figura 40.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado	49
<i>Figura 41.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado	50
<i>Figura 42.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado	50
<i>Figura 43.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PP reciclado	51
<i>Figura 44.</i> Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas del tablero Ecopak.....	51
<i>Figura 45.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PET virgen.....	52
<i>Figura 46.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado.....	53
<i>Figura 47.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado.....	53
<i>Figura 48.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado.....	54
<i>Figura 49.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PET reciclado	54
<i>Figura 50.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PP virgen.....	55
<i>Figura 51.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado	55
<i>Figura 52.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado	56
<i>Figura 53.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado	56

<i>Figura 54.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PP reciclado	57
<i>Figura 55.</i> Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas del tablero Ecopak.....	57
<i>Figura 56.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PET virgen.....	58
<i>Figura 57.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado.....	58
<i>Figura 58.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado.....	59
<i>Figura 59.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado.....	59
<i>Figura 60.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PET reciclado	60
<i>Figura 61.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PP virgen	60
<i>Figura 62.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado	61
<i>Figura 63.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado	61
<i>Figura 64.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado	62
<i>Figura 65.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PP reciclado.....	62
<i>Figura 66.</i> Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas del tablero Ecopak	63
<i>Figura 67.</i> Resultado del ensayo de tracción de material PET virgen	68
<i>Figura 68.</i> Resultado del ensayo de tracción de material PP virgen.....	68

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

F_{corte}	FUERZA TOTAL DE CORTE
e_{chapa}	ESPEJOR DEL PET
σ_R	CARGA DE ROTURA DEL MATERIAL
FS	FACTOR DE SERVICIO
$F_{cortefinal}$	FUERZA DE CORTE FINAL
T_{motor}	TORQUE DEL MOTOR
$D_{cuchilla}$	DIÁMETRO DE LAS CUCHILLAS
P_{motor}	POTENCIA MÍNIMA DEL MOTOR
W_{salida}	VELOCIDAD DE SALIDA DEL REDUCTOR
$V_{alimentacion}$	VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN
q	CAPACIDAD DE LA MÁQUINA
ρ	DENSIDAD DEL PET AMORFO
$A_{alimentacion}$	ÁREA DE ALIMENTACIÓN
$Z_{cuchillas}$	NÚMERO DE CUCHILLAS
n	VELOCIDAD DE GIRO DE LAS CUCHILLAS
D_{pelet}	DIÁMETRO DEL PELLET (PLÁSTICO TRITURADO)
$e_{cuchillas}$	ESPEJOR DE LAS CUCHILLAS
$Z_{separadores}$	NÚMERO DE SEPARADORES
$e_{separadores}$	ESPEJOR DE LOS SEPARADORES
$F_{impoactocuchilla}$	FUERZA DE IMPACTO
G_c	ENERGÍA ABSORBIDA POR UNIDAD DE ÁREA
t	ESPEJOR DE LA CUCHILLA
$F_{cortecuchilla}$	FUERZA TOTAL DE CORTE EJERCIDA POR LA CUCHILLA
$F_{cuchilla}$	FUERZA TOTAL SOBRE LA CUCHILLA
$M_{impacto}$	MOMENTO DE IMPACTO
L_1	RADIO DE LA CUCHILLA
M_{corte}	MOMENTO DE CORTE

L_2	LONGITUD DESDE EL CENTRO HASTA EL CENTRO DE LA CARA DE AGARRE (28.74 mm)
M_{total}	MOMENTO TOTAL GENERADO
$M_{inerxia}$	MOMENTO DE INERCIA
I_{total}	INERCIA TOTAL
I_{eje}	INERCIA DEL EJE
$I_{engrane}$	INERCIA DEL ENGRANE
$I_{cuchillas}$	INERCIA DE LAS CUCHILLAS
$I_{separadores}$	INERCIA DE LOS SEPARADORES
α	VELOCIDAD MEDIA
$M_{equivalente}$	MOMENTO EQUIVALENTE
τ_{cy}	ESFUERZO CORTANTE TRANSVERSAL
τ_T	CORTANTE POR TORSIÓN
σ_b	ESFUERZO FLECTOR
S_y	LÍMITE A LA FLUENCIA
S_{ut}	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN
S_e	RESISTENCIA A LA FATIGA
k_{carga}	FACTOR DE CARGA
$k_{tamaño}$	FACTOR DE TAMAÑO
$k_{superficie}$	FACTOR DE SUPERFICIE
$k_{temperatura}$	FACTOR DE TEMPERATURA
$k_{confiabilidad}$	FACTOR DE CONFIABILIDAD
f_s	FACTOR DE SEGURIDAD
K_f	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO POR FATIGA DE FLEXIÓN
q	SENSIBILIDAD DE LA MUESCA
K_i	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO
K_{fs}	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO POR FATIGA DE TORSIÓN
$q_{constante}$	SENSIBILIDAD DE LA MUESCA AL CORTANTE
K_{is}	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZO POR TORSIÓN

σ_{em}, σ_{ea}	ESFUERZOS EQUIVALENTES DE LA TEORÍA DE FALLA DEL ESFUERZO CORTANTE MÁXIMO (T.E.C.M).
m	MÓDULO DEL ENGRANE
i	RELACIÓN DE TRANSMISIÓN
ϕ	ÁNGULO DE PRESIÓN RECOMENDADO PARA ENGRANES RECTOS
S_{at}	ESFUERZO ADMISIBLE
S_{ad}	ESFUERZO ADMISIBLE MÁXIMO
σ_{ad}	ESFUERZO ADMISIBLE MÁXIMO
w	VELOCIDAD DE SALIDA
a ó de_1	DISTANCIA ENTRE CENTROS
ψ	FACTOR DE GUIADO
γ	FACTOR DE FORMA DE LEWIS
D_i	DIÁMETRO INTERIOR
Z_p	NÚMERO DE DIENTES ENGRANE
D_i	DIÁMETRO INTERIOR
D_e	DIÁMETRO EXTERIOR
D_b	DIÁMETRO BASE
e_1	ESPESOR DEL DIENTE
B	ANCHO DEL ENGRANE
a_1	ADENDUM DEL ENGRANE
b_1	DEDENDUM DEL ENGRANE
h_1	ALTURA DEL DIENTE
m_{pr}	RELACIÓN DE CONTACTO
$F_{tangencial}$	FUERZA TANGENCIAL GENERADA POR EL ENGRANE RECTO
F_{radial}	FUERZA RADIAL GENERADA POR EL ENGRANE RECTO
F_{axial}	FUERZA AXIAL GENERADA POR EL ENGRANE RECTO
ϕ	ÁNGULO DE PRESIÓN RECOMENDADO PARA ENGRANES RECTOS
j_1	FACTOR GEOMÉTRICO
K_{vp_1}	FACTOR DINÁMICO
K_{o_1}	FACTOR DE SOBRECARGA

K_{S_1}	FACTOR DE TAMAÑO
K_{m_1}	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA
K_{b_1}	FACTOR DE ESPESOR DEL ARO
Y_N	FACTOR DE CICLOS DE ESFUERZO
ρ	DENSIDAD
ν	FRACCIÓN DE VOLUMEN
E	MÓDULO DE ELASTICIDAD
G	MÓDULO DE CIZALLAMIENTO
μ	COEFICIENTE DE POISSON
$V_{compuesto}$	VOLUMEN DE COMPUESTO
V_{matriz}	VOLUMEN DE MATRIZ
V_{fibra}	VOLUMEN DE FIBRA
ε	DEFORMACIÓN
X_i	DEFORMACIONES EN EL RANGO DE 0.0005 % A 0.0025 %
X_m	PROMEDIO DE LAS DEFORMACIONES X_i
Y_i	ESFUERZOS EN EL RANGO DE $\varepsilon = 0.0005$ % A $\varepsilon = 0.0025$ %
Y_m	PROMEDIO DE LOS ESFUERZOS Y_i

RESUMEN

Actualmente, en el Ecuador se fabrica un material 100% reciclado a base de envases Tetra Pak®. La elaboración de este representa la importación de basura a nuestro territorio, puesto que la empresa fabricante, Ecuaplastic, tiene que importar el 20% de materia prima de países vecinos como Colombia y Perú. Asimismo, en el Ecuador se fabrica diversos tipos de inmobiliarios en base a madera. La fabricación de modulares en base a madera ha comprometido gran parte de los bosques ecuatorianos. Por lo que actualmente la deforestación del país alcanza el 56.25% en 12 provincias del Ecuador.

Tomando en cuenta los antecedentes antes mencionados, el presente proyecto tiene como fin la caracterización mecánica de distintas planchas de material compuesto. El mismo que estará conformado a base de polialuminio y polímero reciclado.

La materia prima base a utilizar, son los 2 mayores contaminantes plásticos del país, polipropileno y polietileno tereftalato, los cuales serán triturados y formarán matrices poliméricas de diversos porcentajes que posteriormente tendrán un refuerzo de polialuminio y estas serán prensadas térmicamente.

Los resultados son favorables en todas las mezclas, por lo que se puede decir que aquella cuya matriz polimérica es del 100% de material reciclado y refuerzo de polialuminio Tetra Pak® supera las propiedades mecánicas de las planchas que se encuentran en el mercado.

Palabras claves:

- **POLÍMERO**
- **MATERIAL COMPUESTO**
- **MATRIZ POLIMÉRICA**
- **REFUERZO**

ABSTRACT

Currently, Ecuador manufactures a 100% recycled material based on Tetra Pak® containers. It's built up represents the importation of garbage Tetra Pak® into our territory. Thus, the manufacturer named Ecuaplastic, must import 20% of its raw material from neighboring countries such as Colombia and Peru. Also, Ecuador manufactures different types of wood-based conglomerates. These wood-based modular manufacturing had compromised a large part of Ecuadorian forests. Therefore, deforestation of the country currently reaches 56.25% in 12 provinces of Ecuador.

Considering the mentioned background, the present project aims to develop the mechanical characterization of different sheets of composite material. The same that will be made up of polyaluminium and recycled polymer.

The raw material to be used, are the two largest plastic pollutants in the country, polypropylene and polyethylene terephthalate. These materials will be crushed and form polymeric matrices of various percentages and it will have a polyaluminium reinforcement. Then it will be thermally pressed.

The results are expected to be favorable in all mixtures, so it can be said that the one whose polymer matrix is 100% recycled material with a Tetra Pak® polyaluminium reinforcement will exceed the mechanical properties of the plates that are already on the market and are marketed under the name of "Ecopak".

Key Words:

- **POLYMER**
- **COMPOSITE MATERIAL**
- **POLYMERIC MATRIX**

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 ANTECEDENTES

Diariamente la población mundial aumenta y con ella la cantidad de residuos no biodegradables, el consumo excesivo de derivados de petróleo ha llevado a la humanidad a formar islas plásticas en el océano (Geocycle, 2018).

Actualmente los residuos de Tetra Pak® son a nivel mundial uno de los más reciclados. Según la revista Ekos el Ecuador cada año importa 6 000 toneladas de Tetra Pak® y únicamente 750 toneladas son recicladas a través de la producción de tableros, cubiertas y demás gracias a la empresa Ecuaplastic (Muñoz, 2016).

“Tetra Pak® es la compañía líder a nivel mundial en soluciones de envasado y procesado de alimentos. Productos lácteos, bebidas, helados, queso, alimentos y verduras, y alimento para mascotas son ejemplos de los productos que se pueden procesar o envasar en las líneas de procesado y envasado de Tetra Pak®” (Pak®, 2019).

En el año 2013 se realizó una alianza entre la empresa Tetra Pak® y Ecuaplastic, para fomentar el reciclaje y lograr así la elaboración de distintos tipos de cubiertas y tableros mediante la materia prima obtenida de los envases de Tetra Pak®. Dichos productos son únicamente elaborados de polialuminio reciclado (Ecuaplastic, 2018).

Ecuaplastic ha denominado al polialuminio la “nueva madera”, pues el resultado de la reutilización de materiales Tetra Pak® le ha permitido la construcción integral de su oficina de 90 m² con 310 000 envases de 1 litro. No solo las paredes, sino floreros, mesas, techo y piso están hechos de pequeños trozos de polialuminio triturado y compactado. Cada día Ecuaplastic produce

120 cubiertas y procesa 30 toneladas de envases al mes. El kilo de envases de Tetra Pak® cuesta USD 0,10. Por ello, los productos finales son baratos: los tableros para pisos cuestan USD \$ 10 por m², mientras que una cubierta está en USD \$ 16, el precio varía según el tamaño y espesor. En el año 2017 se logró únicamente reciclar un 11,9% de todo el Tetra Pak® vendido en ese año. El 88,1% terminó en rellenos y botaderos. Para el 2020 la meta de la compañía Ecuaplastic con Tetra Pak® es recolectar y reciclar el 40% de los envases consumidos en el país (Ecuaplastic, 2018).

Valarezo María Isabel en su reportaje “Los desechos de Tetra Pak® sirven para levantar casas”, afirma que a los residuos de polialuminio los secan, muelen, moldean y prensan a 2 000 PSI a 180 °C para convertirse en tableros macizos, los mismos que están libres de cualquier compuesto químico. Las planchas elaboradas sirven para fachadas, tabiques, muebles, mesones y otros elementos constructivos. De la misma manera, con la unión de estos tableros más hierro y/o acero reciclados, es posible construir viviendas totalmente ecológicas que, si las circunstancias lo requieren, se pueden desmontar y volver a montar en otro sitio sin problemas. También, se afirma que la construcción con elementos de polialuminio consta de las siguientes ventajas: son termoacústicas (buenos aislantes de calor y temperatura), poliformables, no necesitan acabados como pintura y tienen una larga vida útil (30 años de garantía) (Valarezo, 2018).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

“Entre el 2015 y 2017, los registros de los residuos contaminantes, recogidos por el Ministerio del Ambiente, en cuatro regiones, son alarmantes: En los tres últimos años, se recolectaron 499,33 toneladas de desechos a escala nacional. En ese período de tiempo, la contaminación por botellas plásticas lidera en la región Costa con 92 292 unidades, las tapas de tarrina con 81 932 y las tarrinas de comida con 58 102 unidades. En la Sierra, 60 552 tarrinas de comida, 55 216 botellas de plástico,

28 206 tapas de tarrinas. En la Amazonía, en cambio, se encontraron 22 201 botellas plásticas, 10 708 tarrinas de comida, 10 324 tapas de tarrinas. La región Insular registra el menor número de residuos, según la campaña de limpieza, con estas cantidades: 12 877 botellas plásticas, 2 318 tapas de tarrinas y 1 650 tarrinas de comida” (Norroña, 2018).

Actualmente no se cuenta con datos estadísticos precisos de la cantidad de residuos que genera Tetra Pak®, pero gracias al Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), sabemos las toneladas métricas de los principales desechos y desperdicios importados, en el cual se encuentra como subdivisión “residuos y desperdicios de la industria alimentaria”, el mismo que va incrementando cada año y en el 2017 es tiene 1 161 388.173 toneladas métricas (INEC, 2017).

Por lo que la presente investigación puede ser considerada como un complemento a proyectos futuros que permitan al país un mejor desarrollo y eliminación de residuos contaminantes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar las propiedades mecánicas y modelar el material compuesto entre polialuminio Tetra Pak® reciclado, polipropileno y polietileno tereftalato reciclado.

1.3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Elaborar un material compuesto capaz de satisfacer las necesidades en la industria o la sociedad, que sea eficiente y económico; mediante la trituración de la materia prima y prensado térmico de la misma.
- Caracterizar el material compuesto, para obtener las propiedades mecánicas.
- Realizar los ensayos mecánicos necesarios para validar las propiedades de este.

- Simular mediante el método de elementos finitos el material compuesto.
- Alcanzar una adecuada correlación entre resultados experimentales y de simulación.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La finalidad del proyecto es la elaboración de un material a base de polialuminio y plástico reciclado. El mismo que pretende la disminución en la importación de basura Tetra Pak®, así como también, la disminución de deforestación debido a la elaboración de materiales constructivos en base a madera.

Actualmente, la empresa dedicada a la producción de planchas de polialuminio, Ecuaplastic, se encuentra importando el 20% de la materia prima de los países vecinos, Colombia y Perú, ya que en Ecuador la cantidad de envases de Tetra Pak® reciclados no es suficiente para procesar las 30 toneladas mensuales requeridas para la elaboración de las viviendas destinadas a la provincia de Manabí (Ecuaplastic, 2018).

Se pretende elaborar un producto a base de polialuminio y plástico reciclado. El plástico que se seleccionará será polietileno tereftalato o polipropileno proveniente de los mayores contaminantes de nuestra nación, como son botellas plásticas (PET) y tarrinas de comida con sus tapas (PP) (Morán, 2018).

En el año 2017 el censo realizado a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GAD), reveló que existe una deforestación del 56.28% en 12 provincias del Ecuador, siendo esta la segunda afectación principal de los GAD Provinciales con un porcentaje del 28.83%. Tomando en cuenta que únicamente se conservan áreas forestadas con especies nativas en 3 provincias, como son: Azuay con un 15.76%, Cañar con un 31.51% y Zamora Chinchipe con un 52.73% (INEC, 2017).

La exportación de madera ha incrementado cada año, en 2016, “Ecuador exportó \$ 137 millones entre tablero aglomerado, tablero MDF y madera tríples. Desde una óptica consolidada, estas exportaciones muestran una tendencia creciente desde el 2014. La participación por producto en 2016 muestra que el mayor valor exportado correspondió a tableros aglomerados (67%), seguido de madera tríples (28%) y finalmente tableros MDF con solo 5%”, siendo Colombia el mayor comprador un 56% (Brito, 2017).

Así mismo, este nuevo material pretende reemplazar el consumo desmesurado de bienes proveniente de la madera, puesto a que actualmente no se cuenta con un plan de forestación adecuado para que el medio ambiente no sufra en sí. Se pretende realizar un material de mejor calidad, a menor costo y menor impacto ambiental, ya que el mismo será fabricado con materia prima totalmente reciclada.

Para la elaboración de una puerta de dimensiones 2.00 m x 0.80 m se requiere 8 326 envases de 1 litro Tetra Pak®, tomando en cuenta que únicamente el Ecuador recicla anualmente un aproximado de 16 millones de envases Tetra Pak® de diversas presentaciones. (Tetra Pak®, 2017).

Se puede enfrentar este problema con el desarrollo de un nuevo material a base de polialuminio reciclado de Tetra Pak®, polipropileno y polietileno tereftalato.

Dicho material además de conservar el medio ambiente ahorrará recursos al Ecuador y lo más importante, mejorará las condiciones de vida de la población.

El presente proyecto de investigación será de aporte para una futura redefinición al uso de materiales provenientes de recursos no renovables, así como también al aprovechamiento del plástico desechado para la elaboración de bienes vitales para la sobrevivencia digna de la población ecuatoriana.

1.5 ALCANCE

El alcance de este proyecto de titulación tendrá como fin, el análisis comparativo entre las planchas realizadas únicamente de polialuminio reciclado de Tetra Pak® (planchas de la empresa Ecuaplastic) y el material compuesto elaborado por polialuminio de Tetra Pak® y polipropileno, así como también de polialuminio Tetra Pak® y polietileno tereftalato, para así determinar las posibles aplicaciones y a su vez obtener la combinación adecuada que permita el mejor aprovechamiento de sus propiedades mecánicas con un enfoque técnico, de ese modo dicha información sea utilizada como referencia para comparar el beneficio de dicho material frente a las propiedades de los materiales comunes como aglomerados entre otros, que son los más utilizados para la elaboración de diversos tipos de mobiliarios, mamposterías y demás.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se pueden entender como la combinación o unión macroscópica de dos o más componentes de diferentes características esencialmente insolubles entre sí, dando como resultado un material de mejores propiedades estructurales que las de sus componentes cuando actúan individualmente (Lean Manufacturing, 2018).

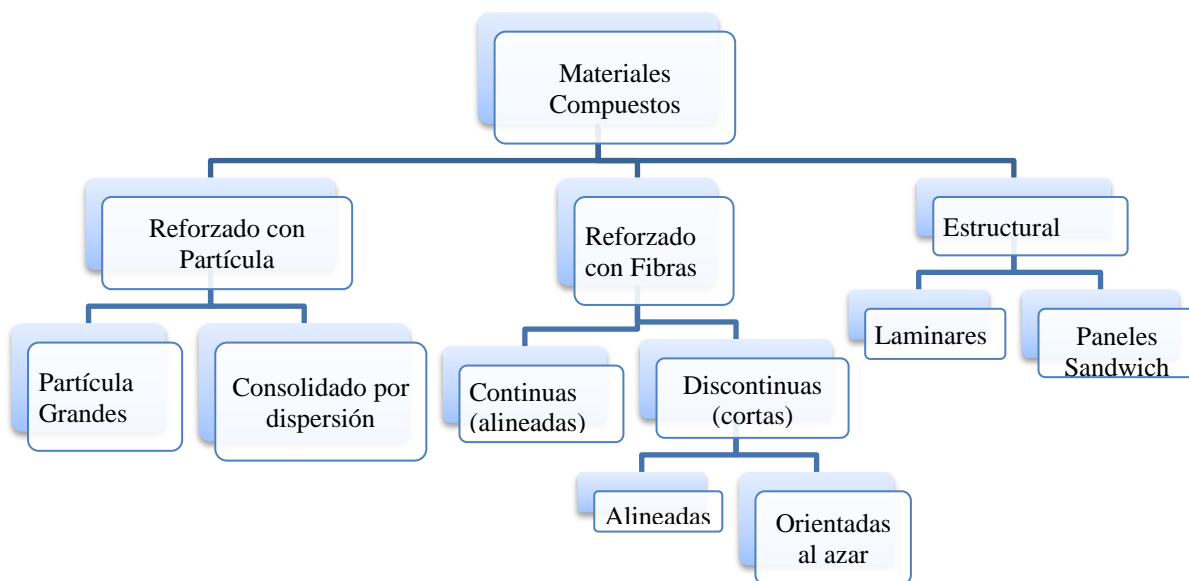


Figura 1. Material compuesto y su clasificación

Fuente: (Stupenengo, 2011)

Estos materiales se pueden definir principalmente por dos fases:

Fase de refuerzo: Fase discontinua, región del material que aporta con resistencia y rigidez.

Matriz: Fase continua región del material que aporta la cohesión entre fases, generalmente es la de menor rigidez. Es la fase que transmite los esfuerzos a las láminas o fibras.

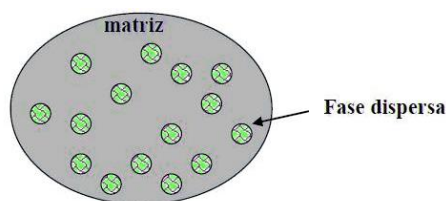


Figura 2. Material compuesto

Fuente: (Mariano, 2011)

2.1.1 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS EN FUNCIÓN AL TIPO DE MATRIZ

En función del tipo de matriz, se tiene la siguiente clasificación:

a. Materiales compuestos de matriz metálica (MMC):

Los materiales de matriz metálica poseen un bajo peso y una alta resistencia. (Edil da Costa, 2000).

b. Materiales compuestos de matriz cerámica (CMC):

Los materiales compuestos de matriz cerámica ofrecen una gran resistencia a altas temperaturas sin cambiar su capacidad, a su vez la conductividad térmica, conductividad eléctrica y tenacidad son muy bajas (Composites, 2016).

c. Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC):

Polímeros reforzados para mejorar sus propiedades mecánicas, debido a sus propiedades físicas tienen una libertad de adquirir casi cualquier forma. Tiene alta resistencia a la corrosión y a los agentes químicos (Stupenengo, 2011).

2.1.2 TIPOS DE MATERIALES COMPUESTOS EN FUNCIÓN A LA FORMA QUE POSEE EL REFUERZO

En función de la forma que posea el refuerzo, se tiene la siguiente clasificación:

a. Compuestos reforzados por partículas:

Son materiales reforzados con nanopartículas endurecidos por dispersión, estas partículas evitan dislocaciones y producen un endurecimiento pronunciado. En general la matriz transmite la carga a las partículas las cuales soportan una fracción de la fuerza (Askeland R., 2004).

b. Compuestos reforzados por fibras:

Gran parte de los materiales reforzados con fibras adquieren una mayor resistencia a la fatiga mejorando el módulo de Young y una de las características más importantes es la relación resistencia peso, obteniendo materiales más ligeros con altas resistencias. Para los materiales reforzados con fibras se debe tener en cuenta factores como longitud, diámetro, cantidad, orientación, y propiedades en general (Askeland R., 2004).

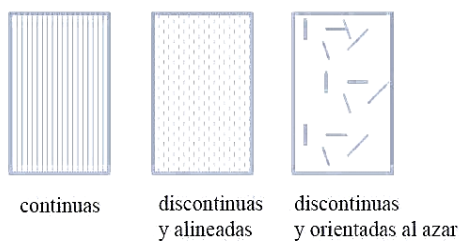


Figura 3. Material compuesto

Fuente: (Mariano, 2011)

c. Compuestos estructurales:

Los compuestos estructurales están en función no solo de los materiales que conforman sino también de la geometría del diseño de los elementos que lo estructuran. Los materiales compuestos estructurales se clasifican en: estructuras sándwich, compuestos laminares y estructuras no laminares (Ciencia de Materiales, 2005).

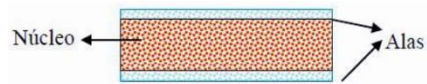


Figura 4. Material sánduche

Fuente: (Mariano, 2011)

2.1.3 MATRICES POLIMÉRICAS

Esta matriz se caracteriza por ser un material constituido por grandes moléculas que forman cadenas por medio de enlaces covalentes o simples. Los materiales de matrices poliméricas se clasifican en 2, termoestables y termoplásticas, esto dependerá si el material presenta o no reticulaciones.

Las matrices termoestables son aquellas cuyos enlaces son covalentes formados mediante una reacción de reticulación o curado. Las mismas que presentan las siguientes características.

- Facilidad de procesado antes del curado debido al bajo peso molecular de las resinas precursoras o prepolímeros.
- Más tenacidad debido al curado.
- Mayor fragilidad que las termoplásticas (Ramis, 2018).

Se caracterizan las matrices termoplásticas por no tener uniones permanentes ya que las cadenas no reticulan. Estas matrices presentan las siguientes características.

- Su procesamiento es complejo ya que para tener buenas propiedades mecánicas debe tener un alto peso molecular.
- Estos materiales se los puede reutilizar ya que se reblandecen al calentar y vuelven a la forma sólida al enfriarse (Capella, 2006).

2.1.3.1 MATRIZ TERMOESTABLE

Aquellos polímeros que presentan una serie de reacciones químicas denominadas curado o reticulación se las conoce como resinas termoestables. Como resultado se obtiene un producto rígido, insoluble e infusible y se la obtiene de la siguiente manera:

- Polimerización parcial para que el monómero forme cadenas lineales.
- Se completa el curado bajo calor y presión (Mariano, 2011).

2.1.3.2 MATRIZ TERMOPLÁSTICA

Las matrices termoplásticas son aquellas cuyas moléculas lineales se encuentran unidas por enlaces sencillos. Su característica más importante es tener una temperatura por encima de la cual empiezan a fluir y al enfriarse por debajo de esa temperatura vuelven a su estado sólido.

El procesamiento de los termoplásticos consta de dos fases: calentamiento para ablandar el material y realizar su moldeo y de enfriamiento para endurecerlo una vez moldeado en la forma requerida (Diez Gonzales, 1995).

2.2 POLÍMEROS

Se denomina polímeros a aquellas moléculas de gran tamaño formadas por eslabones orgánicos denominados monómeros, los cuales se encuentran unidos por medio de enlaces covalentes. Las cadenas están formadas, principalmente, por átomos de carbono los cuales pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Las moléculas orgánicas son las cuales constituyen los materiales plásticos que se conocen (Textos Científicos, 2006).

2.2.1 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

Los polímeros son aquellos que se comportan de manera plástica a altas temperaturas y se caracteriza porque no sufre cambios radicales en sus enlaces cuando la temperatura se eleva, lo cual permite ser conformado en altas temperaturas y al enfriar mantiene su forma. Este material puede ser reconformado sin que se modifique sus propiedades del polímero. Los termoplásticos tiene un comportamiento lineal (se repite el mismo tipo de enlace) (Fombuena, 2016).

2.2.1.1 POLIPROPILENO

El polipropileno es el polímero termoplástico de mayor uso como matriz, sobre todo el isotáctico¹, a su vez la densidad es la menor entre los termoplásticos. El polipropileno es uno de los materiales que presenta buenas propiedades mecánicas y térmicas además es un material altamente reciclable (Hermida, 2011).

Este material es uno de los plásticos que se fabrican en gran volumen, es muy ligero y el más cristalino. Su temperatura de transición vítrea es de -10 °C. La resistencia a la tracción, dureza y rigidez son mayores que las de los polietilenos, pero a su vez la resistencia al impacto es baja. Una desventaja importante: es la sensible a la luz, el calor y el oxígeno que hacen que se degrade, para evitar que pierda propiedades añaden antioxidante y un estabilizador a la luz ultravioleta, lo que lleva a elevar los costos (Miravete, 2012).

Tabla 1.

Datos técnicos Polipropileno Homopolímero

Polipropileno homopolímero				PP-H
Propiedades mecánicas a 23°C	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	gr/cm ³	D-792	53479	0.91
Resist. a la tracción. (fluencia / rotura)	Kg/cm ²	D-638	53455	300 / --

¹ Polímero Isotáctico. –Polímero irregular cuyas moléculas pueden definirse por una sola unidad configuracional base, en una sola disposición secuencial (Camaleon, 2016).

Res. A la compresión (1 y 2% def)	Kg/cm ²	D-695	53454	80 / 120
Resistencia a la flexión	Kg/cm ²	D-790	53452	230
Res. al choque sin entalla	Kg*cm/cm ²	D-256	53453	NO ROMPE
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	600
Módulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm ²	D-638	53457	11500
Dureza	Shore D	D-2240	53505	71-74
Coef. de roce estático s/acero		D-1894		--
Coef. de roce dinámico s/acero		D-1894		0.30 a 0.45
Res. al desgaste por roce				Regular

Fuente: (JQ, 2018)

2.2.1.2 POLIETILENO TEREFALATO

Es un polímero que se obtiene de la reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol de la familia de los poliésteres. El polietileno tereftalato tiene una alta grado de transparencia y resistencia a la fluencia otras de sus características es una buena resistencia al fuego y propiedades eléctricas (Ojeda, 2011).

El PET es un termoplástico lineal². se puede procesar por diferentes métodos de conformado como inyección, soplado, termoconformado, entre otros (Lara Cascante, 2012).

Tabla 2.

Datos técnicos Polietileno Tereftalato

Polietileno tereftalato				PET
Propiedades mecánicas a 23°C	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
Resistencia a la tracción (fluencia / rotura)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
Res. A la compresión (1 y 2% def)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la flexión	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
Res. Al choque sin entalla	Kg*cm/cm ²	D-256	53453	>50
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	85-87
Coeficiente de roce estático s/acero		D-1894		--
Coeficiente de roce dinámico s/acero		D-1894		0.20
Res. Al desgaste por roce				Muy Buena

Fuente: (JQ Industrias, 2018)

² Polímero Lineal. –Se origina cuando el monómero que lo forma tiene dos puntos de ataque, de modo que el polímero se forma unidireccionalmente, formando cadenas lineales (Educativo, 2015).

2.3 TETRA BRIK DE TETRA PAK®

“Tetra Brik es el nombre comercial del envase larga vida más conocido de la gama de productos que fabrica la empresa sueca Tetra Pak®. El Tetra Brik®, así como los otros envases de la familia de Tetra Pak®, está compuesto de 6 capas, que actúan de barrera de protección para que los alimentos se mantengan en óptimas condiciones durante un largo periodo de tiempo sin la necesidad de conservantes químicos ni refrigeración.

Es un envase mixto multicapa que se compone de tres materiales diferentes: cartón (procedente de celulosa virgen), plástico polietileno y aluminio. Estos materiales están dispuestos en cinco láminas superpuestas” (Reciclario, 2018).

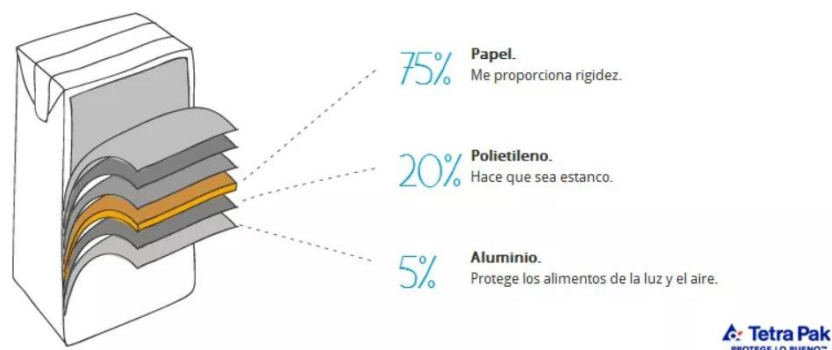


Figura 5. Tetra Brik Tetra Pak®

Fuente: (Tetra Pak®, 2016)

2.4 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos es una herramienta que nos permite desarrollar un modelo matemático para el análisis de varios problemas con dificultad de resolución analítica de un sistema obteniendo resultados aproximados a lo real. El concepto del método de elementos finitos se basa en la división de un modelo en conjuntos de elementos pequeños interconectados por una serie de

puntos llamados nodos, las ecuaciones que rigen el dominio regirán el elemento. Los sistemas se modelan con ecuaciones diferenciales con un número finito de grados de libertad (Murillo, 2018).

a. Dominio:

Dominio se denomina a la región del sistema que se va a analizar el comportamiento.

b. Condiciones de contorno o de frontera:

Variables del sistema que son conocidas que rigen el cambio del sistema, que se establecen como constantes, por ejemplo, fuerzas, temperatura, voltaje, etc.

c. Condiciones iniciales:

Condiciones iniciales son las que se expresan en un tiempo $t=0$ el valor de la función.

d. Incógnitas:

Son variables que vamos a analizar para conocer su comportamiento como por ejemplo esfuerzos, desplazamientos, etc.

e. Elemento:

Los elementos se dan de la partición de un dominio en un número discreto de puntos denominados nodos. Se puede diferenciar como elementos unidimensionales para dominios lineales y elementos bidimensionales si se trata de un área y elementos tridimensionales en el caso de volúmenes (Frías, 2004).

f. Nodo:

Es el punto donde convergen dos o más elementos donde se aplican las ecuaciones que rigen el comportamiento frente a diferentes condiciones.

g. Malla:

Malla es la agrupación de nodos dentro de un dominio donde el tamaño de la malla dependerá de la distancia entre nodos o el número de elementos dentro del entorno, sin variar las dimensiones del dominio.

h. Grado de libertad:

El grado de libertad de un nodo se define como el número de incógnitas necesarios para definir o calcular el resto de las incógnitas en nodo del modelo (Carnicero, 2018).

Se verá con mayor profundidad en el capítulo 4.

2.5 MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS PARA MATERIALES COMPUESTOS.

Existen diversos trabajos donde utilizan el método de elementos finitos para la aproximación de las propiedades de los materiales compuestos, ya que es una herramienta muy útil debido a su capacidad para modelar geometrías complejas y el análisis de los efectos del material compuesto sobre la misma. Hay casos donde se han simulado partículas utilizando modelos tanto 2D como en 3D, por medio de figuras como cubos, cilindros, conos, etc. Para la validación del modelo usado se comparan con modelos matemáticos teóricos y con mediciones experimentales.

Debido a la complejidad en cuanto al modelamiento, a la geometría y simulación de problemas tridimensionales se han abordado con objetos bidimensionales usando aproximaciones axi-simétricas, así como también de deformaciones o esfuerzos planos.

Las microestructuras reales de los materiales son complejas de simular ya que muestran aleatoriedad en su distribución, por lo tanto, se asumen arreglos periódicos siendo estos cuadrados,

hexagonales o circulares. Varios trabajos realizados se analizaron utilizando varios modelos, celadas unitarias y elementos volumétricos representativos (RVE) (Pahlavanpour, 2013).

Según el trabajo realizado por de Devireddy y Biswas en el estudio del comportamiento mecánico de los compuestos por medio de elementos finitos y la de software computacional que corresponde a un material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras de vidrio.

La matriz constitutiva anisotrópica que utilizaron para el análisis es correspondiente a un material homogéneo y elástico, dado por la ley de Hooke (Devireddy, 2014).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \equiv \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix}$$

Donde los autores definen σ_{ij} y τ_{ij} son las componentes normales y de corte del esfuerzo, ε_{ij} y τ_{ij} los componentes normales de la matriz deformación, C_{ij} la matriz simétrica de rigidez con 21 constantes elásticas independiste. Al considerar a este material isotrópico transversalmente calculan los módulos de rigidez longitudinal y transversal mediante las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$E_1 = C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}}$$

$$E_2 = \frac{[C_{11}(C_{22} + C_{23})2C_{12}^2](C_{22} - C_{23})}{(C_{11}C_{22} - C_{12}^2)}$$

CAPÍTULO III

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TRITURADORA

En este capítulo se desarrollarán los parámetros y condiciones para el diseño y construcción de la máquina trituradora.

3.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

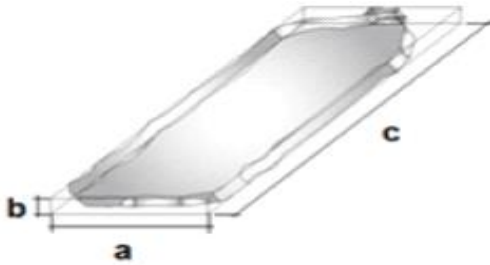
La máquina triturará envases de polietileno tereftalato (PET) y de polipropileno (PP), conociendo que estos materiales tienen una dureza entre 85-87 Shore D³ y 71-74 Shore D respectivamente; a su vez se tiene que la carga de rotura del PP es de 300 kgf/cm² y del PET es de 900 kgf/cm², por lo que se toma como base para el diseño el material más duro que es el polietileno tereftalato. Las propiedades mecánicas del polietileno tereftalato (PET) se muestra en la Tabla 2 y las propiedades mecánicas del polipropileno (PP) se muestra en la Tabla 1, en el capítulo II.

3.2 DISEÑO DE LA TRITURADORA

Para el diseño de la máquina trituradora se toma en consideración los parámetros definidos que se muestran en la Tabla 3.

³ Dureza Shore. – Se define como un ensayo dinámico de dureza por rebote, donde este es la reacción elástica del material al ser penetrado o al entrar en contacto con otro más duro. Mientras más blando sea el material, mayor cantidad de la energía se absorbe en el choque. La energía traducida en un rebote es la que se obtiene como dureza Shore. (Fernández, 2014)

Tabla 3.*Parámetros de diseño*

Parámetro	Medida/Condición	Observaciones
Dimensiones de la cámara de trituración	Largo: 164 mm Ancho: 172 mm	Se tritura 1 botella de 3 litros a la vez
Dimensiones de la botella compactada	Largo (c): 340mm Ancho (a): 170 mm Espesor (b): 1 mm	 <p><i>Figura 6.</i> Botella compactada</p>
Capacidad	8 kg/h	Se tritura 101 botellas de 3 litros en 1 hora. La densidad del plástico PET amorfo es de $\rho = 1370 \frac{kg}{m^3}$ (Govaert, 1999)
Disposición de triturado	Doble eje	Permite la trituración de una botella a la vez
Diámetro de las cuchillas	70 mm	Dimensión predefinida por los diseñadores
Reductor de velocidad	90 rpm	SD

3.2.1 POTENCIA DEL MOTOR

Para la selección del motor, se analiza los diferentes tipos de fuerzas que actúan en el mismo y la potencia requerida de este, las cuales se encuentran resumidas en la Tabla 4.

Tabla 4.*Fuerzas aplicadas y potencia requerida*

Fuerza	Ecuación	Valor
Corte	$F_{corte} = 2.27 * e_{chapa}^2 * \sigma_R$	$F_{corte} = 1.803 \text{ kN}$
Corte final	$F_{cortefinal} = F_{corte} * FS$	$F_{cortefinal} = 2.25 \text{ kN}$
Torque del motor	$T_{motor} = F_{cortefinal} * \frac{D_{cuchilla}}{2}$	$T_{motor} = 78.888 \text{ N} \cdot \text{m}$
Potencia del motor	$P_{motor} = T_{motor} * W_{salida}$	$P_{motor} = 0.997 \text{ hp}$

Se requiere como mínimo un motor con una potencia de 1 hp para la trituradora, por disponibilidad en el mercado, se tiene un motor de 1.5 hp marca Bonelli.

La memoria de cálculo detallada de las fuerzas aplicadas y potencia requerida se encuentra en el Anexo A.

3.2.2 DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA

Se tiene una cámara de trituración de 164 mm de largo por 172 mm de ancho, por lo que se tiene una longitud útil de eje de 164 mm en cual se distribuirán tanto las cuchillas como los anillos separados. La cantidad de cuchillas y anillos separados se muestran en la Tabla 5. Para mayor detalle de su configuración y cálculo, ver Anexo A.

Tabla 5.

Distribución Geométrica

Elemento Mecánico	Medida/Condición	Observaciones
Número de cuchillas	$Z_{cuchillas} = 8$	$Z = \frac{V_{alimentacion} * 6000}{n * D_{pelet}}$ El número mínimo de cuchillas es 5
Espesor de las cuchillas	$e_{cuchillas} = 10 \text{ mm}$	Este valor garantiza la máxima reducción de área
Número de separadores	$Z_{separadores} = 8$	Se toma esta cantidad de separadores, para que estos separen y a su vez distribuyan de manera uniforme a las cuchillas a lo largo del eje
Espesor de los separadores	$e_{separadores} = 10 \text{ mm}$	Se decide este valor para garantizar un diseño simétrico

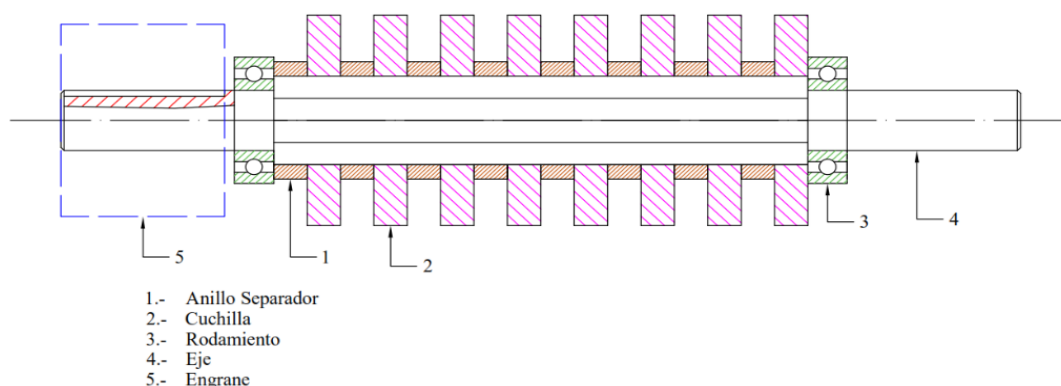


Figura 7. Diseño Geométrico

La máquina trituradora tiene una disposición de doble eje, tal como se define en la Tabla 3, los mismos que consta de un engrane recto los cuales tienen la siguiente geometría, la cual se detalla en la Tabla 6, misma que se define en el Anexo B, así también como su diseño general.

Tabla 6.

Dimensiones del Engrane Recto

Parámetro	Medida/Condición	Observaciones
Relación de transmisión	$i = 1$	Se define este valor debido a que se utilizarán únicamente para transmitir potencia y movimiento angular de un eje a otro
Ángulo de presión	$\phi = 20^\circ$	Valor recomendado para engranes rectos
Módulo	4	Valor calculado bajo la fórmula de Lewis
Número de dientes	14	Número de dientes definido para asegurar la inexistencia de interferencia entre piñón y rueda
Diámetro de paso	56 mm	Valor calculado
Diámetro exterior	64 mm	Valor calculado
Ancho	40 mm	Valor calculado

3.2.3 DISEÑO DE LA FLECHA

Para el diseño del eje se toma en cuenta los diferentes tipos de momentos y fuerzas que actúan sobre el mismo.

Dichas fuerzas y momentos se muestran en la Tabla 7, es necesario aclarar que el tipo de plástico a analizar es únicamente el polietileno tereftalato (PET), ya que este presenta un mayor esfuerzo al corte, los envases a triturar de PET son botellas de bebidas, por lo que se considera un espesor máximo de 1 mm.

Tabla 7.*Fuerzas y Momentos*

Fuerza/Momento	Ecuación	Valor
Fuerza tangencial piñón	$F_{tangencial} = \frac{2 * Pot_{motor}}{D_{paso} * w}$	$F_{tangencial} = 4.239 \text{ kN}$
Fuerza radial piñón	$F_{radial} = F_{tangencial} * \tan \phi$	$F_{radial} = 1.543 \text{ kN}$
Fuerza axial piñón	$F_{axial} = F_{tangencial} * \tan 0$	$F_{axial} = 0 \text{ kN}$ Los engranes rectos no generan fuerzas axiales
Fuerza de impacto	$F_{impoactocuchilla} = 1.5 * G_c * t$	$F_{impoactocuchilla} = 105 \text{ N}$
Fuerza de corte	$F_{cortecuchilla} = 2.27 * e_{chapa}^2 * \sigma_R$	$F_{cortecuchilla} = 100.175 \text{ N}$
Fuerza total	$F_{cuchilla} = F_{impoactocuchilla} + \frac{F_{cortecuchilla}}{2}$	$F_{cuchilla} = 205.175 \text{ N}$
Momento de impacto	$M_{impacto} = F_{impoactocuchilla} * L_1$	$M_{impacto} = 3.675 \text{ N} \cdot \text{m}$
Momento de corte	$M_{corte} = F_{cortecuchilla} * L_2$	$M_{corte} = 2.879 \text{ N} \cdot \text{m}$
Momento total	$M_{total} = M_{corte} + M_{impacto}$	$M_{total} = 6.554 \text{ N} \cdot \text{m}$
Momento de inercia	$M_{inercia} = I_{total} * \alpha$	$M_{inercia} = 9.223 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$
Momento equivalente	$M_{equivalente} = Z_{cuchillas} * M_{total} + M_{inercia}$	$M_{equivalente} = 54.441 \text{ N} \cdot \text{m}$

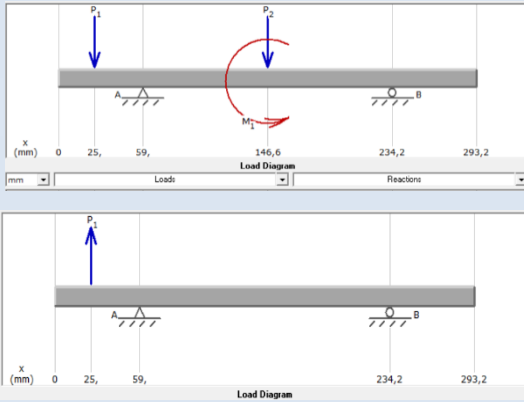

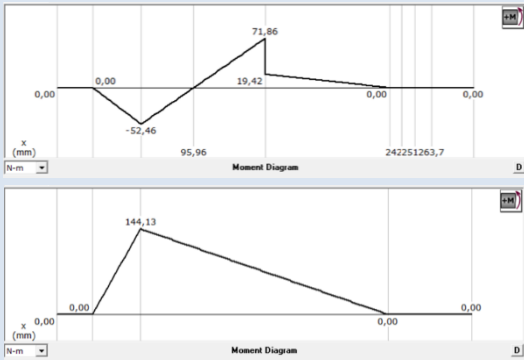
La memoria de cálculo detallada de las fuerzas y momentos de los elementos mecánicos se encuentra en el Anexo A, así como las fuerzas ejercidas por los engranes se detallan en el Anexo B.

3.2.4 ANÁLISIS DE LA FLECHA

Para el análisis del eje, se considera tanto los diagramas de esfuerzo cortante y momento flector, así como también el análisis punto crítico del mismo.

El análisis general se encuentra resumido en la Tabla 8

Tabla 8.*Análisis de la flecha*

Gráfica		Observaciones
Análisis principal	 <p>(a) Diagrama de fuerzas y momentos en plano X-Y</p> <p>(b) Diagrama de fuerzas y momentos en plano X-Z</p>	Se realiza un análisis en el software MDSolids, concentrado fuerzas y momento equivalente en el centro para tener un criterio conservador
Diagrama de esfuerzo cortante	 <p>(a) Diagrama esfuerzos cortantes en plano X-Y</p> <p>(b) Diagrama esfuerzos cortantes en plano X-Z.</p>	Se obtiene de este modo las siguientes reacciones en los apoyos: $R_{Ay} = 2.96 \text{ kN}$ $R_{By} = 0.22 \text{ kN}$ $R_{Az} = -5.06 \text{ kN}$ $R_{Bz} = 0.82 \text{ kN}$
Diagrama de momento flector	 <p>(a) Diagrama momentos flectores en plano X-Y</p> <p>(b) Diagrama momentos flectores en plano X-Z.</p>	Punto crítico en el rodamiento A

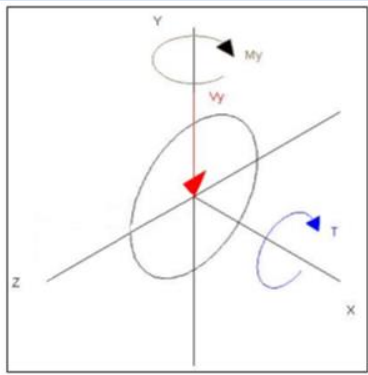
Sección crítica		Los esfuerzos cortantes transversales (τ_{cy}) se consideran insignificantes en comparación con el esfuerzo flector y el cortante por torsión.
-----------------	---	---

Figura 11. Sección crítica

La flecha está trabajando a fatiga, por lo que habrá esfuerzos estáticos y dinámicos, el esfuerzo cortante por torsión es netamente estático, pues no existe variación de su módulo ni de su dirección en el tiempo (en el Anexo A se encuentra la memoria de cálculo detallada del análisis general del eje).

El esfuerzo flector por otro lado varía en el tiempo y se considera totalmente alternante, por tanto, tendremos lo siguiente:

Para el esfuerzo flector:

$$\sigma_{bmax} = \frac{4908 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma_{bmin} = -\frac{4908 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma_{bm} = \frac{\sigma_{bmax} + \sigma_{bmin}}{2} = 0$$

$$\sigma_{ba} = \frac{\sigma_{bmax} - \sigma_{bmin}}{2} = \frac{4908 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

Para el cortante por torsión:

$$\tau_{Tmax} = \frac{1899 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_{Tmin} = \frac{1899 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_{Tm} = \frac{\tau_{Tmax} + \tau_{Tmin}}{2} = \frac{1899 \text{ N}\cdot\text{m}}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_{Ta} = \frac{\tau_{Tmax} - \tau_{Tmin}}{2} = 0$$

3.2.5 DISEÑO POR FATIGA

Para realizar el diseño mecánico, se toma las consideraciones que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9.*Diseño por Fatiga*

criterio	Descripción	Observaciones												
Material del eje hexagonal	Acero de transmisión AISI 1018 (estirado en frío)	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4"> Propiedades Mecánicas</th> </tr> <tr> <th> Resistencia Mecánica (N/mm2)</th> <th> Punto de Fluencia (N/mm2)</th> <th> Elongación %Min.</th> <th> Dureza ROKWELL B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> 410 - 520</td> <td> 235</td> <td> 20</td> <td> 143</td> </tr> </tbody> </table> <p> $S_y = 235 \text{ MPa}$ $S_{ut} = 410 \text{ MPa}$ <i>Figura 12. Propiedades mecánicas acero AISI 1018</i> Fuente: (Acero, 2018) </p>	Propiedades Mecánicas				Resistencia Mecánica (N/mm2)	Punto de Fluencia (N/mm2)	Elongación %Min.	Dureza ROKWELL B	410 - 520	235	20	143
Propiedades Mecánicas														
Resistencia Mecánica (N/mm2)	Punto de Fluencia (N/mm2)	Elongación %Min.	Dureza ROKWELL B											
410 - 520	235	20	143											
Factores de corrección de resistencia a la fatiga	$S_e = k_{carga} * k_{tamaño} * k_{superficie} * k_{temperatura} * k_{confiabilidad} * 0.5 * S_{ut}$	$k_{carga} = 1$ $k_{tamaño} = 0.85$ $k_{superficie} = 0.916$ $k_{temperatura} = 1$ $k_{confiabilidad} = 1$ Obteniendo de ese modo: $S_e = 159.574 \text{ MPa}$												
Factor de servicio	$f_s = 1.25$	Se considera este valor debido al funcionamiento de la trituradora, es para un servicio ligero, es decir pocas horas de trabajo y no de uso diario.												
Criterio de Soderberg	$\frac{S_y}{f_s} = \sigma_{em} + \left(\frac{S_y}{S_e}\right) * \sigma_{ea} \quad (1)$	Se utiliza este criterio conservador para calcular el diámetro mínimo que deberá tener la flecha en su sección crítica a fatiga para que de ese modo se aproxime de mejor manera a la realidad esperada en el trabajo y en tiempo de fallo. Obteniendo así una vida útil mayor.												
Esfuerzos equivalentes	$\sigma_{ea} = 2 * \tau_{maxa} = \frac{2632 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi * d^3}$ $\sigma_{em} = 2 * \tau_{maxm} = \frac{7038 \text{ N} \cdot \text{m}}{\pi * d^3}$	El subíndice “a” corresponde a los esfuerzos principales para el esfuerzo flector, mientras que el subíndice “m” corresponde a los esfuerzos principales para el esfuerzo cortante por torsión												

Se reemplaza los esfuerzos equivalentes obtenidos en la ecuación 1, y se obtiene que el diámetro mínimo del eje en la sección crítica es de 19.81 mm (diámetro interno del rodamiento), por disponibilidad en el mercado, se selecciona un eje hexagonal de 1 plg (25.4 mm) y se mecanizará a 20 mm el diámetro en cual ingresarán los rodamientos.

3.2.6 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

La selección de los rodamientos se basa en la información brindada en el catálogo NTN 2202 VII-S.

Con los datos obtenidos, se selecciona el rodamiento NTN 6004 por disponibilidad en el mercado, los cálculos detallados para la selección del rodamiento se encuentran en el Anexo A.

Dimensiones principales	Capacidades básicas de carga				Carga permisible		Factor	Velocidades límites			Números de rodamientos							
	dinámica		estática		kgf	kN		r.p.m.		LU,LLU	tipo abierto	con ¹⁾ tapas	con ¹⁾ sello de no contacto	con sello de contacto				
	mm	mm	kN	kgf				grasa	aceite									
<i>d</i>	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>r_s min²⁾</i>	<i>C_r</i>	<i>C_{or}</i>	<i>C_r</i>	<i>C_{or}</i>	<i>C_p</i>	<i>C_p</i>	<i>f₀</i>	ZZ,LLB	Z,LB	LU,LLU					
20	27	4	0.2	—	1.04	0.730	106	74	16.1	5 000	5 700	—	—	6704	—	LLF	—	—
	32	7	0.3	0.3	4.00	2.47	410	252	15.5	21 000	25 000	—	13 000	6804	ZZ	LLB	—	LLU
	37	9	0.3	0.3	6.40	3.70	650	375	14.7	19 000	23 000	—	12 000	6904	ZZ	LLB	—	LLU
	42	8	0.3	—	7.90	4.50	810	455	14.5	18 000	21 000	—	—	16004	—	—	—	—
	42	12	0.6	0.5	9.40	5.05	955	515	13.9	18 000	21 000	13 000	11 000	6004	ZZ	LLB	LLH	LLU
	47	14	1	0.5	12.8	6.65	1 310	680	13.2	16 000	18 000	12 000	10 000	6204	ZZ	LLB	LLH	LLU
	52	15	1.1	0.5	15.9	7.90	1 620	805	12.4	14 000	17 000	12 000	10 000	6304	ZZ	LLB	LLH	LLU

Figura 13. Rodamiento de bolas rígidas NTN

Fuente: (Corporation)

3.2.7 SELECCIÓN DE MATERIAL

Se selecciona material según la aplicación que tiene el elemento mecánico.

Cuchillas y limpiadores: Acero AISI D2.- Ideal para cizallas cortas para trabajar en frío, cuchillas para corte de plásticos, cuchillas de molinos granuladores. Capaz de ser sometido a un temple ente 1000-1040 °C, para obtener una dureza entre 63-65 HRC (Böhler, 2018).

Eje hexagonal: Acero AISI 1018.- Ideal para levas, uniones, bujes, pines y ejes de transmisión (Acero, 2018).

Cámara de trituración. - Para las paredes de dicha cámara se utiliza Acero ASTM A36, ya que no se encuentra sometido a ningún tipo de esfuerzo externo.

CAPÍTULO IV

CONFORMADO DEL MATERIAL COMPUESTO

En el presente capítulo se expone los diferentes porcentajes de mezcla con los que se realizarán las planchas de polialuminio y, también se describe, la simulación de cada una de las planchas, teniendo en cuenta los datos expuesto en las Tablas 1 y 2 del capítulo 2.

4.1 REGLA DE MEZCLAS

Para el análisis de la regla de mezclas de un material compuesto es necesario definir las proporciones de la materia prima reciclada y de la materia prima virgen que constituye cada una de las planchas.

Por lo tanto, se define las proporciones para la matriz de la siguiente manera: 10% de polímero reciclado – 90% de polímero virgen, 20% de polímero reciclado – 80% de polímero virgen, 30% de polímero reciclado – 70% de polímero virgen, 100% de polímero reciclado y 100% de polímero virgen, teniendo en cuenta que tanto el polímero reciclado como el polímero virgen son polietileno tereftalato (PET) y de polipropileno (PP). Cada una de las matrices tiene a su vez un refuerzo de polialuminio (PEAL) de 28 gr en peso.

Las propiedades mecánicas del polialuminio se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10.

Propiedades del Polietileno-Aluminio de los envases de Tetra Pak®

Propiedades	Valor	Unidad
Tensión a la ruptura	10.9	MPa
Elongación a la ruptura	38.8	%
Modulo elástico	177.6	MPa
Resistencia al impacto izod	302.0	MPa
Conductividad eléctrica	1.11×10^{-8}	S/cm
Densidad	0.9	g/cm ³

Fuente: (Martínez, 2015)

Para la elaboración de las planchas se utilizará un molde de acero ASTM A36 de 290 x 273 x 7 mm. Así mismo, el volumen total de PEAL utilizado en cada una de las planchas es de 36.708 cm³ aproximadamente, el mismo que equivale a 5 láminas (276 x 266 x 0.1 mm dimensiones de cada lámina), las cuales fueron obtenidas a partir de envases de 1 litro de Tetra Pak®. Por lo tanto, se asume que el volumen disponible es de 491.4 cm³ total y un volumen útil utilizado de polialuminio de 35.1 cm³; la diferencia es debido que al momento del prensado térmico existirán excesos los cuales serán cortados, y así obtener planchas de 270 x 260 x 7 mm.



Figura 14. Láminas de PEAL

Para la matriz polimérica se dispone de un volumen total de 456.3 cm³, y se asume que se obtendrá un volumen útil de 456 cm³ de matriz y un volumen de 35 cm³ de fibra (refuerzo de polialuminio), obteniendo así un volumen de compuesto de 491 cm³.

La densidad del material compuesto se obtiene a partir de la siguiente ecuación (regla de mezclas).

$$\rho_{compuesto} = \rho_{matriz} \cdot v_{matriz} + \rho_{fibra} \cdot v_{fibra}$$

Debido a que la matriz polimérica tiene diferentes porcentajes, el volumen útil se dividirá para dichos porcentajes.

Tabla 11.*Densidades y volúmenes de las materias primas*

Mezcla de la Matriz Polimérica	Volumen Material Virgen cm ³	Volumen Material Reciclado cm ³	Densidad Material Virgen gr/cm ³		Densidad Material Reciclado gr/cm ³	
			PET	PP	PET	PP
100% polímero virgen	491	-	1.39	0.91	1.34	0.85
90% polímero virgen – 10% polímero reciclado	441.9	49.1				
80% polímero virgen – 20% polímero reciclado	392.8	98.2				
70% polímero virgen – 30% polímero reciclado	343.7	147.3				
100% polímero reciclado	-	491				
Fibra (Polialuminio)	Volumen cm ³		Densidad gr/cm ³			
Polialuminio Tetra Pak®	35		0.9			

Con los datos descritos en las Tabla 11, se define las densidades de las distintas planchas, las mismas que se encuentran en la Tabla 12.

Tabla 12.*Densidades de los materiales compuestos*

Material compuesto	Densidad Compuesto Material gr/cm ³	
	PET	PP
Matriz: 100% polímero virgen Fibra: Polialuminio	1.36	0.91
Matriz: 90% polímero virgen – 10% polímero reciclado Fibra: Polialuminio	1.35	0.90
Matriz: 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado Fibra: Polialuminio	1.35	0.90
Matriz: 70% polímero virgen – 30% polímero reciclado Fibra: Polialuminio	1.35	0.89
Matriz: 100% polímero reciclado Fibra: Polialuminio	1.34	0.85

Se obtuvo la densidad de cada una de las mezclas, a partir de la ROM (Rule of Mixtures), esta regla se utilizó tanto para PET como para PP (memoria de cálculo detallada en el Anexo C).

4.2 SIMULACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Para la simulación de las distintas planchas de material compuesto se utilizó el software ANSYS MECHANICAL APDL.

4.2.1 CONDICIONES

Para dicho análisis computacional se define los siguientes parámetros detallados en Tabla 13.

Tabla 13.

Parámetros de simulación

Elemento	Condición
Material laminado	Ortotrópico
Espesor de plancha	7 mm
Cantidad de Polialuminio	5 láminas
Cantidad de capas a simular	11
Área para simular	270 x 260 mm

Previamente se definió la disposición de material, para facilitar la elaboración de la planchas y simulación de estas.

Matriz polimérica 0° (e = 1.25 mm)
Lámina de polialuminio 0° (e = 0.1 mm)
Matriz polimérica 0° (e = 1mm)
Lámina de polialuminio 180° (e = 0.1 mm)
Matriz polimérica 0° (e = 1mm)
Lámina de polialuminio 0° (e = 0.1 mm)
Matriz polimérica 0° (e = 1 mm)
Lámina de polialuminio 180° (e = 0.1 mm)
Matriz polimérica 0° (e = 1 mm)
Lámina de polialuminio 0° (e = 0.1 mm)
Matriz polimérica 0° (e = 1.25mm)

Figura 15. Distribución de material

Dado que el material compuesto es laminado – ortotrópico se utilizará en la simulación un elemento membrana denominado “Shell”; (el mismo que definirá espesores y ángulos de la distribución previamente descrita). De la misma manera, se definirán cada uno de los materiales

con los siguientes datos: módulo de elasticidad (E), módulo de cizallamiento (G) y coeficiente de Poisson (μ). Los datos de los materiales vírgenes tanto de PET como del PP se obtuvieron a partir de los ensayos de tracción.

4.2.2 MALLADO

Para el mallado se utiliza la opción “Mesh Tool” de ANSYS, la misma que permite un mallado automático con un patrón tetraédrico. Al mismo tiempo, se realizará un refinamiento de malla a “Nivel 5” (opción de Ansys). Para obtener resultados más precisos en la simulación, se realiza este refinamiento puesto que se requiere un análisis de tensiones, para lograr una malla más fina.

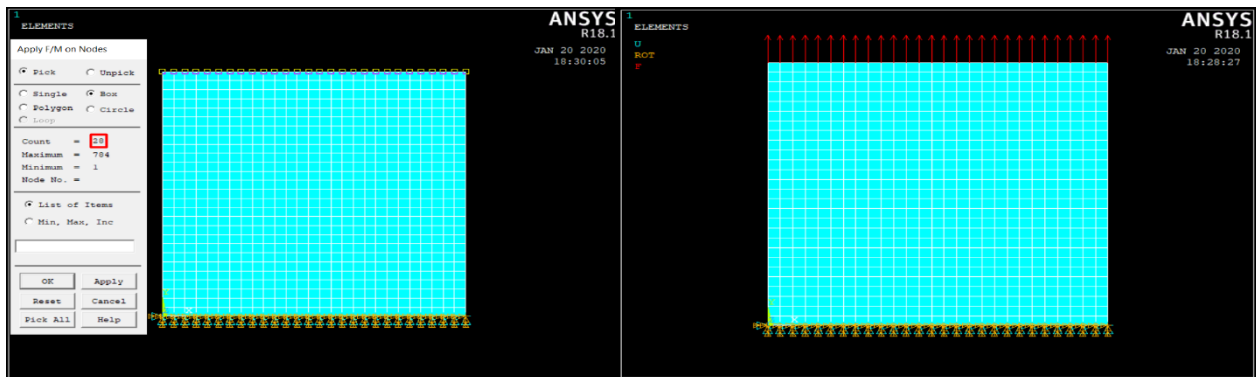
Así se obtiene un modelo razonable con un medio coste computacional, dado que el mallado seleccionado utilizará mayor cantidad de recursos, en dicho nivel de refinamiento se tiene ya convergencia de resultados, ya que en el refinado nivel 3 y nivel 4 se obtuvieron los mismos resultados de esfuerzo y desplazamiento a lo largo del área analizada.

4.2.3 SIMULACIÓN

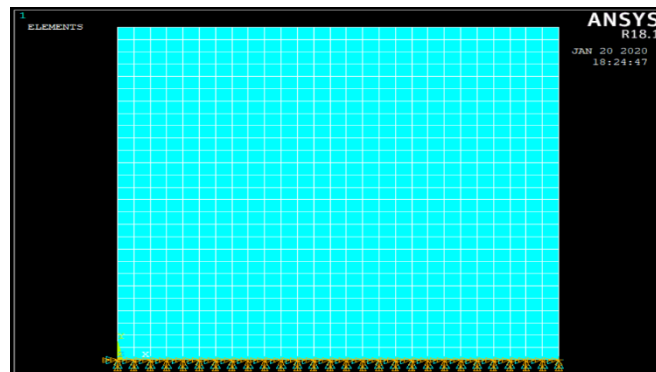
Para realizar la simulación de cada una de las planchas, se toma como base los datos obtenidos en los ensayos de tracción de los materiales vírgenes PET y PP, así como también los datos del polialuminio que se encuentran en la Tabla 10. Para los datos de la matriz polimérica se utiliza la regla de mezcla tanto para sus módulos como para su coeficiente de Poisson (memoria de cálculo detallada en Anexo E), a su vez se ingresa en dicho programa los parámetros descritos en la Tabla 13 y la distribución que se define en la figura 15; de ese modo el método de elementos finitos realizado por el programa Ansys tendrá una mejor aproximación al comportamiento del material compuesto, definiendo como: dominio.- el área a simular (dato proporcionado en la Tabla 13),

condiciones de frontera.- fuerza de tracción de 1000 N distribuida a lo largo de los 28 nodos que genera el mallado de nivel 5 (como se muestra en la figura 16) y la restricción de grados de libertad en los nodos del lateral izquierdo y derecho, como condiciones iniciales.- valores de módulo de elasticidad, módulo de cizallamiento y coeficiente de Poisson tanto para la matriz polimérica como para la fibra o refuerzo de polialuminio y nuestras incógnitas son: desplazamiento y esfuerzos.

Debido al tipo de membrana que se utilizó en la simulación (Shell 181), se puede definir que el método de elemento finito utilizado por Ansys es Lagrangiano, ya que dicho método se utiliza para el análisis de elementos sólidos y estructurales que tengan 8 grados de libertad, 4 grados por nodo, misma condición que cumple dicha membrana (Hossne, 2007).



(a)

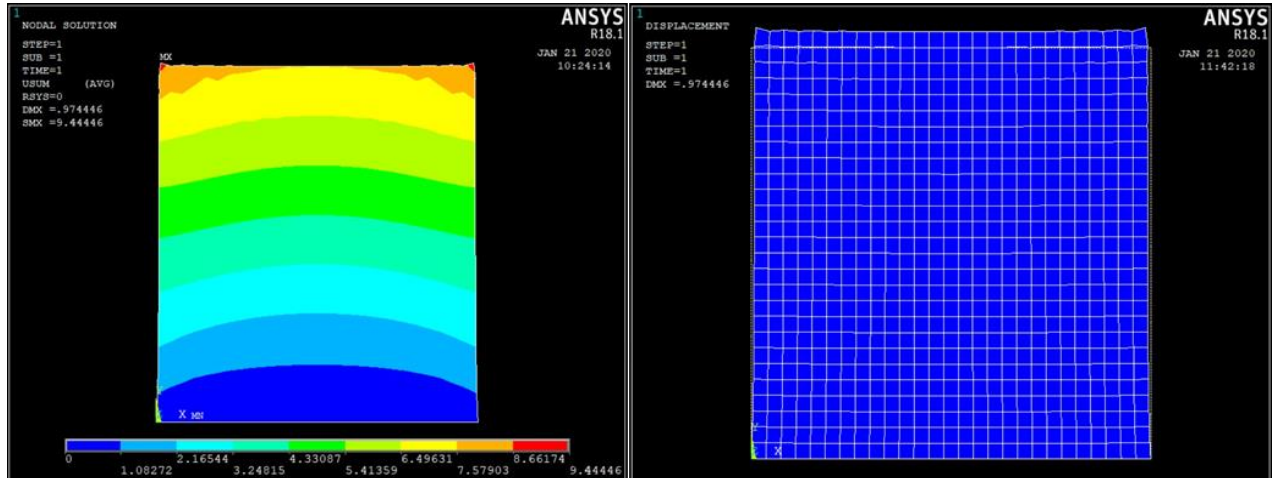


(b)

Figura 16. a) Aplicación de fuerzas para simular tracción b) Restricción de los grados de libertad

Los resultados de cada una de las planchas son los siguientes:

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET virgen

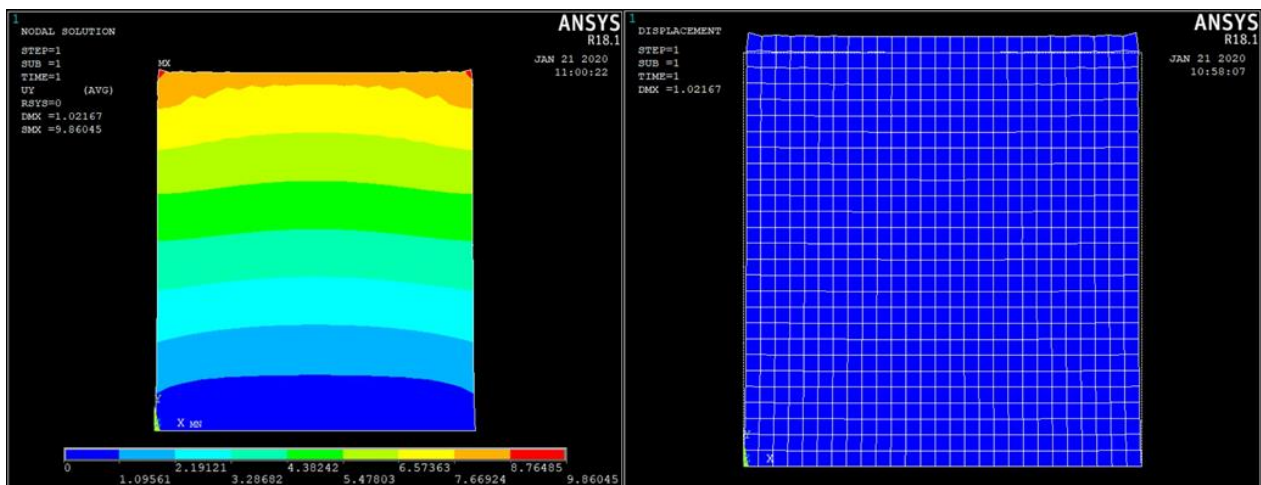


(a)

(b)

Figura 17. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PET virgen, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PET virgen – 10% PET reciclado



(a)

(b)

Figura 18. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PET virgen – 20% PET reciclado

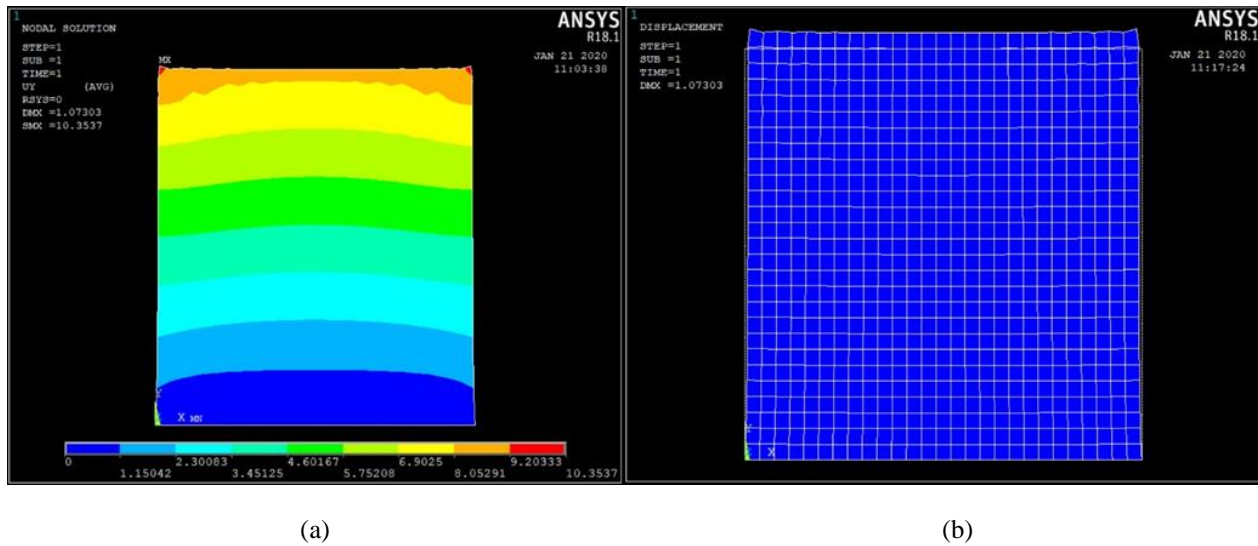


Figura 19. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PET virgen – 30% PET reciclado

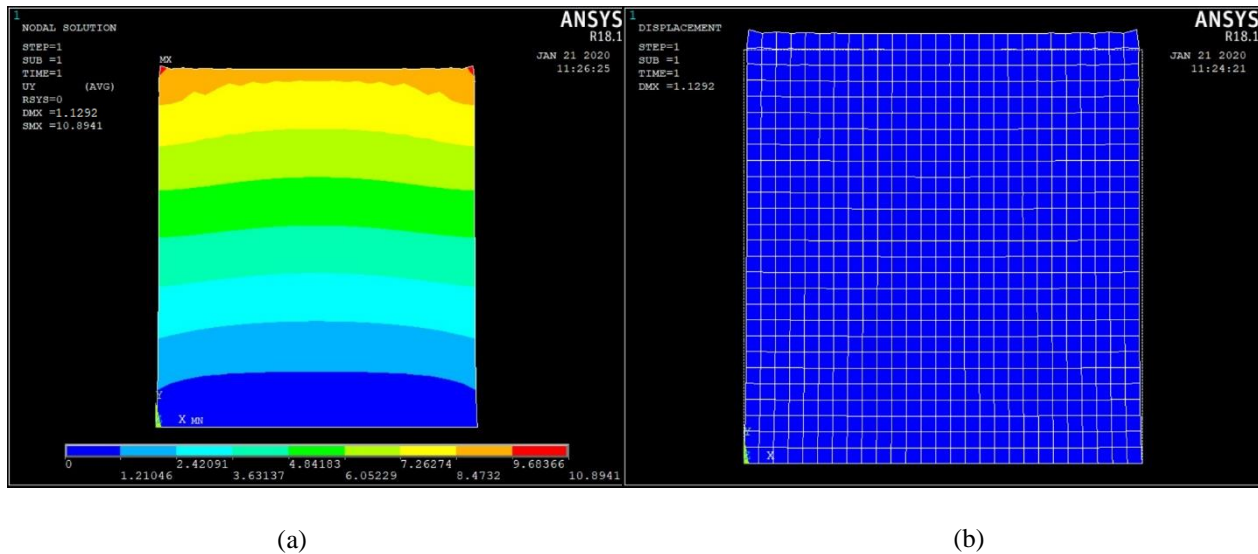


Figura 20. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET reciclado

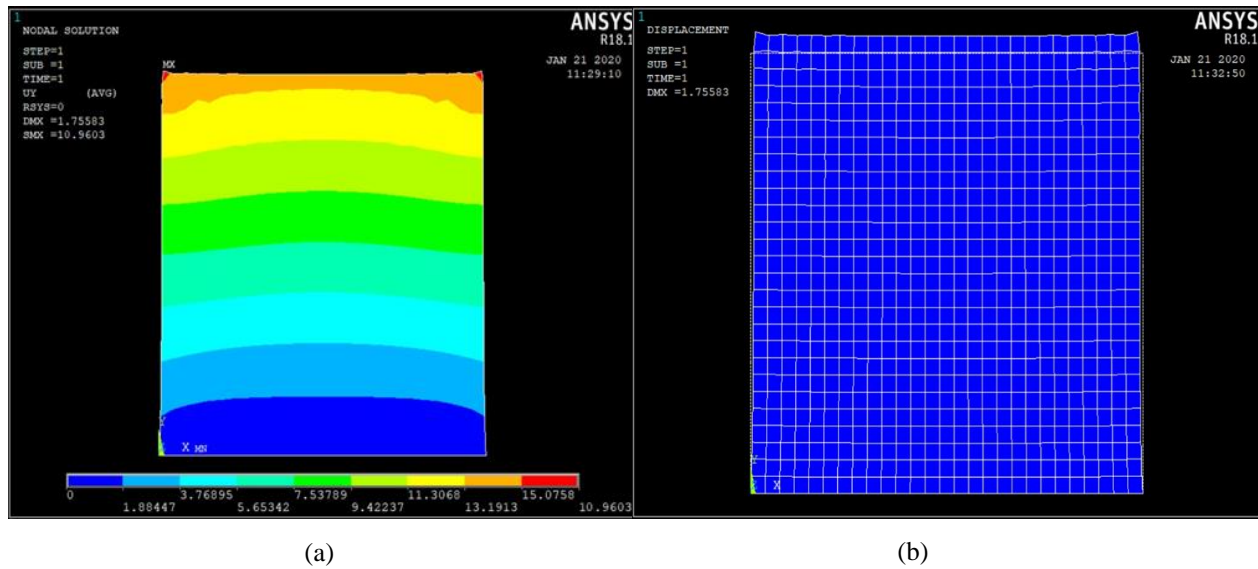


Figura 21. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PET reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP virgen

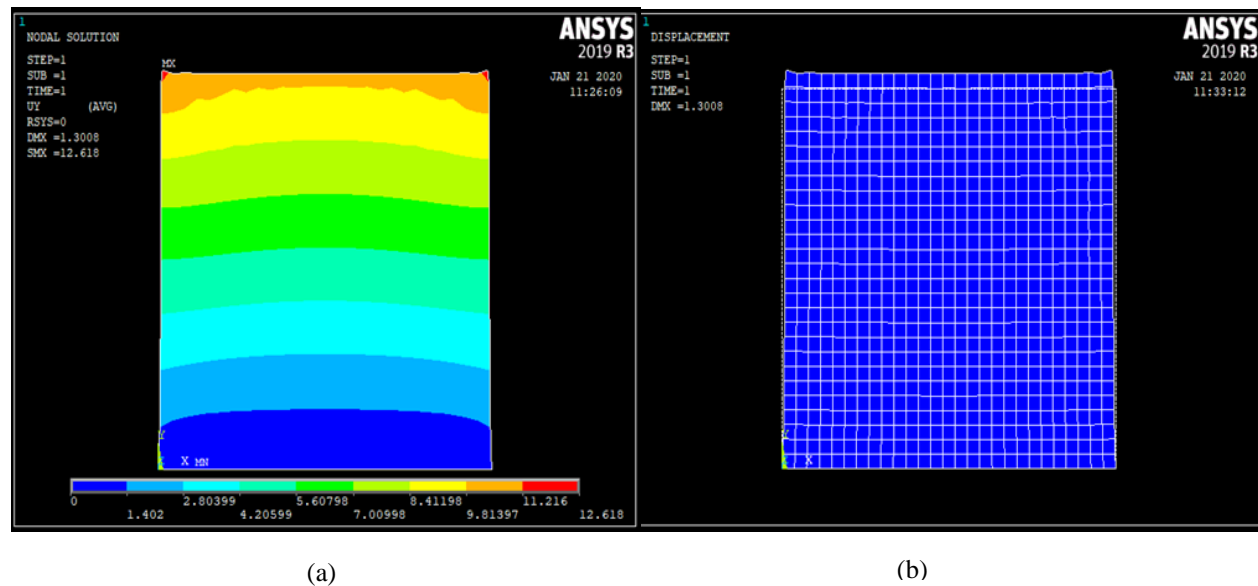
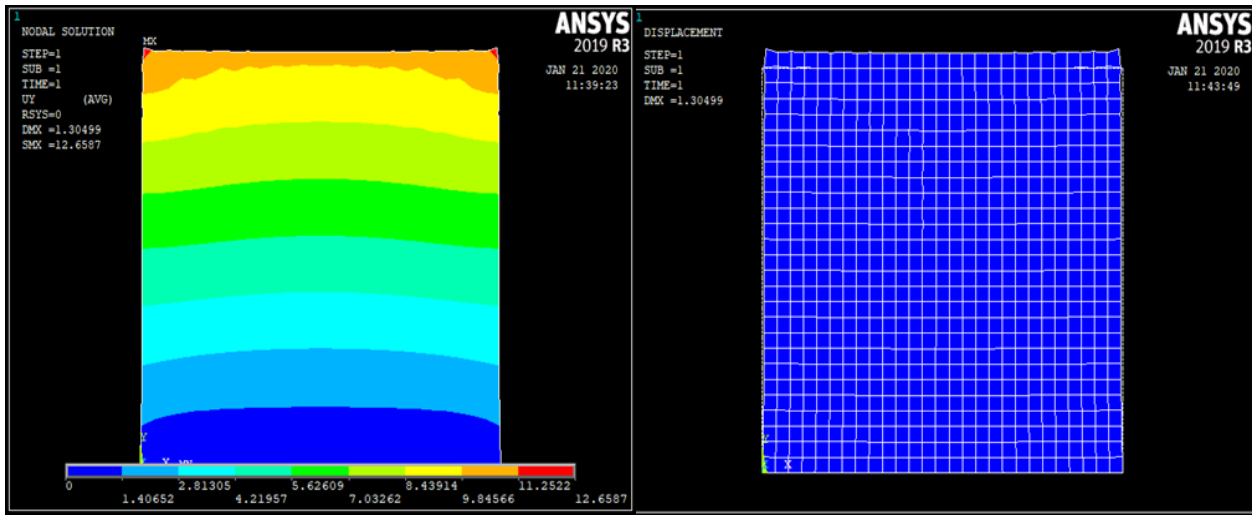


Figura 22. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PP virgen, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PP virgen – 10% PP reciclado

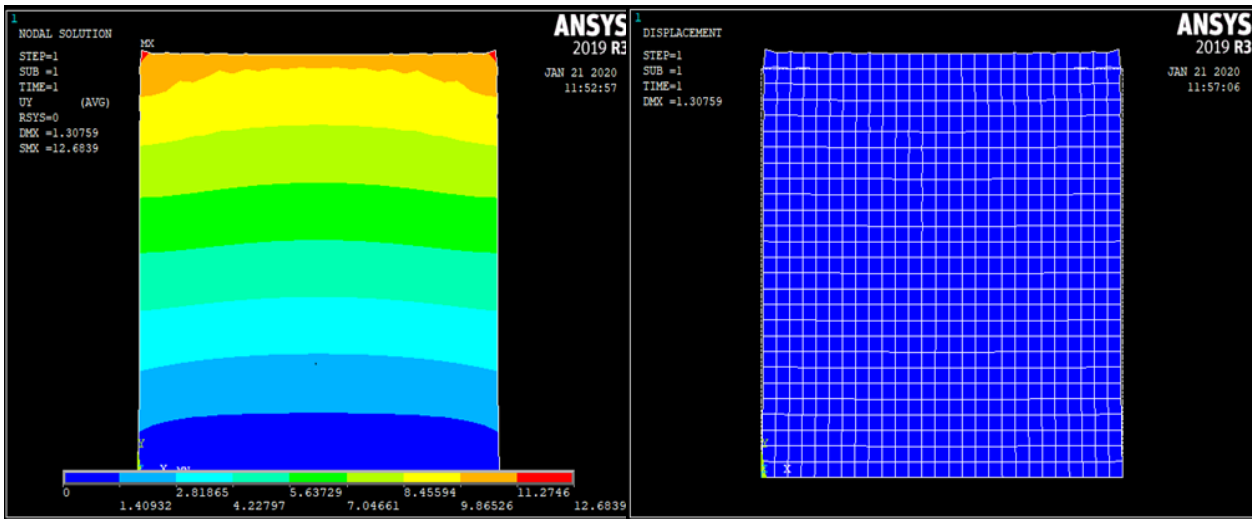


(a)

(b)

Figura 23. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PP virgen – 20% PP reciclado



(a)

(b)

Figura 24. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PP virgen – 30% PP reciclado

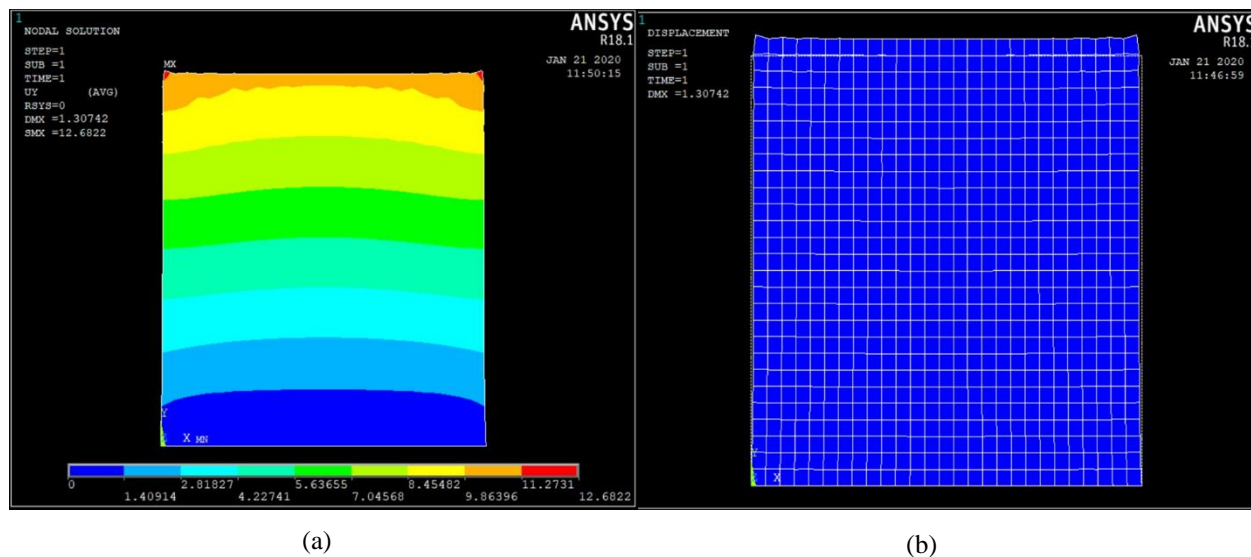


Figura 25. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP reciclado

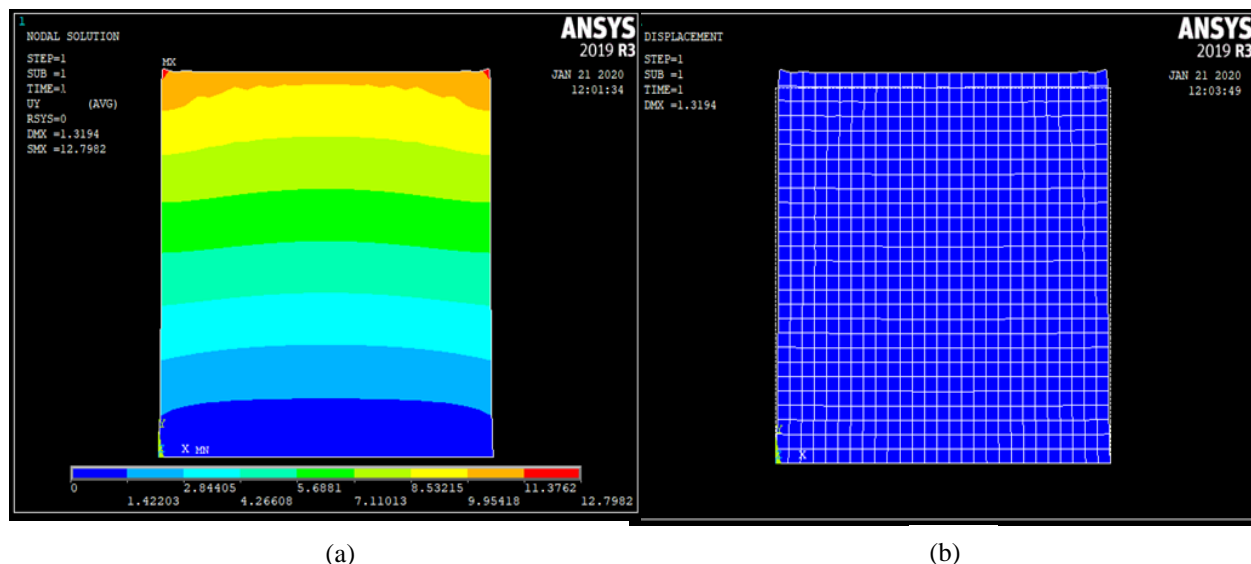


Figura 26. Resultados de la simulación de la plancha con matriz 100% PP reciclado, a) esfuerzos en el Y b) Desplazamiento

4.3 PARAMETRIZACIÓN DEL PRENSADO

Para el prensado térmico se dispone de una prensa de vulcanización modelo XL8800X800, la cual tiene un rango de temperatura entre 20 °C a 550 °C y una presión máxima de 40 MPa, esta prensa consta de dos resistencias térmicas independientes, la cual permite definir temperatura en la base y en el techo. Para definir los parámetros de temperatura, presión y tiempo, se utilizó la técnica: “Prueba y Error”, permitiendo así definir parámetros precisos basados en los datos de temperatura de las fichas técnicas de los materiales (PET virgen y PP virgen).

Tabla 14.

Parámetros de prensado

Planchas	Presión MPa		Tiempo de prensado min		Temperatura de prensado °C	
	PET	PP	PET	PP	PET	PP
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero virgen	7	9	40	45	250	255
Material compuesto con matriz polimérica de 90% polímero virgen – 10% polímero reciclado						
Material compuesto con matriz polimérica de 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado						
Material compuesto con matriz polimérica de 70% polímero virgen – 30% polímero reciclado						
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero reciclado						

Con los datos estipulados en la Tabla 14, se logró obtener el material compuesto totalmente compactado.



Figura 27. Prensa térmica

4.4 OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Para constituir el material compuesto, se empleó las siguientes cantidades de materia prima.

1. 1000 envases de 1 litro de Tetra Pak®.
2. 25 kg de pellets de PET virgen.
3. 25 kg de pellets de PP virgen.
4. 12 kg de PET reciclado triturado.
5. 12 kg de PP reciclado triturado.

Una vez obtenida la materia prima, se llevó a cabo el siguiente proceso para la elaboración del polialuminio reciclado a partir de los envases de Tetra Pak®.

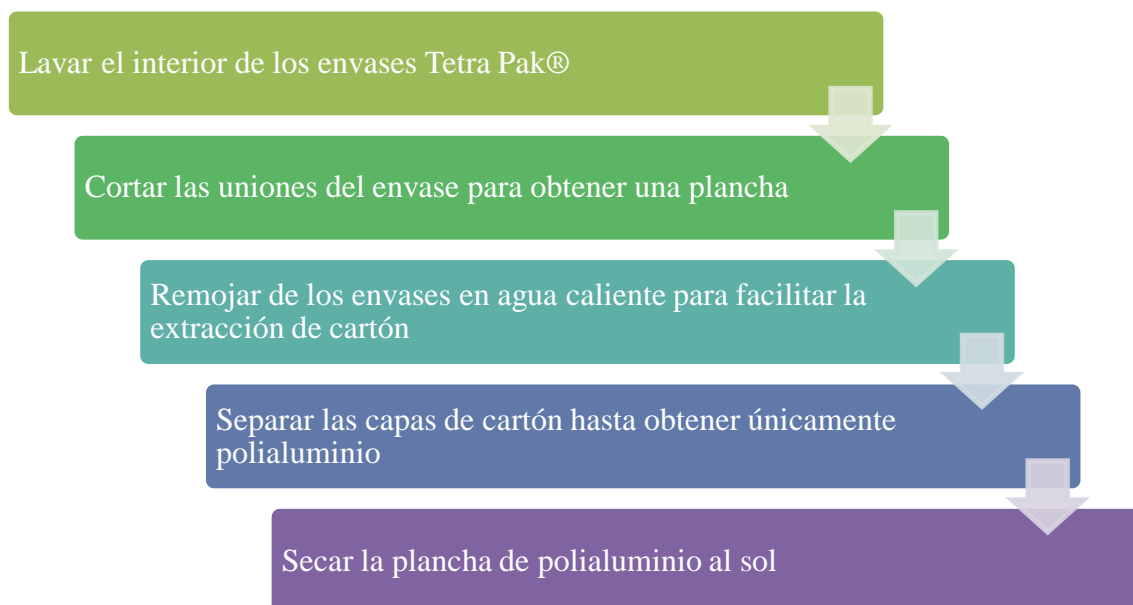


Figura 28. Diagrama de obtención de polialuminio

Con la materia prima lista, se realizó la técnica: “Prueba y Error”, para obtener un aproximado real de cuánto material se requerirá para elaborar cada plancha. Por lo que se definió que se requiere 800 gr entre matriz y fibra para obtener 1 plancha de 270 x 260 x 7 mm cuando el material a prensar es polietileno tereftalato (PET) como principal, consiguiendo al final una plancha con un peso aproximado de 785 gr. Mientras que se requiere un total de 528 gr entre todas las materias primas para obtener 1 plancha de material compuesto con polipropileno (PP) como materia prima principal de las mismas dimensiones anteriormente mencionadas con un peso final de 500 gr. El peso perdido es a su vez debido al recorte del área no útil.

Se realizó 2 planchas por cada mezcla es decir se obtuvo un total de 20 planchas y se utilizó 5 láminas de polialuminio por plancha.

El proceso de fabricación de las planchas fue el siguiente:



Encender la prensa térmica según los parámetros definidos en la Tabla 14; activar el cronómetro automático de la prensa y confirmar que la presión sea la adecuada.



Realizar la mezcla entre el polímero virgen y reciclado según los porcentajes definidos previamente, para obtener el peso total según el material base principal.



Colocar silicona líquida en la matriz de prensado, tanto en su base como en punzón.



Colocar en la matriz de prensado la matriz polimérica y el refuerzo según la distribución que se muestra en la figura 15.



Llevar la matriz de prensado a la prensa térmica y activar el prensado automático.



Al finalizar sacar el molde y enfriarlo para obtener la plancha.

Figura 29. Proceso para la fabricación de una plancha de material compuesto

CAPÍTULO V

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

En el presente capítulo se expone las diferentes normas que se utilizaron para llevar a cabo los ensayos destructivos, y así obtener las propiedades mecánicas de cada una de las planchas con sus respectivas mezclas.

5.1 DESARROLLO DEL PROTOCOLO DE PRUEBAS

Como se hizo referencia en el capítulo 4, se realizó 2 planchas por mezcla. Después se procedió a dividir por la mitad cada plancha y así poder ensayar probetas de cada una de estas, y de ese modo obtener resultados más reales.

Para cada ensayo mecánico se lleva acabo el siguiente esquema funcional.

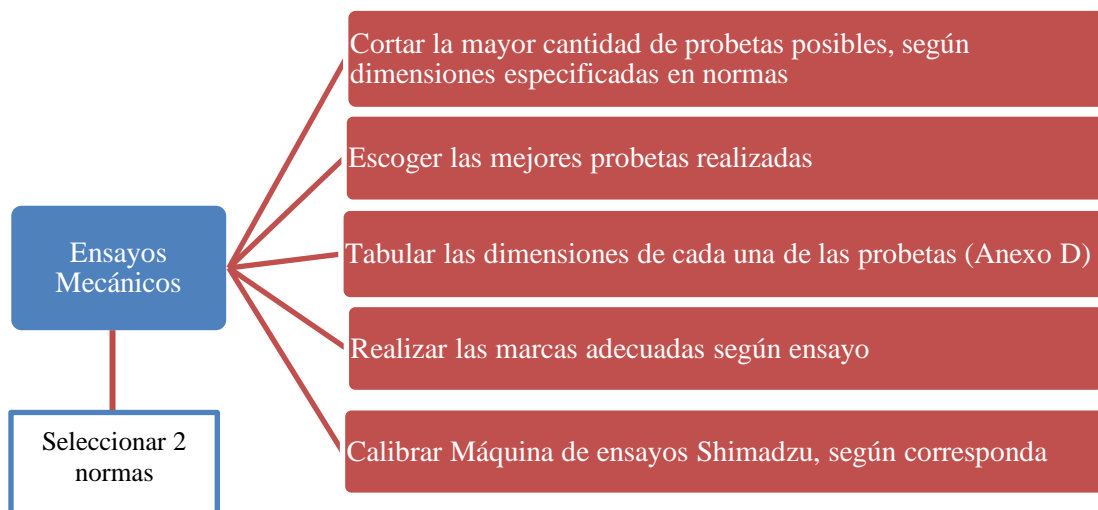


Figura 30. Esquema funcional de ensayos

Para la caracterización de los materiales se realizó los siguientes ensayos mecánicos: ensayo de tracción, ensayo de flexión y ensayo de compresión.

Así mismo, para cada uno de estos ensayos se verificó: la temperatura de ambiente, velocidad de ensayo, criterio de falla, número de probetas y dimensiones de estas. Estos datos nos proporcionan las normas seleccionadas.

Los 3 ensayos se realizaron en la máquina de ensayos universal Shimadzu, ubicado en el laboratorio de resistencia de materiales de la carrera de ingeniería civil de la Universidad. En el laboratorio se ingresaron los distintos parámetros y se elaboraron los ensayos en base a los mismos.

5.2 ENSAYO DE TRACCIÓN

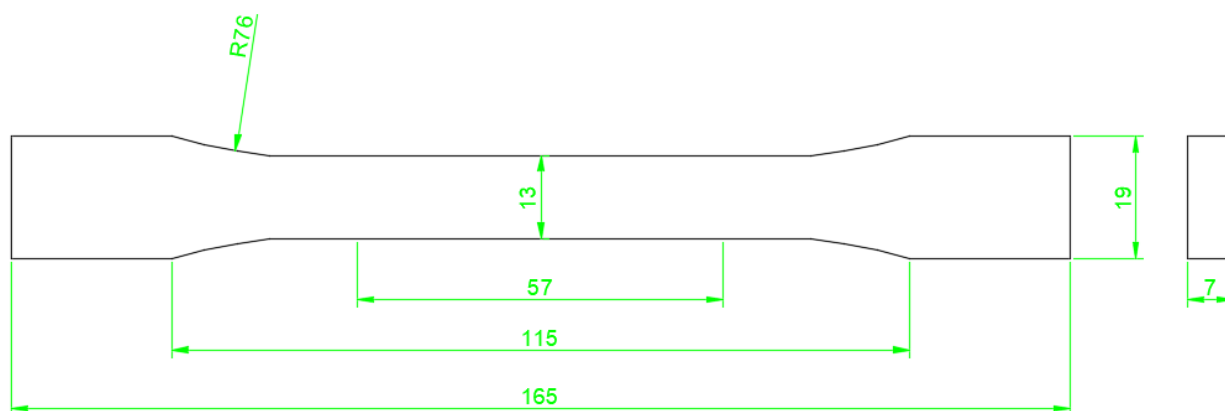


Figura 31. Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a tracción

Para la ejecución de los ensayos a tracción se aplica las normas ASTM D638-14 (Método de prueba estándar para las propiedades a tracción de los plásticos) y la norma ISO 527-1 (Plásticos – Determinación de propiedades a tracción), en dichas normas se especifica que el ensayo se debe llevar a cabo a temperatura ambiente (se detalla en el alcance de ambas normas), con una velocidad de ensayo de $5 \pm 25\%$ mm/min (se describe en la Tabla 1 de ambas normas) hasta que la probeta falle (se fracture). La cantidad de especímenes a elaborar es como mínimo 5 (se especifica en el

punto 7 de ambas normas) y las dimensiones de estas se especifican en la norma ASTM D638-14 en la figura 1. El tipo de probeta a utilizar es el modelo Tipo 1, ya que es un material compuesto reforzado. Las mismas que tienen las siguientes características en su geometría y sus dimensiones, y que están especificadas en la figura 31 (ambas normas se encuentran en el Anexo H).

5.3 ENSAYO DE FLEXIÓN

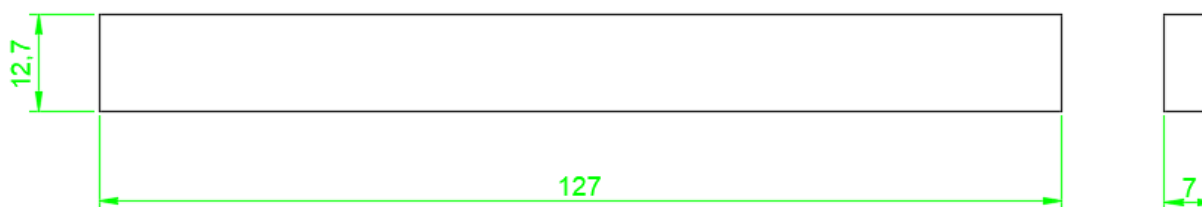


Figura 32. Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a flexión

Para la ejecución de los ensayos a flexión se aplican las normas ASTM D790-03 (Método de prueba estándar para las propiedades de flexión de plásticos no reforzados y reforzados y materiales de aislamiento eléctrico) y la norma ISO 178 (Plásticos – Determinación de propiedades a flexión), en dichas normas se especifica que se debe tener una longitud entre apoyos de al menos 16 veces el espesor (se detalla en el apartado 7.4 y 5.4 respectivamente), por lo que se define una longitud entre apoyos de 120 mm, con una velocidad de ensayo de 3.18 mm/min para las probetas de material compuesto elaborado y una velocidad de 2.28 mm/min para las probetas “Ecopak” (se describe en la Tabla 1 de la norma ISO y en la ecuación 1 de la norma ASTM) hasta que la probeta falle (se rompa). La cantidad de especímenes es como mínimo 5 (se especifica en el punto 8 y en el punto 6.5 respectivamente) y las dimensiones de estas se especifican en la norma ASTM D790-03 en el apartado 7.4, ya que es un material de moldeo. Cuya geometría y dimensión están especificadas en la figura 32 (ambas normas se encuentran en el Anexo H).

5.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN

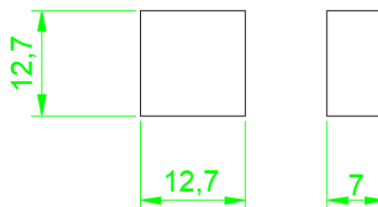


Figura 33. Dimensión y geometría de las probetas de ensayos a compresión

Para la ejecución de los ensayos a compresión se aplica las normas ASTM D695-15 (Método de prueba estándar para las propiedades de compresión de plásticos rígidos) y la norma ISO 604 (Plásticos – Determinación de propiedades a compresión), en dichas normas se especifica que el ensayo se llevará a cabo a temperatura ambiente (se detalla en el alcance de ambas normas), con una velocidad de ensayo de 1.3 ± 0.3 mm/min (se describe en el punto 9 y en la Tabla 1 respectivamente) hasta que la probeta falle (se rompa), la cantidad de especímenes es como mínimo 5 (se especifica en el punto 8 y en el punto 7 respectivamente) y las dimensiones de estas se especifican en la norma ASTM D695-15 en el apartado 6.2, ya que este material tiene un espesor mayor a 6.4 mm, las mismas que tienen la siguiente geometría y dimensión especificadas en la figura 33 (ambas normas se encuentran en el Anexo H).

5.5 RESULTADO DE LOS ENSAYOS

En cada uno de los ensayos se obtuvo el módulo de elasticidad de cada material compuesto, el mismo que se obtuvo mediante una regresión lineal en el siguiente rango:

$$\varepsilon_1 = 0.0005 \%$$

$$\varepsilon_2 = 0.0025 \%$$

La regresión lineal se define como la recta de mejor ajuste, en la cual la pendiente será el módulo de elasticidad, para obtener dicha recta se realiza los siguientes cálculos:

$$y = a + bx$$

$$a = Ym - b * Xm$$

$$b = \frac{\sum((Xi - Xm) * (Yi - Ym))}{\sum(Xi - Xm)^2}$$

En cada caso “b” será el módulo de elasticidad del material compuesto, la memoria de cálculo detallada se encuentra en el Anexo E. A su vez se obtuvo el coeficiente de Poisson de cada material.

Resultados para los ensayos de tracción de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PET.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET virgen

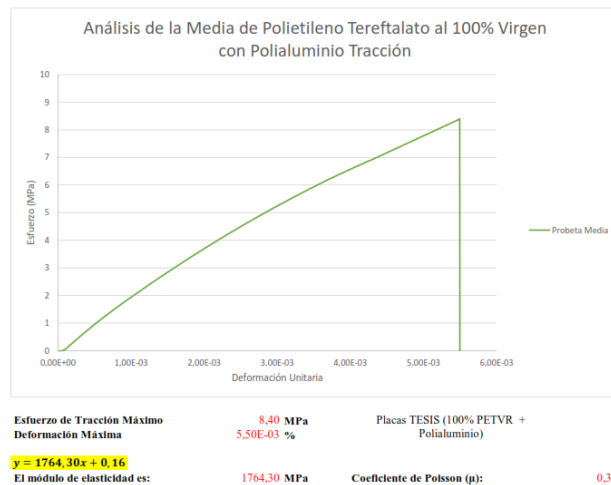


Figura 34. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PET virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PET virgen – 10% PET reciclado

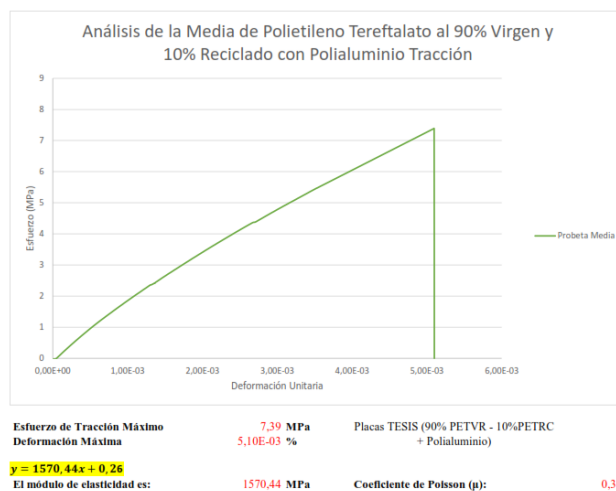


Figura 35. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PET virgen – 20% PET reciclado

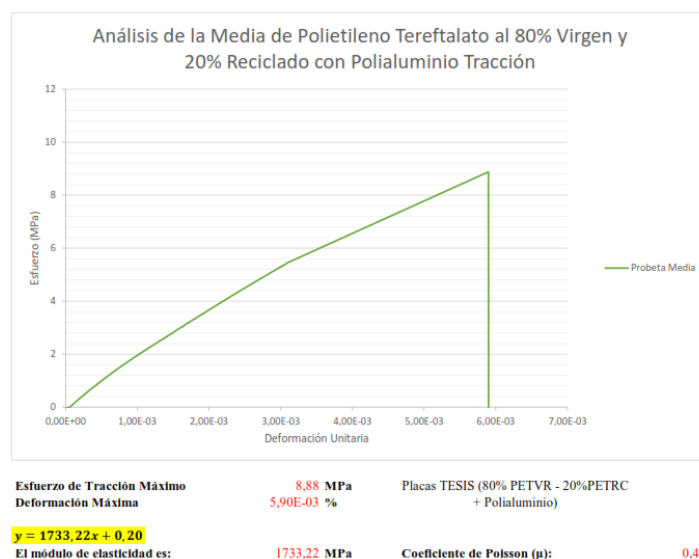


Figura 36. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PET virgen – 30% PET reciclado

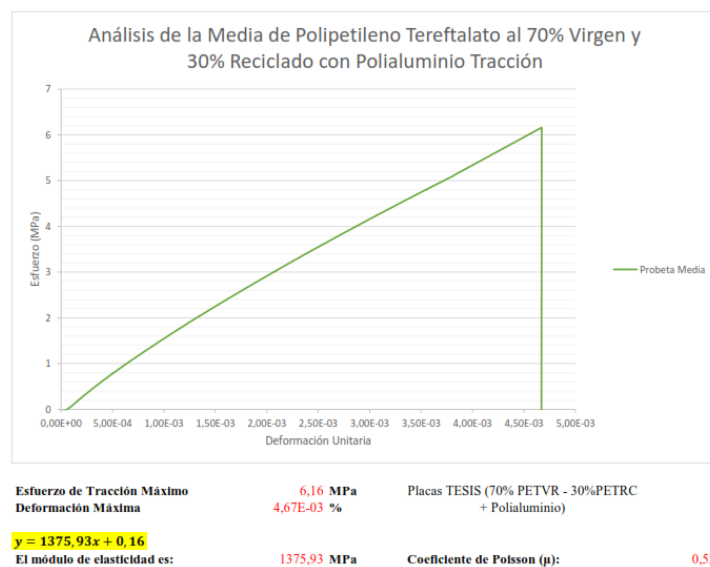


Figura 37. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET reciclado

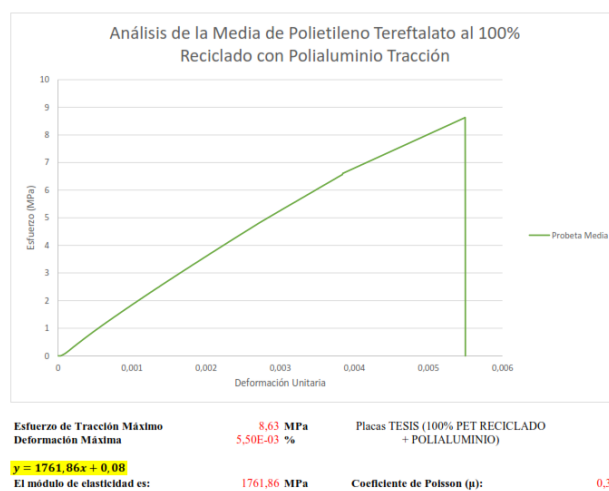


Figura 38. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PET reciclado

Resultados para los ensayos de tracción de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PP.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP virgen

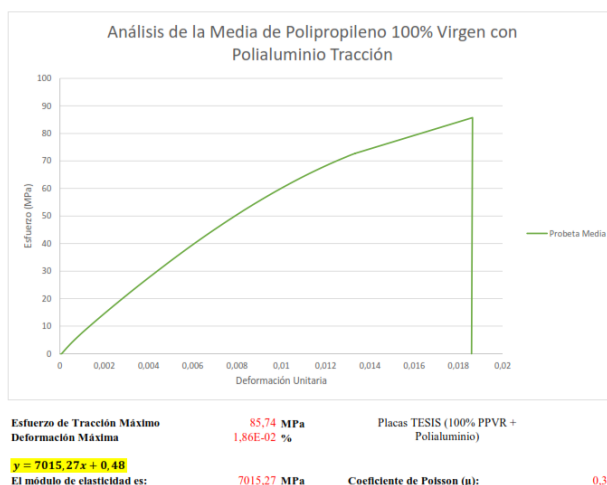


Figura 39. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PP virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PP virgen – 10% PP reciclado

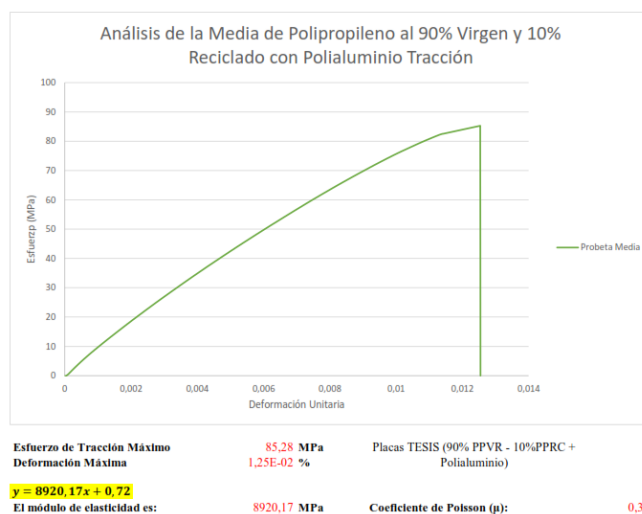


Figura 40. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PP virgen – 20% PP reciclado

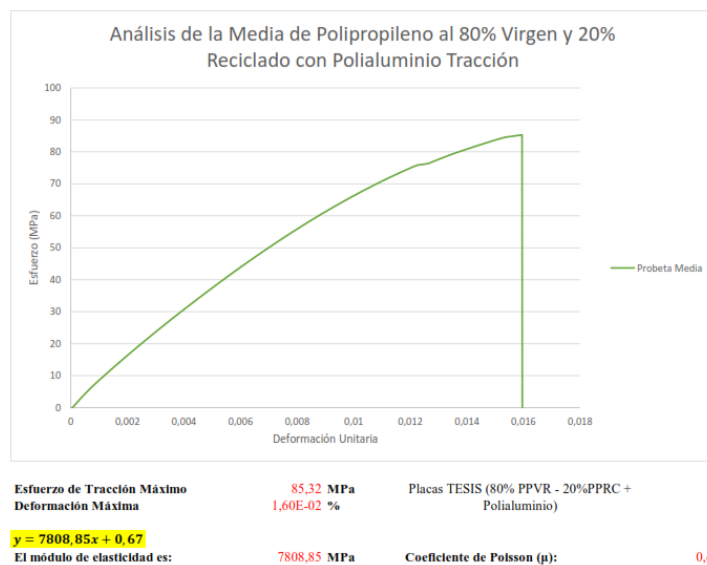


Figura 41. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PP virgen – 30% PP reciclado

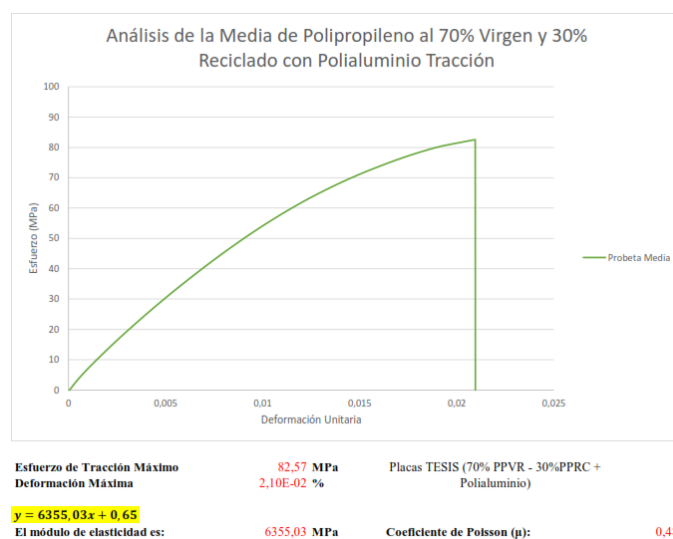


Figura 42. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP reciclado

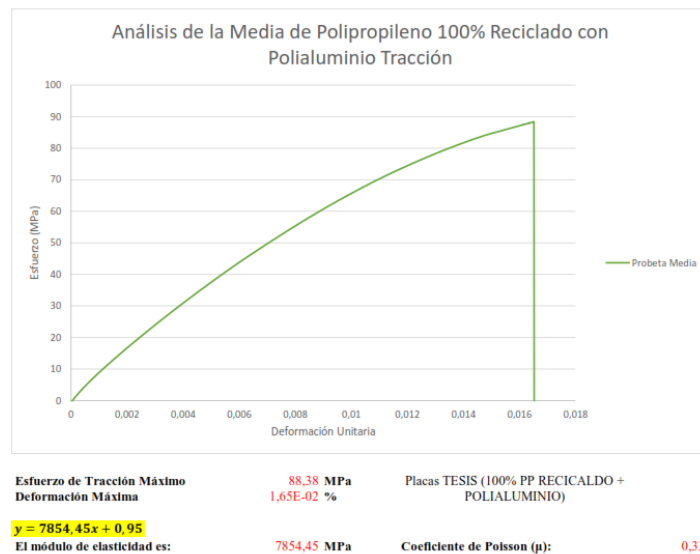


Figura 43. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas con matriz 100% PP reciclado

Resultados para el ensayo de tracción del material Ecopak, adquirido de la empresa Ecuaplastic.

- Material 100% Polialuminio (tableros Ecopak)

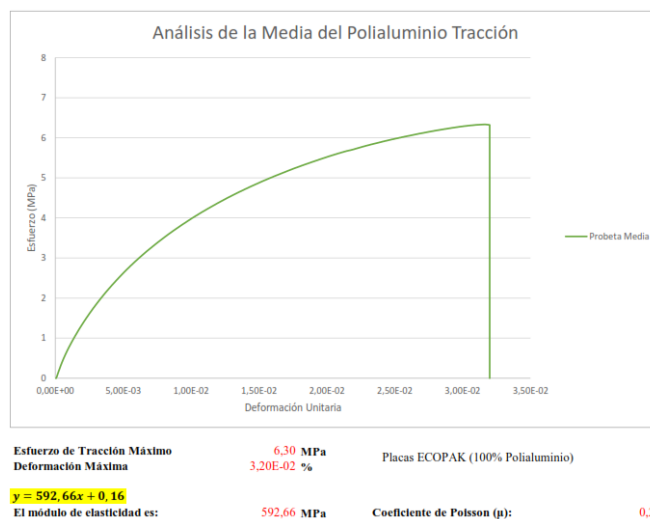


Figura 44. Resultado de la media del ensayo de tracción de las probetas del tablero Ecopak

Para obtener el coeficiente de Poisson de cada uno de los materiales se siguió el procedimiento de la norma ISO 527-1 apartado 10.4, en el que se especifica que se divide la variación de la deformación transversal para la variación de la deformación longitudinal.

A continuación, se detallarán los resultados para los ensayos de flexión de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PET.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET virgen

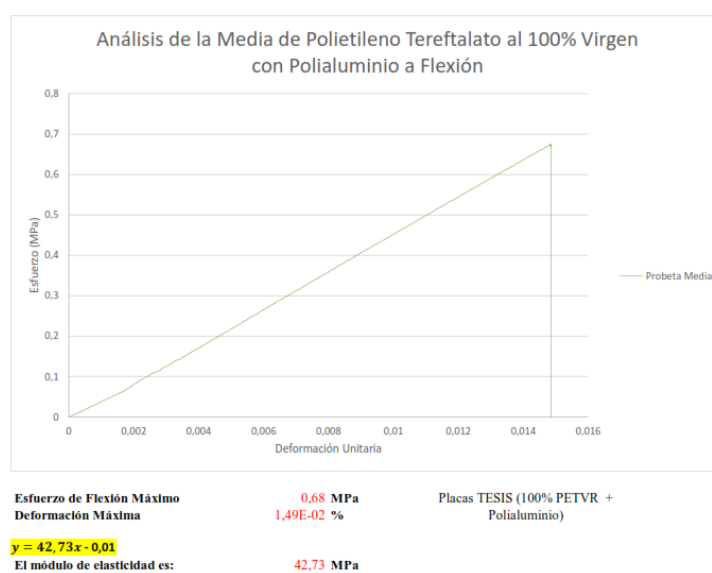


Figura 45. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PET virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PET virgen – 10% PET reciclado

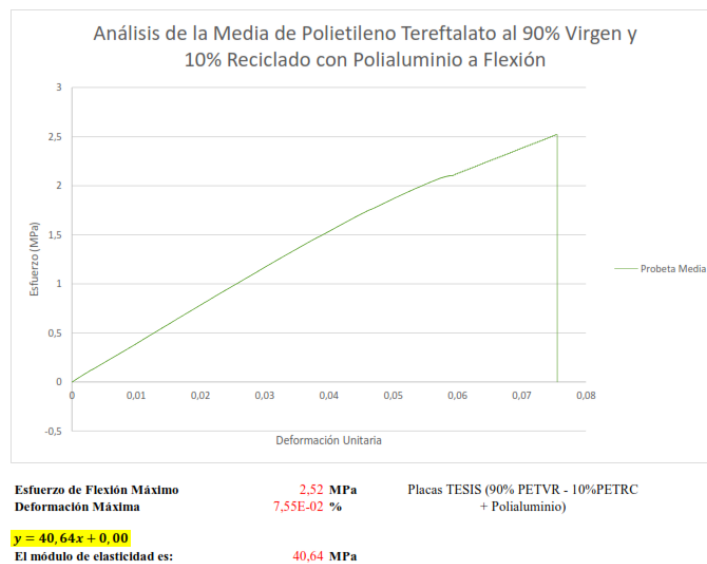


Figura 46. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PET virgen – 20% PET reciclado

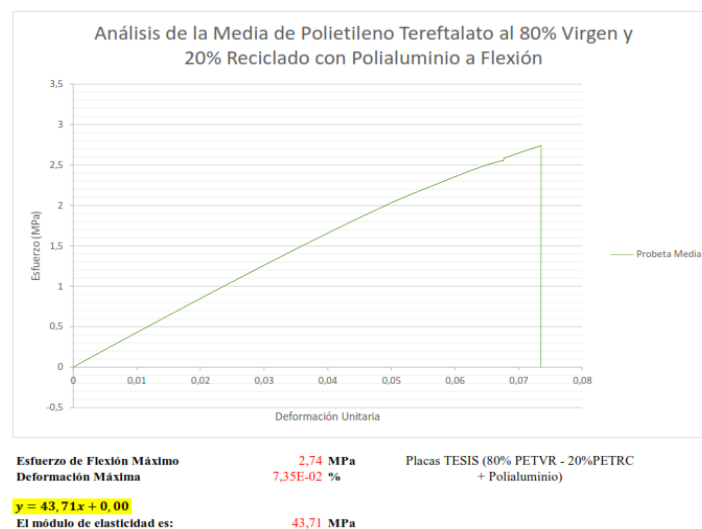


Figura 47. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PET virgen – 30% PET reciclado

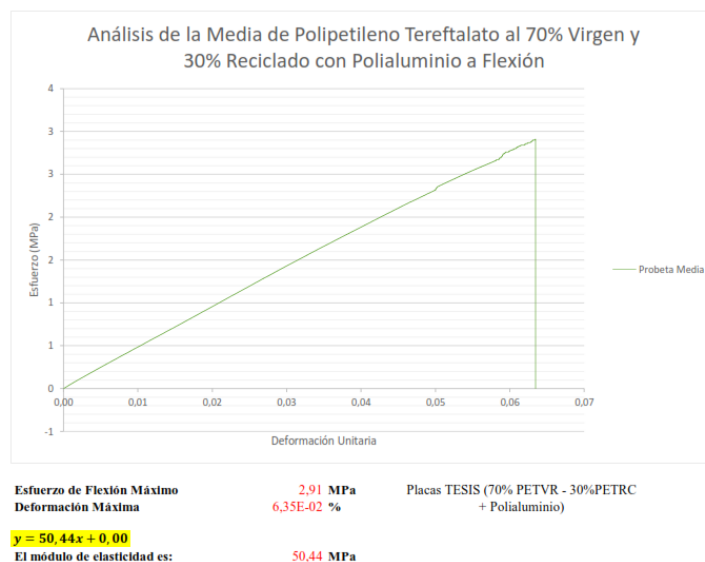


Figura 48. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET reciclado



Figura 49. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PET reciclado

Resultados para los ensayos de flexión de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PP.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP virgen



Figura 50. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PP virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PP virgen – 10% PP reciclado

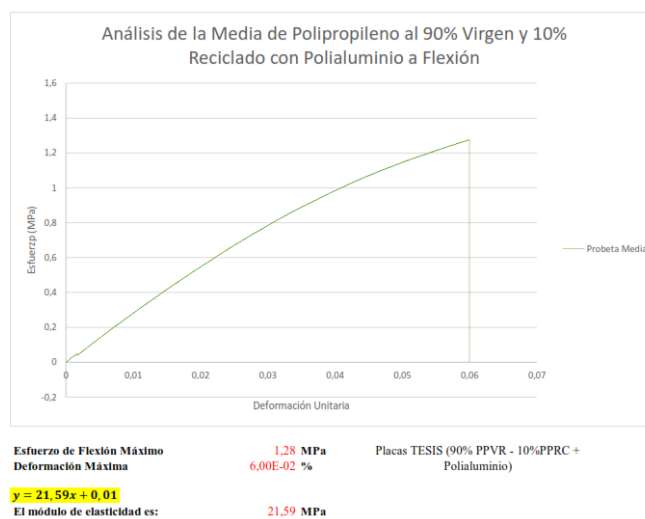


Figura 51. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PP virgen – 20% PP reciclado

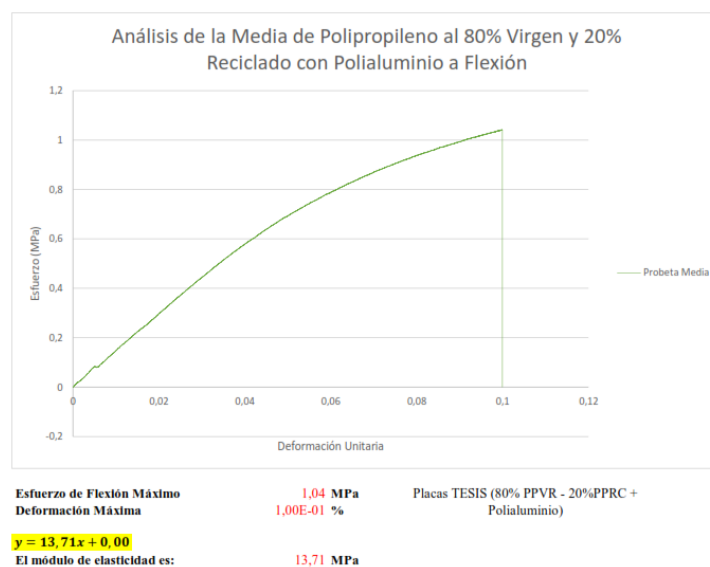


Figura 52. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PP virgen – 30% PP reciclado

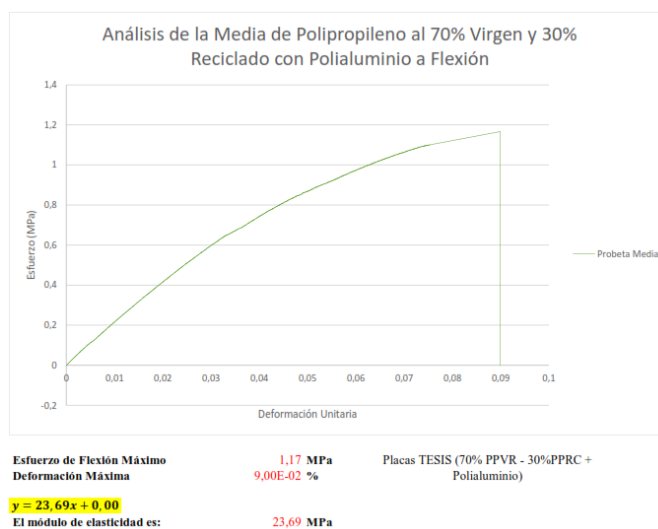


Figura 53. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP reciclado



Figura 54. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas con matriz 100% PP reciclado

Resultados para el ensayo de flexión del material Ecopak, adquirido de la empresa Ecuaplastic.

- Material 100% Polialuminio (tableros Ecopak)



Figura 55. Resultado de la media del ensayo de flexión de las probetas del tablero Ecopak

Resultados para los ensayos de compresión de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PET.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET virgen

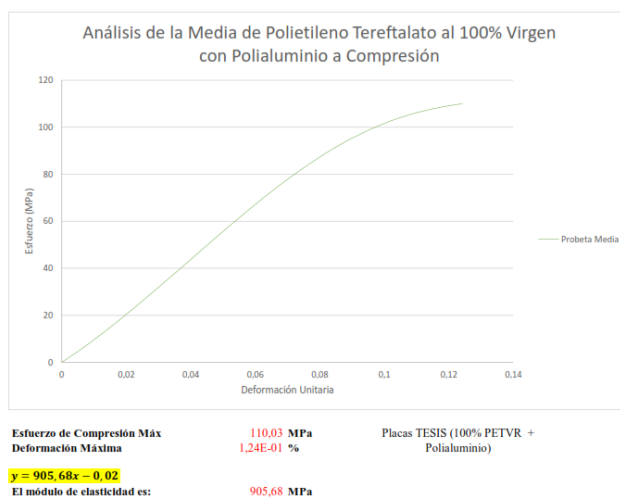


Figura 56. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PET virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PET virgen – 10% PET reciclado

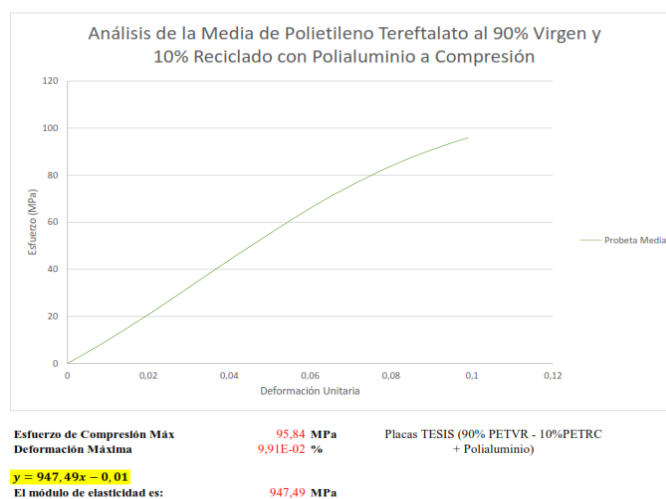


Figura 57. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 90% PET virgen – 10% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PET virgen – 20% PET reciclado

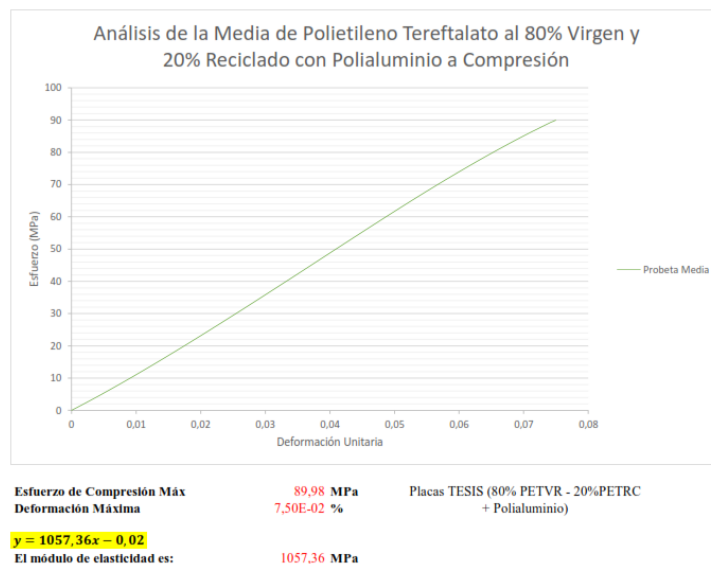


Figura 58. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 80% PET virgen – 20% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PET virgen – 30% PET reciclado

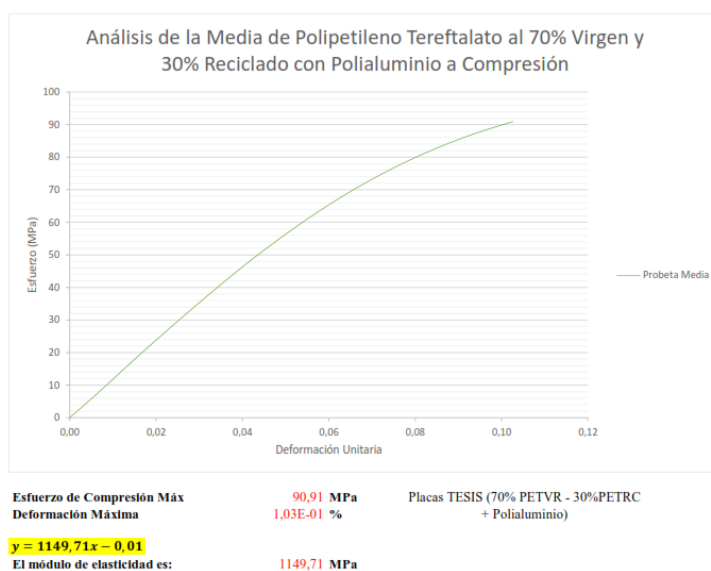


Figura 59. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 70% PET virgen – 30% PET reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PET reciclado

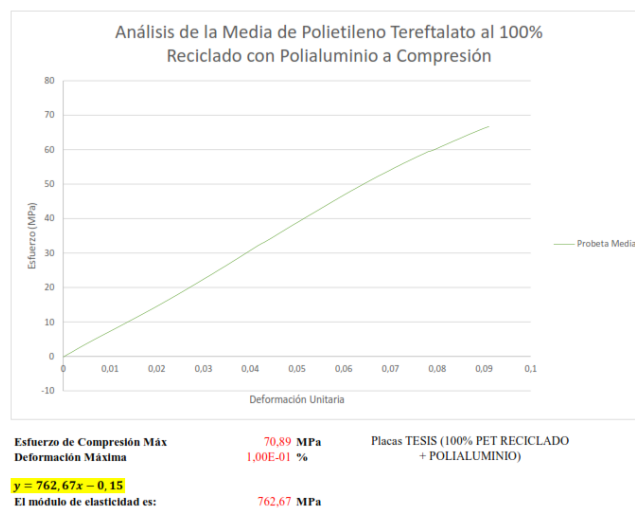


Figura 60. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PET reciclado

Resultados para los ensayos de compresión de los materiales compuestos, cuya matriz polimérica tiene PP.

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP virgen

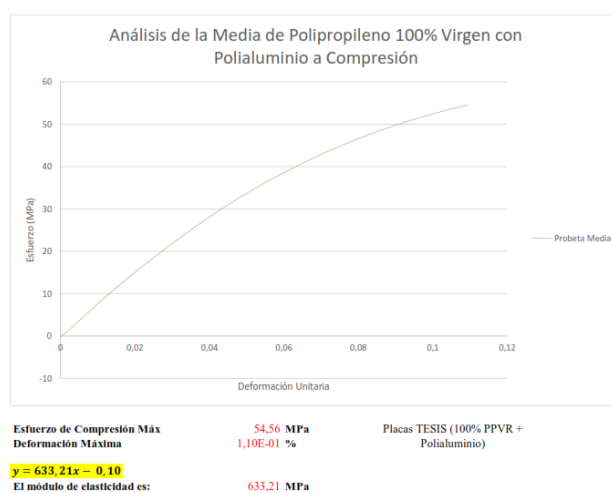


Figura 61. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PP virgen

- Material compuesto con matriz polimérica 90% PP virgen – 10% PP reciclado

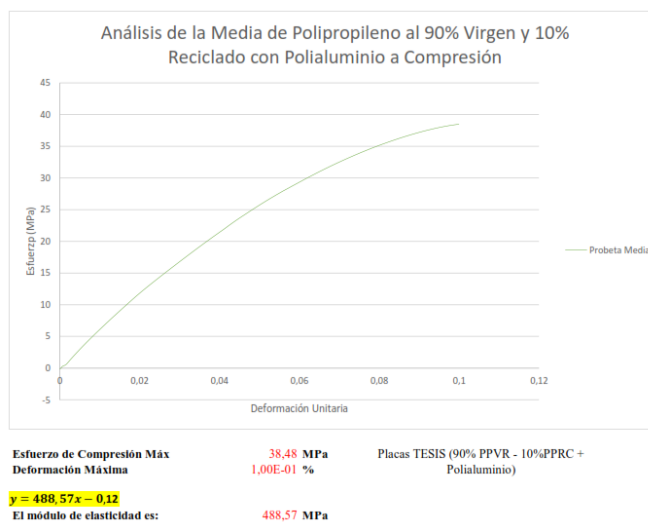


Figura 62. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 90% PP virgen – 10% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 80% PP virgen – 20% PP reciclado

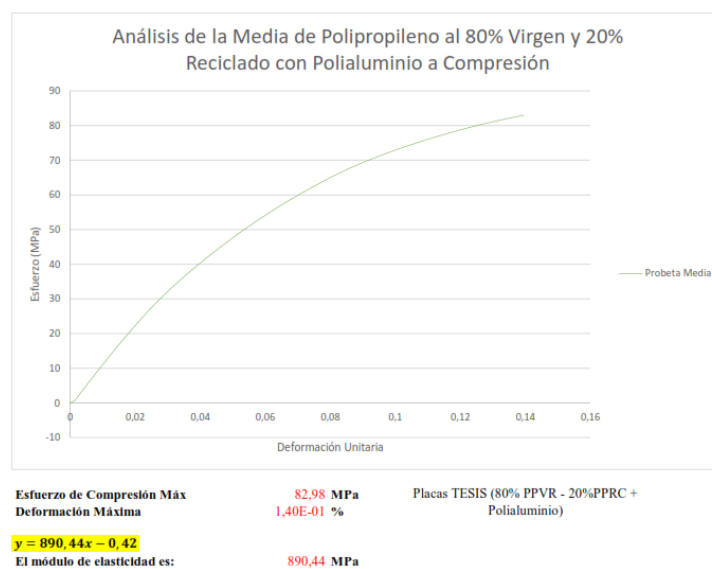


Figura 63. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 80% PP virgen – 20% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 70% PP virgen – 30% PP reciclado

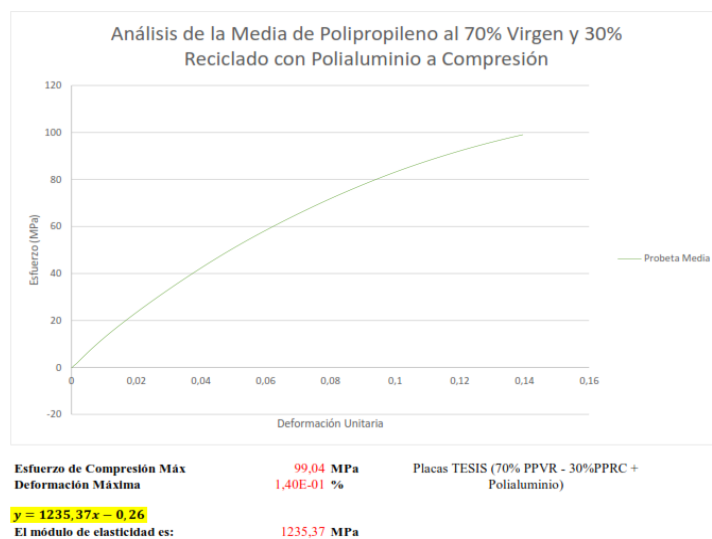


Figura 64. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 70% PP virgen – 30% PP reciclado

- Material compuesto con matriz polimérica 100% PP reciclado

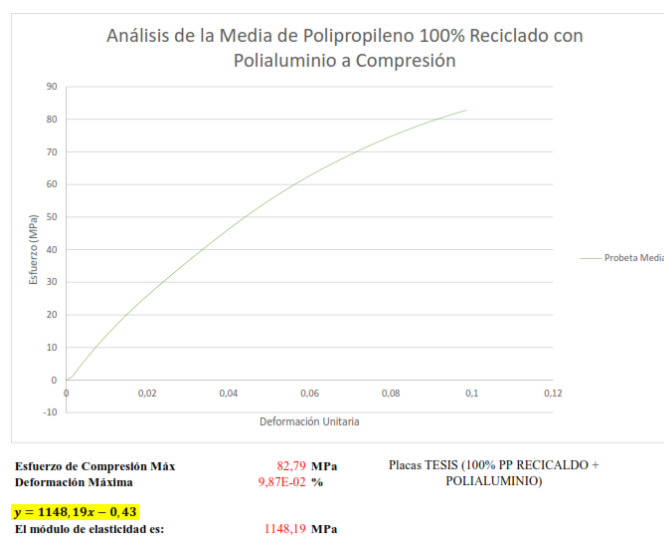


Figura 65. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas con matriz 100% PP reciclado

Resultados para el ensayo de compresión del material Ecopak, adquirido de la empresa Ecuaplastic.

- Material 100% Polialuminio (tableros Ecopak)

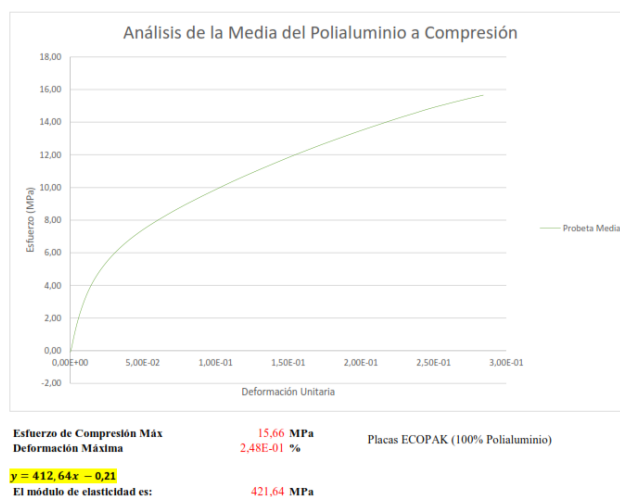


Figura 66. Resultado de la media del ensayo de compresión de las probetas del tablero Ecopak

Al sintetizar los resultados se obtiene las siguientes tablas, las mismas que muestra los resultados de todas las planchas ensayadas.

Tabla 15.

Resultados compilados del ensayo de tracción de las distintas probetas

Planchas	Ensayo de Tracción							
	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima %		Módulo Elástico MPa		Coeficiente Poisson	
	PET	PP	PET $\times 10^{-03}$	PP $\times 10^{-02}$	PET	PP	PET	PP
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero virgen	8.40	85.74	5.50	1.85	1764.30	7015.27	0.39	0.35
Material compuesto con matriz polimérica de 90% polímero virgen – 10% polímero reciclado	7.39	85.28	5.10	1.25	1570.44	8920.17	0.39	0.39
Material compuesto con matriz polimérica de 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado	8.88	85.32	5.90	1.60	1733.22	7808.85	0.44	0.40

Material compuesto con matriz polimérica de 70% polímero virgen – 30% polímero reciclado	6.16	82.57	4.67	2.10	1375.93	6355.03	0.52	0.48
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero reciclado	8.63	88.38	5.50	1.65	1761.86	7854.45	0.39	0.33
Plancha	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$		Módulo Elástico MPa		Coefficiente Poisson	
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	6.30		3.20		592.66		0.2	

Tabla 16.

Resultados compilados del ensayo de flexión de las distintas probetas

Planchas	Ensayo de Flexión					
	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima %		Módulo Elástico MPa	
	PET	PP	PET $\times 10^{-02}$	PP $\times 10^{-02}$	PET	PP
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero virgen	0.68	1.13	1.49	6.40	42.73	26.66
Material compuesto con matriz polimérica de 90% polímero virgen – 10% polímero reciclado	2.52	1.28	7.55	6.00	40.64	21.59
Material compuesto con matriz polimérica de 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado	2.74	1.04	7.35	10.00	43.71	13.71
Material compuesto con matriz polimérica de 70% polímero virgen – 30% polímero reciclado	2.91	1.17	6.35	9.00	50.44	23.69
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero reciclado	9.12	0.89	0.493	7.00	64.49	9.41
Plancha	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima % $\times 10^{-01}$		Módulo Elástico MPa	
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	1.00		1.45		33.20	

Tabla 17.

Resultados compilados del ensayo de compresión de las distintas probetas

Planchas	Ensayo de Compresión					
	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima %		Módulo Elástico MPa	
	PET	PP	PET x10 ⁻⁰²	PP x10 ⁻⁰²	PET	PP
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero virgen	110.03	54.66	12.40	11.00	905.68	633.21
Material compuesto con matriz polimérica de 90% polímero virgen – 10% polímero reciclado	95.84	38.48	9.91	10.00	947.49	488.57
Material compuesto con matriz polimérica de 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado	89.98	82.98	7.50	14.00	1057.36	890.44
Material compuesto con matriz polimérica de 70% polímero virgen – 30% polímero reciclado	90.91	99.04	10.30	14.00	1149.71	1235.37
Material compuesto con matriz polimérica de 100% polímero reciclado	70.89	82.79	10.00	9.87	762.67	1148.19
Plancha	Esfuerzo Máximo MPa		Deformación Máxima % x10 ⁻⁰¹		Módulo Elástico MPa	
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	15.66		2.48		421.64	

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizarán los diferentes resultados obtenidos en los capítulos 4 y 5, tomando en cuenta que en cuanto a la simulación y a la aproximación de resultados se analizó únicamente el material sometido a fuerzas de tracción. Además, se realizó ensayos de compresión y de flexión del material obtenido para tener una mejor caracterización mecánica y así definir de mejor manera sus aplicaciones.

6.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Para un mejor análisis de las planchas cuya matriz polimérica tiene como base PET y matriz PP respectivamente, se sintetizaron los resultados en la Tabla 18 y en la Tabla 19.

Tabla 18.

Resultados de la simulación del material compuesto entre PET y polialuminio

Material	Resultados obtenidos del Ansys		Resultados obtenidos del Mathcad	
	Esfuerzo Máximo MPa	Desplazamiento Máximo mm	Módulo Elástico MPa	Coefficiente Poisson
Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	9.445	0.9745	1865.8	0.37
Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	9.861	1.0217	1782.2	0.37
Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	10.354	1.0730	1698.6	0.37
Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	10.894	1.1292	1615.0	0.37
Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio	10.960	1.7558	1029.9	0.37

Tabla 19.

Resultados de la simulación del material compuesto entre PP y polialuminio

Material	Resultados obtenidos del Ansys		Resultados obtenidos del Mathcad	
	Esfuerzo Máximo MPa	Desplazamiento Máximo mm	Módulo Elástico MPa	Coefficiente Poisson
Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	12.618	1.3008	1401.4	0.34
Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP y polialuminio	12.659	1.3059	1399.0	0.34
Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	12.684	1.3076	1396.6	0.34
Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	12.682	1.3074	1394.2	0.34
Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio	12.798	1.3194	1377.3	0.34

Los datos detallados en las Tablas 18 y 19, son los datos idóneos, los cuales dan una base real de que resultados esperar en los ensayos de tracción a realizar. Estos datos son un importante punto de partida para analizar la viabilidad del proyecto, así como también ayudará a analizar la factibilidad de reemplazar las planchas de polialuminio, que actualmente se encuentran en el mercado ecuatoriano. (planchas Ecopak).

6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Para realizar el análisis general del nuevo material compuesto, se realizaron pruebas a tracción de los materiales vírgenes polietileno tereftalato y polipropileno. Estas pruebas se elaboraron con el fin de reconocer sus características mecánicas y posteriormente se pueda definir si dichos materiales compuestos mejoran las propiedades mecánicas. Así mismo, se analizó y comparó las planchas del material Ecopak para definir si estas pueden ser reemplazadas.

Resultados del ensayo de tracción de los materiales PET y PP.

- Material PET virgen

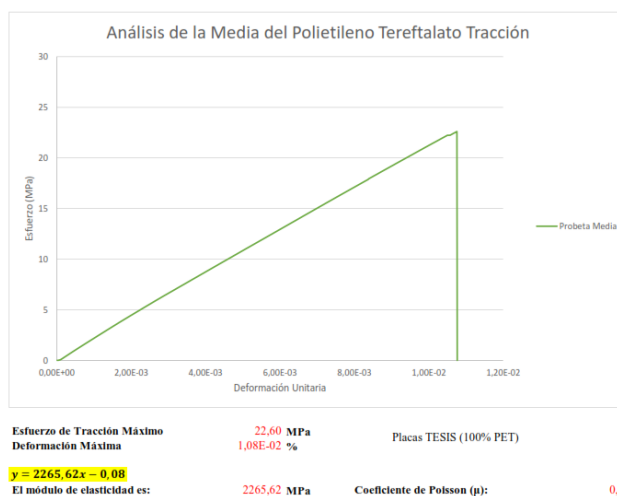


Figura 67. Resultado del ensayo de tracción de material PET virgen

- Material PP virgen

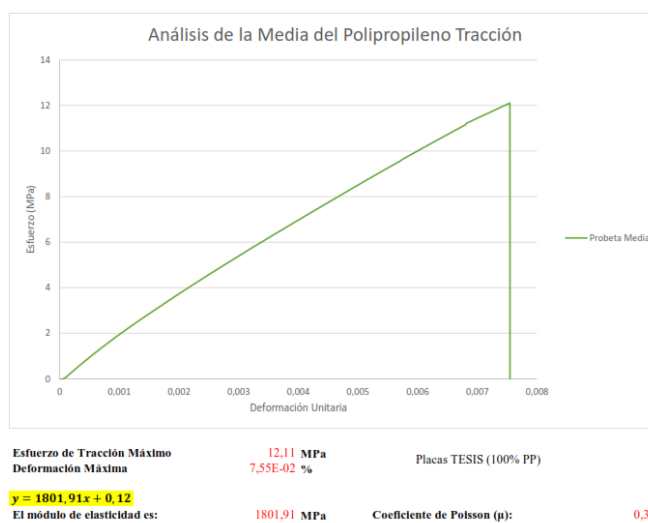


Figura 68. Resultado del ensayo de tracción de material PP virgen

Las características mecánicas de los materiales vírgenes se detallan en la Tabla 20.

Tabla 20.

Resultados del ensayo a tracción de los materiales vírgenes y planchas Ecopak

Material	Ensayo de Tracción			
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$	Módulo Elástico MPa	Coefficiente Poisson
Polietileno tereftalato (PET)	22.60	1.08	2265.62	0.4
Polipropileno (PP)	12.11	7.55	1801.91	0.36
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	6.30	3.20	592.66	0.20

En la comparación entre la Tabla 20 y la Tabla 21 descrita a continuación, se obtiene el siguiente análisis:

Tabla 21.

Resultados de los ensayos de tracción con material PET

Material	Ensayo de Tracción			
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-03}$	Módulo Elástico MPa	Coefficiente Poisson
Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	8.40	5.50	1764.30	0.39
Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	7.39	5.10	1570.44	0.39
Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	8.88	5.90	1733.22	0.44
Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	6.16	4.67	1375.93	0.52
Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio	8.63	5.50	1761.86	0.39

Se observa que todos los materiales compuestos tienen en promedio un esfuerzo máximo de 7.892 MPa. En comparación al material virgen (datos en la Tabla 20) el material compuesto reduce su esfuerzo máximo a la tracción en un 65.08%, de igual manera la deformación máxima reduce en un 50.62% y el módulo de elasticidad o módulo elástico reduce en un 27.57%. Mientras que el

coeficiente de Poisson se mantiene, exceptuando en el material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio, en el cual se observa un incremento del 30%. Definiendo así que el refuerzo de polialuminio en las diferentes mezclas no mejoraron ningún aspecto significativamente de las características mecánicas al contrario las redujeron.

En comparación con el material Ecopak (datos en la Tabla 20), las planchas del material compuesto entre PET y polialuminio demuestran mejores características mecánicas, en cuanto a módulo de elasticidad dichas planchas de material compuestos tienen en promedio 1641.15 MPa es decir un incremento del 176.91% en esta propiedad mecánica; en cuanto al esfuerzo máximo dichas planchas soportan un promedio de 7.892 MPa es decir un incremento del 25.27%. No obstante, la deformación que presentan dichas planchas es menor a la deformación de la plancha Ecopak, esta característica se redujo en un 83.33%.

A continuación, se realiza una comparación directa entre las planchas del material compuesto conformado y las planchas Ecopak.

Tabla 22.

Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	8.40	6.30	Incremento del 33.33%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.550	3.20	Disminución del 82.21%
Módulo elástico (MPa)	1764.30	592.66	Incremento del 197.69%
Coefficiente de Poisson	0.39	0.20	Incremento del 95.00%

Tabla 23.

Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	7.39	6.30	Incremento del 17.30%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.510	3.20	Disminución del 84.06%
Módulo elástico (MPa)	1570.11	592.66	Incremento del 164.98%
Coefficiente de Poisson	0.39	0.20	Incremento del 95.00%

Tabla 24.

Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	8.88	6.30	Incremento del 40.95%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.590	3.20	Disminución del 81.56%
Módulo elástico (MPa)	1733.22	592.66	Incremento del 192.45%
Coefficiente de Poisson	0.44	0.20	Incremento del 120.00%

Tabla 25.

Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	6.16	6.30	Disminución del 2.22%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.467	3.20	Disminución del 85.41%
Módulo elástico (MPa)	1375.93	592.66	Incremento del 132.16%
Coefficiente de Poisson	0.52	0.20	Incremento del 160.00%

Tabla 26.

Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	8.63	6.30	Incremento del 36.99%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.550	3.20	Disminución del 82.81%
Módulo elástico (MPa)	1761.86	592.66	Incremento del 197.28%
Coefficiente de Poisson	0.39	0.20	Incremento del 95.00%

En la comparación entre la Tabla 20 y la Tabla 27 descrita a continuación, se obtiene el siguiente análisis:

Tabla 27.

Resultados de los ensayos de tracción con material PP

Material	Ensayo de Tracción			
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$	Módulo Elástico MPa	Coefficiente Poisson
Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	85.74	1.85	7015.27	0.35
Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP y polialuminio	85.28	1.25	8920.17	0.39
Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	85.32	1.60	7808.85	0.40
Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	82.57	2.10	6355.03	0.48
Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio	88.38	1.65	7854.45	0.33

Se observa que todos los materiales compuestos tienen en promedio un esfuerzo máximo de 85.458 MPa. En comparación al material virgen (datos en la Tabla 20) el material compuesto aumenta su esfuerzo máximo a la tracción en un 605.68%, el módulo de elasticidad o módulo elástico aumenta en un 321.26% y la deformación máxima disminuye en un 77.62%. Mientras que el coeficiente de Poisson se mantiene, exceptuando en el material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio, en el cual se observa un incremento del 33%. Definiendo así

que el refuerzo de polialuminio en las diferentes mezclas mejoraron significativamente las características mecánicas del polipropileno.

Las planchas del material compuesto entre PP y polialuminio, demuestran mejores características mecánicas, en cuanto a módulo de elasticidad dichas planchas tienen en promedio 7590.754 MPa es decir un incremento del 1180.79%; en cuanto al esfuerzo máximo estas soportan un promedio de 85.458 MPa es decir un incremento del 1256.48%. No obstante, la deformación que presentan dichas planchas es menor, esta característica se redujo en un 47.19%. Todos estos resultados son en comparación con el material Ecopak (datos en la Tabla 20).

A continuación, se realizará una comparación directa entre las planchas conformadas y las planchas Ecopak.

Tabla 28.

Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	85.74	6.30	Incremento del 1260.95%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	1.85	3.20	Disminución del 42.19%
Módulo elástico (MPa)	7015.27	592.66	Incremento del 1083.69%
Coefficiente de Poisson	0.35	0.20	Incremento del 75.00%

Tabla 29.

Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	85.28	6.30	Incremento del 1253.65%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	1.25	3.20	Disminución del 60.94%
Módulo elástico (MPa)	8920.17	592.66	Incremento del 1405.11%
Coefficiente de Poisson	0.39	0.20	Incremento del 95.00%

Tabla 30.

Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	85.32	6.30	Incremento del 1254.29%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	1.60	3.20	Disminución del 50.00%
Módulo elástico (MPa)	7808.85	592.66	Incremento del 1217.59%
Coefficiente de Poisson	0.40	0.20	Incremento del 100.00%

Tabla 31.

Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	82.57	6.30	Incremento del 1210.64%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	2.10	3.20	Disminución del 34.38%
Módulo elástico (MPa)	6355.03	592.66	Incremento del 972.29%
Coefficiente de Poisson	0.48	0.20	Incremento del 140.00%

Tabla 32.

Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a tracción	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	88.38	6.30	Incremento del 1302.86%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	1.65	3.20	Disminución del 48.44%
Módulo elástico (MPa)	7854.45	592.66	Incremento del 1225.29%
Coefficiente de Poisson	0.33	0.20	Incremento del 65.00%

Las características mecánicas a flexión del material Ecopak se detallan en la Tabla 33.

Tabla 33.

Resultados del ensayo a flexión de las planchas Ecopak

Material	Ensayo de Flexión		
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-01}$	Módulo Elástico MPa
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	1.00	1.45	33.20

En la comparación entre la Tabla 33 y la Tabla 34 descrita a continuación, se obtiene las siguientes tablas de comparación.

Tabla 34.

Resultados de los ensayos de flexión con material compuesto PET

Material	Ensayo de Flexión		
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$	Módulo Elástico MPa
Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	0.68	1.49	42.73
Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	2.52	7.55	40.64
Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	2.74	7.35	43.71
Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	2.91	6.35	50.44
Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio	9.12	0.493	64.49

Tabla 35.

Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	0.68	1.00	Disminución del 32.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	1.49	14.50	Disminución del 89.72%
Módulo elástico (MPa)	40.64	33.20	Incremento del 28.71%

Tabla 36.

Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	2.52	1.00	Incremento del 152.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	7.55	14.50	Disminución del 47.93%
Módulo elástico (MPa)	40.64	33.20	Incremento del 26.21%

Tabla 37.

Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	2.74	1.00	Incremento del 174.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	7.35	14.50	Disminución del 49.31%
Módulo elástico (MPa)	43.71	33.20	Incremento del 31.66%

Tabla 38.

Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	2.91	1.00	Incremento del 191.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	6.35	14.50	Disminución del 56.21%
Módulo elástico (MPa)	50.44	33.20	Incremento del 51.93%

Tabla 39.

Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	9.12	1.00	Incremento del 812.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	0.493	14.50	Disminución del 96.60%
Módulo elástico (MPa)	64.49	33.20	Incremento del 94.25%

En la comparación entre la Tabla 33 y la Tabla 40 descrita a continuación, se obtiene las siguientes tablas de comparación

Tabla 40.

Resultados de los ensayos de flexión con material compuesto PP

Material	Ensayo de Flexión		
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$	Módulo Elástico MPa
Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	1.13	6.40	26.66
Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP y polialuminio	1.28	6.00	21.59
Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	1.04	10.00	13.71
Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	1.17	9.00	23.69
Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio	0.89	7.00	9.41

Tabla 41.

Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	1.13	1.00	Incremento del 13.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	6.40	14.50	Disminución del 55.86%
Módulo elástico (MPa)	26.66	33.20	Disminución del 19.70%

Tabla 42.

Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	1.28	1.00	Incremento del 28.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	6.00	14.50	Disminución del 58.62%
Módulo elástico (MPa)	21.59	33.20	Disminución del 34.97%

Tabla 43.

Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	1.04	1.00	Incremento del 4.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	10.00	14.50	Disminución del 31.04%
Módulo elástico (MPa)	13.71	33.20	Disminución del 58.71%

Tabla 44.

Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	1.17	1.00	Incremento del 17.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	9.00	14.50	Disminución del 37.93%
Módulo elástico (MPa)	23.69	33.20	Disminución del 28.65%

Tabla 45.

Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a flexión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	0.89	1.00	Disminución del 11.00%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	7.00	14.50	Disminución del 51.72%
Módulo elástico (MPa)	9.41	33.20	Disminución del 71.66%

Se detallan en la Tabla 46, las características mecánicas a compresión del material Ecopak.

Tabla 46.

Resultados de los ensayos de compresión de las planchas Ecopak

Material	Ensayo de Compresión		
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-01}$	Módulo Elástico MPa
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	15.66	2.48	421.64

En la comparación entre la Tabla 46 y la Tabla 47 descrita a continuación, se obtiene las siguientes tablas de comparación

Tabla 47.

Resultados de los ensayos de compresión con material compuesto PET y planchas Ecopak

Material	Ensayo de Compresión		
	Esfuerzo Máximo MPa	Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$	Módulo Elástico MPa
Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	110.03	12.40	905.68
Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	95.84	9.91	947.49
Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	89.98	7.50	1057.36
Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	90.91	10.30	1149.71
Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio	70.89	10.00	762.67

Tabla 48.

Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	110.03	15.66	Incremento del 602.12%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	12.40	24.80	Disminución del 50.00%
Módulo elástico (MPa)	905.68	421.64	Incremento del 114.80%

Tabla 49.

Material compuesto 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	95.84	15.66	Incremento del 512.01%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	9.91	24.80	Disminución del 60.04%
Módulo elástico (MPa)	947.49	421.64	Incremento del 124.71%

Tabla 50.

Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	89.98	15.66	Incremento del 474.59%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	7.50	24.80	Disminución del 69.76%
Módulo elástico (MPa)	1057.36	421.64	Incremento del 150.77%

Tabla 51.

Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	90.91	15.66	Incremento del 480.52%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	10.30	24.80	Disminución del 58.47%
Módulo elástico (MPa)	1149.71	421.64	Incremento del 172.68%

Tabla 52.

Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PET reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	70.89	15.66	Incremento del 352.68%
Deformación máxima % ($\times 10^{-02}$)	10.00	24.80	Disminución del 59.68%
Módulo elástico (MPa)	762.67	421.64	Incremento del 80.88%

En la comparación entre la Tabla 46 y la Tabla 53 descrita a continuación, se obtiene las siguientes tablas de comparación

Tabla 53.

Resultados de los ensayos de compresión con material compuesto PP

Material	Ensayo de Compresión		
	Esfuerzo máximo MPa	Deformación máxima % $\times 10^{-01}$	Módulo elástico MPa
Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	54.66	1.10	633.21
Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP y polialuminio	38.48	1.00	488.57
Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	82.98	1.40	890.44
Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	99.04	1.40	1235.37
Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio	82.79	0.987	1148.19

Tabla 54.

Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	54.66	15.66	Incremento del 249.04%
Deformación máxima % ($\times 10^{-01}$)	1.10	2.48	Disminución del 55.65%
Módulo elástico (MPa)	633.21	421.64	Incremento del 50.18%

Tabla 55.

Material compuesto 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	38.48	15.66	Incremento del 145.72%
Deformación máxima % ($\times 10^{-01}$)	1.00	2.48	Disminución del 59.68%
Módulo elástico (MPa)	488.57	421.64	Incremento del 15.87%

Tabla 56.

Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	82.98	15.66	Incremento del 429.89%
Deformación máxima % ($\times 10^{-01}$)	1.40	2.48	Disminución del 43.55%
Módulo elástico (MPa)	890.44	421.64	Incremento del 111.19%

Tabla 57.

Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	99.04	15.66	Incremento del 532.44%
Deformación máxima % ($\times 10^{-01}$)	1.40	2.48	Disminución del 43.55%
Módulo elástico (MPa)	1235.37	421.64	Incremento del 192.99%

Tabla 58.

Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio VS. plancha Ecopak

Propiedades a compresión	Análisis de resultados		
	Material compuesto de 100% PP reciclado y polialuminio	Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	Observaciones
Esfuerzo máximo (MPa)	82.79	15.66	Incremento del 428.67%
Deformación máxima % ($\times 10^{-01}$)	0.987	2.48	Disminución del 60.20%
Módulo elástico (MPa)	1148.19	421.64	Incremento del 172.32%

Con los resultados expuestos en todas las tablas de comparación, se puede definir que el material compuesto conformado tiene una mayor rigidez y una mayor fragilidad en comparación al material Ecopak, esto debido al incremento en su módulo de elasticidad y su disminución en el porcentaje de deformación, respectivamente.

A su vez, en cuanto al análisis sobre el incremento en el coeficiente de Poisson (relación entre la deformación específica transversal y la deformación específica en la dirección de la fuerza) define que dicho material tiene menor desplazamiento longitudinal.

6.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE ENSAYO Y SIMULACIÓN

Se compararon los resultados entre las Tablas 18, 19, 21 y 27, puesto a que se analizaron únicamente los resultados a tracción, ya que los demás ensayos se realizaron para una mejor caracterización mecánica del material compuesto.

En la Tabla 59 se sintetizó los resultados para las planchas realizadas con PET, mientras que en la Tabla 60 se mostrarán los resultados para las planchas realizadas con PP; en ambas tablas se detallarán los resultados obtenidos para la plancha Ecopak.

Tabla 59.

Resultados compilados para las planchas con matriz polimérica de PET

Planchas	Ensayo de Tracción											
	Esfuerzo Máximo MPa			Deformación Máxima % $\times 10^{-03}$			Módulo Elástico MPa			Coeficiente Poisson		
	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.
Material compuesto 100% PET virgen y polialuminio	9.44	8.40	12%	3.61	5.50	34%	1865.8	1764.30	6%	0.37	0.39	5%
Material compuesto de 90% PET virgen – 10% PET reciclado y polialuminio	9.86	7.39	33%	3.78	5.10	26%	1782.2	1570.44	14%	0.37	0.39	5%
Material compuesto 80% PET virgen – 20% PET reciclado y polialuminio	10.35	8.88	16%	3.97	5.90	33%	1698.6	1733.22	2%	0.37	0.44	16%
Material compuesto 70% PET virgen – 30% PET reciclado y polialuminio	10.89	6.16	76%	4.18	4.67	19%	1615.0	1375.93	17%	0.37	0.52	29%
Material compuesto 100% PET reciclado y polialuminio	10.96	8.63	26%	6.50	5.50	18%	1029.9	1761.86	42%	0.37	0.39	5%
Plancha	Esfuerzo Máximo MPa			Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$			Módulo Elástico MPa			Coeficiente Poisson		
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	6.30			3.20			592.66			0.2		

Tabla 60.

Resultados compilados para las planchas con matriz polimérica de PP

Planchas	Ensayo de Tracción											
	Esfuerzo Máximo MPa			Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$			Módulo Elástico MPa			Coeficiente Poisson		
	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.	Sim.	Ens.	Err.
Material compuesto 100% PP virgen y polialuminio	12.62	85.74	85%	0.481	1.85	73%	1401.4	7015.27	80%	0.34	0.35	3%
Material compuesto de 90% PP virgen – 10% PP reciclado y polialuminio	12.66	85.28	85%	0.483	1.25	61%	1399.0	8920.17	84%	0.34	0.39	13%
Material compuesto 80% PP virgen – 20% PP reciclado y polialuminio	12.68	85.32	85%	0.484	1.60	69%	1396.6	7808.85	82%	0.34	0.40	15%
Material compuesto 70% PP virgen – 30% PP reciclado y polialuminio	12.68	82.57	85%	0.484	2.10	76%	1394.2	6355.03	78%	0.34	0.48	29%
Material compuesto 100% PP reciclado y polialuminio	12.80	88.38	86%	0.488	1.65	70%	1377.3	7854.45	82%	0.34	0.33	3%
Plancha	Esfuerzo Máximo MPa			Deformación Máxima % $\times 10^{-02}$			Módulo Elástico MPa			Coeficiente Poisson		
Material 100% polialuminio (tablero Ecopak)	6.30			3.20			592.66			0.2		

Según los datos obtenidos en ambas tablas, se puede definir que el material compuesto obtenido supera las propiedades esperadas, a su vez se esperaba una tendencia de comportamiento uniforme y similar en ambas composiciones del material compuesto en términos de sus matrices poliméricas tal como se muestran en las figuras de simulación que se encuentran en el capítulo 4, ese efecto si se obtuvo, es decir en el conjunto de planchas elaboradas con una matriz polimérica PET sus módulos elásticos fluctuaron entre 1350 MPa a 1765 MPa, mientras que los valores del módulo de elasticidad de la simulación se encuentran en un rango de 1025 MPa a 1870 MPa.

En cuanto a las planchas elaboradas con matriz polimérica PP, en la parte práctica dichas planchas superaron en un 444.36% al módulo elástico esperado, ya que el promedio general del módulo de elasticidad en el modelo matemático es de 1393.7 MPa, mientras que el módulo de elasticidad de las planchas ensayadas es 7586.654 MPa. Debido a las características que presentó en los ensayos decimos que es un polímero homopolímero isotáctico, al ser un polímero lineal en su solidificación la estructura espacial adquiere una disposición ordenada con alta cristalinidad, esta clasificación de polímeros presentan mejores características mecánicas, en cuanto a resistencia a la tracción y elevada rigidez las mismas propiedades que mejoraron con un material de refuerzo de polialuminio (Esentia, 2017).

Las memorias de cálculo detalladas se encuentran en los Anexo E, F y G para los ensayos de tracción, flexión y compresión, respectivamente.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS FINANCIERO

En el presente capítulo se detallan los costos invertidos para el presente proyecto investigativo. Todos los equipos y resultados serán para beneficio y uso de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

7.1 COSTOS DIRECTOS

Se define como costos directos, el costo de todos los componentes y materiales utilizados para la fabricación de la trituradora y las planchas de material compuesto. Los mismos que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 61.

Materiales utilizados para la fabricación de la máquina trituradora

Descripción	Precio (\$)	Cantidad	Total (\$)
Láminas Bohler K110 400 mm x 400 mm x 10 mm	16.30 el kilogramo	1	250.20
Láminas Bohler K110 143 mm x 222mm x 10 mm	16.30 el kilogramo	1	71.42
Ac transmisión 1018 hexagonal 1"	13.74	1 metro	13.74
Ac transmisión 1018 red 9/16	2.49	1 metro	2.49
Duralon red 66x140mm	26.34	1	26.34
Rodamientos NTN 6004	4.90	4	19.60
Plancha 1010 h 15	1.38 el kilogramo	4.53 kilogramos	6.25
Plancha 1010 h 10	1.38 el kilogramo	3.15 kilogramos	4.38
Tubo Cuadrado Negro 25 mm x 1.5 mm	6.73	1 metro	6.73
Pintura anticorrosiva gris	4.23	2	8.46
Pintura anticorrosiva negro	4.23	1	4.23
Platina 40 x 4"	9.95	1 metro	9.95
Pernos Alen M6 x 25	0.20	8	1.60
Pernos hexagonales M10 x 12	0.21	8	1.68
Total			427.07

Tabla 62.*Elementos eléctricos utilizados para la fabricación de la máquina trituradora*

Descripción	Precio (\$)	Cantidad	Total (\$)
Motor Bonelli 1.5 HP (segunda mano)	250	1	250.00
Reductor a 90 RPM (segunda mano)	150	1	150.00
Interruptor de 220 V	10.15	1	10.15
Total			410.15

Tabla 63.*Materiales para el conformado del material compuesto*

Descripción	Precio (\$)	Cantidad	Total (\$)
Polietileno Tereftalato Virgen	2.08 el kilogramo	25	52.00
Polipropileno Virgen	2.80 el kilogramo	25	70.00
Polietileno Tereftalato Reciclado (compra de botellas)	0.02	750	15.00
Polipropileno reciclado (compra de tarrinas)	0.05	800	40.00
Tetra Pak®	0.03	1000	30.00
Total			207.00

Tabla 64.*Servicios de corte, torneado y prensado de material*

Descripción	Total (\$)
Corte de piezas en CNC por chorro de agua	500.00
Torneado de piezas	315.00
Uso de prensa térmica	100.00
Total	915.00

Tabla 65.*Total de costos directos*

Descripción	Total (\$)
Materiales para máquina	427.07
Materiales para planchas	207.00
Elementos eléctricos	410.15
Servicios	915.00
Total	1959.22

7.2 COSTOS INDIRECTOS

Se define como costos indirectos, el costo de todos los servicios utilizados para la elaboración de las planchas y el proyecto de investigación en sí. Los mismos que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 66.

Uso de laboratorios

Descripción	Precio diario (\$)	Días	Total (\$)
Laboratorio de resistencia de materiales (pertenece a Ing. Civil)	80.00	15	1200.00
Total			1200.00

Tabla 67.

Varios

Descripción	Precio (\$)	Cantidad	Meses	Total (\$)
Mano de obra	400.00	2	9	7200.00
Luz	30.00	1	9	270.00
Transporte	20.00	2	9	360.00
Impresiones	40.00	1	1	40.00
Internet	35.00	1	9	315.00
Uso de metalmecánica	15.00	1	3	45.00
Total				8230.00

Tabla 68.

Total de costos indirectos

Descripción	Total (\$)
Uso Laboratorios	1200.00
Varios	8230.00
Total	9430.00

7.3 COSTOS TOTALES

Los costos totales serán la suma de los costos directos e indirectos, los mismo que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 69.*Total de costos del proyecto*

Descripción	Total (\$)
Costos Directos	1959.22
Costos Indirectos	9430.00
Total	11 389.22

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

El logro más importante del proyecto fue la conformación de un material compuesto en base a materiales reciclados y vírgenes como son: polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP) y polialuminio Tetra Pak® (PEAL).

Se concluyó que las planchas de las distintas mezclas obtuvieron mejores características mecánicas que las planchas de 100% polialuminio (planchas Ecopak, elaboradas por la empresa Ecuaplatic), el material compuesto conformado por 100% polímero virgen con refuerzo de polialuminio obtuvo en cuanto a módulo de elasticidad un incremento del 197.69% y del 1083.69% para su matriz polimérica PET y PP respectivamente.

En cuanto a la mezcla 90% PET virgen – 10% PET reciclado con un refuerzo de polialuminio, se obtuvo una mejora del 164.98% y el material compuesto cuya matriz polimérica fue conformada por 90% PP virgen – 10% PP se incrementó en un 1405.11%, en ambos casos se está comparando el módulo de elasticidad.

Para el material compuesto cuya matriz polimérica tiene un 80% polímero virgen – 20% polímero reciclado, se tiene; para PET un incremento del 192.45% en módulo de elasticidad y para PP un incremento del 1271.59% en módulo de elasticidad.

A su vez la mezcla 70% PET virgen – 30% PET reciclado con un refuerzo de polialuminio, se obtuvo un incremento del 132.16% en comparación al módulo de elasticidad de las planchas

Ecopak, mientras que para el compuesto cuya matriz polimérica fue conformada por 70% PP virgen – 30% PP se incrementó en un 972.29% el módulo de elasticidad.

Finalmente, también se obtuvieron excelentes resultados con las planchas de 100% PET reciclado con un incremento del 197.28% en el módulo de elasticidad y las planchas de 100% PP reciclado con refuerzo de polialuminio obtuvieron un incremento del 1225.29% respecto al módulo de elasticidad, concluyendo así que las planchas Ecopak, pueden ser reemplazadas en su totalidad por planchas de 100% PET reciclado o 100% PP reciclado con un refuerzo de polialuminio.

Con los resultados obtenidos, se ha demostrado que es posible elaborar planchas conformadas a partir de materiales, que antes eran considerados únicamente, descartables. Estas planchas tienen excelentes características mecánicas, lo que les hace excelentes sustitutos de las planchas Ecopak. Al elaborar las planchas conformados, también se deja un legado de sostenibilidad, protección con el medio ambiente, reutilización de materiales y responsabilidad social. De la misma manera, al reutilizar dos de los mayores contaminantes del Ecuador, polietileno tereftalato y polipropileno, y en un futuro cercano se puede eliminar la importación de basura Tetra Pak® a nuestro territorio.

Cabe recalcar que para la constitución de estas planchas con material 100% reciclado se utilizó: 800 gr en peso para una plancha de PET, en la cual 772 gr en peso son de material PET 100% reciclado, botellas plásticas transparentes. Mientras que para el conformado de planchas de 528 gr en peso para una plancha de PP, 500 gr en peso son de material PP 100% reciclado, tarrinas plásticas color gris y tapas de café color marrón. Es decir, tan solo se utilizó un 3.50% y un 5.30% respectivamente en peso total de PEAL, reduciendo así el uso total de polialuminio. Lo que permitiría que la cantidad de Tetra Pak® reciclado sea suficiente para elaborar en masa planchas de polialuminio (matriz polimérica más refuerzo de PEAL). Tomando en cuenta que en el 2018 se

logró reciclar en el Ecuador 2 200 toneladas de envases Tetra Pak®, lo que equivale a un 29% de la venta total de dichos envases (Zambrano, 2019).

Con los resultados expuestos en los capítulos anteriores sobre las planchas conformadas, las mismas pueden sustituir a materiales cuyos usos son de mampostería liviana o inmobiliario como son: MDF, Gypsum, aglomerados, planchas Ecopak, madera, entre otros. Pues se demostró que las planchas conformadas tienen buena resistencia mecánica, es decir, resistieron a mayor cantidad de fuerza en comparación al Ecopak, antes de romperse.

En los ensayos realizados se observó que los materiales compuestos conformados tuvieron mayor resistencia mecánica, pero menor deformación, por lo que se pueden definir como materiales poco dúctiles. Los módulos de elasticidad de cada una de las planchas en los diferentes ensayos destructivos fueron, por mucho, mayores a el módulo de elasticidad del material Ecopak, por lo que nuevamente se confirma que entre mayor sea su módulo de elasticidad, más rígido es un material.

En comparación a los resultados obtenidos en la simulación realizada con el software ANSYS, se observa que se obtuvo un material compuesto con mejores características mecánicas de las que se esperaban, lo que se concluye en que el material es válido.

A su vez se define que para el material compuesto con matriz PET los resultados obtenidos en cuanto a simulación y predicciones matemáticas son muy parecidos a los datos obtenidos tras los ensayos realizados. Mientras que los resultados de las planchas con PP superan altamente las expectativas. Esto debido a que se observa que el error generado entre simulación y ensayo en cuanto a las planchas de material compuesto PET varía entre un 2% y un 42% en distintas propiedades, en términos generales el error medio calculado en el esfuerzo máximo es del 32.60%, en el módulo de elasticidad se presenta un error medio del 16.20%, la deformación máxima tiene

un error medio del 26.00% y finalmente en el coeficiente de Poisson se generó un error medio del 12.00%.

Mientras que, en las planchas de material compuesto PP el error varía entre un 3% y un 95%, para el esfuerzo máximo se tiene un error medio del 85.20%, el módulo de elasticidad tiene un error medio del 81.20%, la deformación máxima presenta un error medio del 69.80% y finalmente el coeficiente de Poisson tiene un error medio del 12.60%, esta magnitud de error se produce debido a que la materia prima como se expuso en el capítulo 6, se trata de un polímero isotáctico, el cual con el refuerzo de polialuminio mejoró sus características aún más.

8.2 RECOMENDACIONES

Para la elaboración futura de planchas de polialuminio, se otorgan las siguientes recomendaciones generales y específicas.

Generales

1. Tener un lugar específico de recolección de material reciclado, de esta manera se podrá evitar la contaminación excesiva del mismo.
2. Instaurar la clasificación sistemática a nivel local y regional de los diversos desechos. Pues así se simplificará la a recolección efectiva y limpia en especial de los envases Tetra Pak ®.

Específicas

1. Se recomienda lavar íntegramente los envases Tetra Pak®, para evitar malos olores y/o formaciones de moho en la plancha de polialuminio interna.
2. Para la elaboración del conformado de planchas cuya matriz polimérica es polipropileno, no se recomienda el uso de fundas de dicho plástico, ya que las mismas

no se derriten. Sino todo lo contrario, se convierten en una especie de grumo macizo. Esta característica evita la homogeneidad del material y a su vez emana un olor fuerte al momento del prensado.

3. Se aconseja utilizar material triturado sólido como son: tarrinas, tapas y demás objetos cuya identificación plástica tenga un número cinco (5). Estos aseguran la homogeneidad de la mezcla.
4. Se sugiere el uso de silicona líquida para evitar que el material prensado se quede adherido al molde, y de ese modo facilitar la extracción.
5. Se aconseja que el molde de prensado tenga agujeros de desfogue, para evitar que exista acumulación de aire en el interior, característica que genera porosidad en el material.

BIBLIOGRAFÍA

- Abasolo, M. (2018). *Cálculo el módulo en engranajes cilíndricos*. Obtenido de Open Course Ware:
https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/15407/mod_resource/content/1/Tema%2010.%20C%C3%A1culo%20de%20m%C3%B3dulo%20de%20engranajes%20rectos.pdf
- Acero, D. P. (2018). Catálogo. *Acero AISI 1018 Transmisión*. Manta.
- Alucha. (2019). *Resources through innovation*. Obtenido de <http://www.alucha.com/>
- Askeland R., D. (2004). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: Thomson.
- Böhler. (2018). Manual de Aceros Especiales. Quito, Ecuador.
- Brito, V. (27 de 06 de 2017). *Multiplifica Ediciones*. Obtenido de Ecuador con madera para exportar:
<https://revistagestion.ec/economia-y-finanzas-analisis/ecuador-con-madera-para-exportar>
- Camaleon, G. (3 de Abril de 2016). *Grupo Camaleon*. Obtenido de Glosarios:
<https://glosarios.servidor-alicante.com/plastico/polimero-isotactico>
- Capella, F. (01 de Septiembre de 2006). *Canales Sectoriales*. Obtenido de Los composites de matriz termoplástica:
<https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5377-Los-composites-de-matriz-termoplastica.html>
- Carnicero, A. (2018). *INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS*. Obtenido de https://www.iit.comillas.edu/carnicero/Resistencia/Introduccion_al_MEF.pdf
- Carvajal, J. (Enero de 2005). “*Diseño de una máquina automática para la fabricación de resortes helicoidales de compresión y construcción del sistema de enrollado para la empresa VYMSA*”. Sangolquí. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/485/1/T-ESPE-012136.pdf>
- Censo, I. N. (2017). *INEC*. Obtenido de Gestión de Residuos: Residuos:
<http://www.ecuadorencifras.gob.ec/vdatos/>

Ciencia de Materiales, 4. c. (2005). Tema 7. *Materiales Compuesto*.

Composites, N. (2016). *Naval Composites*. Obtenido de Conceptos de los Materiales Compuestos:

<https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos/?fbclid=IwAR2MepKvTHINAck6ob86hE4qn121UBNxee94mCtFMekpjcmXHWnPiXCFkg>

Corporation, N. (s.f.). Rodamiento de Bolas y de Rodillos.

Diez Gonzales, J. (1995). *Materiales Compuestos*. Madrid: Editorial de Ingeniería Naval.

Ecuaplastic. (2018). *Ecuaplastic SC*. Obtenido de

<http://www.ecuaplasticsc.com/index.php/noticias/183-el-reciclaje-trae-una-nueva-madera?fbclid=IwAR3mWy55iHUvxSgD5svoaoyZzEaohuPaq58CibNQh9qzRtc5EdlV4KseiTw>

Edil da Costa, C. (2000). Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades., *Revista de Metalurgia*, 185.

Educativo, P. (3 de Julio de 2015). *Portal Educativo*. Obtenido de Clasificación de los polímeros:

<https://www.portaleducativo.net/cuarto-medio/9/clasificacion-de-los-polimeros>

Esenttia. (2017). *INFORMACIÓN SOBRE POLIPROPILENO Y GENERALIDADES*. Obtenido de

Esenttia Polipropileno del Caribe:
https://www.esenttia.co/downloadableFiles/technologyServices/informacionPolipropileno/Polipropileno_y_generalidades.pdf

Fernández, C. S. (2014). *Patología Rehabilitación Construcción*. Obtenido de Medición de la dureza en materiales : <https://www.patologiasconstruccion.net/2014/10/medicion-de-la-dureza-en-materiales-4/>

Fombuena, V. (2016). *Caracterización de Materiales Poliméricos*. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Frías, E. (Septiembre de 2004). El método de los elementos finitos.

Fuentes, M. (Mayo de 2007). *Electro Industria*. Obtenido de <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=701>

Geocycle. (8 de Agosto de 2018). *From landfill to resource: how Geocycle contributes to the fight against plastic pollution*. Obtenido de Geocycle: <https://www.geocycle.com/landfill-resource-how-geocycle-contributes-fight-against-plastic-pollution>

Govaert, A. v. (1999). *Polymeren*. Delft University Press.

Hermida, É. (2011). *Polímeros*. Obtenido de http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf

Hossne, A. G. (2007). Lagrangiano de un elemento finito plano elásticodinámico con ocho grados de libertad . *Ingeniería*, 26-28.

INEC. (1 de 5 de 2017). *INEC*. Obtenido de Censo de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/municipios-y-consejos-provinciales/>

JQ Industrias. (2018). *Datos Técnicos PET*. Obtenido de <http://www.jq.com.ar/info-pet.html#contenido-tecnico>

JQ, I. (2018). *Datos Técnicos PP-H*. Obtenido de <http://www.jq.com.ar/info-polipropileno.html#contenido-tecnico>

Lara Cascante, M. (2012). *Acerca del PET*. Obtenido de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/15405/ANEXO%201-PET.pdf>

Lean Manufacturing. (2018). *Lean Manufacturing 10*. Obtenido de Materiales Compuestos: <https://leanmanufacturing10.com/materiales-compuestos-que-son-para-que-sirven-y-tipos>

Mariano. (11 de Julio de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de Materiales compuestos: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/materiales-compuestos.html>

- Martínez, M. (2015). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Omnia Publisher SL.
- Mina., Y. T. (2 de Febrero de 2017). *El Comercio*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/construir/casa-construyo-playa-tetrapak-esmeraldas.html?fbclid=IwAR0E3N5woKJD5L68CatH3gvvL3mpb4bD7hI6-r1cShSEeX8VB1JZpOSjtD4>
- Miranda, W. (Septiembre de 2014). “Diseño de una máquina trituradora de plástico para la fábrica LA PAZ”. La Paz.
- Miranda, W. (2014). *Diseño de una máquina trituradora de plástico para la fábrica La Paz*. La Paz.
- Miravete, A. (2012). *Materiales Compuestos I*. Barcelona: Reverté.
- Morán, S. (23 de 07 de 2018). *Plan V*. Obtenido de Basura: los números rojos de Ecuador: <http://www.planv.com.ec/historias/sociedad/basura-numeros-rojos-ecuador>
- Muñoz, S. G. (2016). Reciclaje: Una industria en bruto. *Ekos*, 54-64.
- Murillo, F. (Marzo de 2018). Industriales. *Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructura de autobuses*. Madrid. Obtenido de http://oa.upm.es/50284/1/TFG_FRANCISCO_MURILLO_MARTINEZ.pdf
- Noroña, K. (14 de Septiembre de 2018). *¿Cuáles son los desechos que más contaminan el mar en Ecuador?* Obtenido de <https://www.elcomercio.com/tendencias/desechos-plasticos-oceanos-ecuador-ministeriodelambiente.html?fbclid=IwAR06lgZeGruSDhcBfKrRt8xuT7duyU7BfX7NtXCXLGtyQEnlxBUgvU2VkBUBU>
- Ojeda, M. (30 de Mayo de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Obtenido de PET: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

- Pak®, T. (2019). *Tetra Pak en breve*. Obtenido de <https://www.tetrapak.com/ec/about/tetra-pak-in-brief>
- Portalanza, L., & Rodríguez, I. (2013). *Diseño y construcción de una máquina trituradora de restos alimenticios y farmacéuticos fuera de especificación en envases de Tetra Pak y recipientes plásticos*. Sangolquí.
- Ramis, J. (2018). *CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMOESTABLES*. Obtenido de https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6686/06Txrj6de14.pdf?sequence=6&fbclid=IwAR012KLCtBici-zOcpKmISGn28skI3krUakAShxbmfxjth7_SJKHxYa2l6s
- Reciclario. (2018). *Tetra Brik®*. Obtenido de <http://reciclario.com.ar/indice/tetra-brik/>
- Stupenengo, F. (2011). *Materiales y materias primas*. Obtenido de Materiales compuestos: http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf?fbclid=IwAR28T3KnfbhtkfgVXzQ7mK0IK_Jx17O5C8zyP0dE7v5jct0vrx9Jyu4utU
- Terra.org. (01 de 07 de 2013). *Ya se recicla el tetrabrik al cien por cien*. Obtenido de <http://www.terra.org/categorias/articulos/ya-se-recicla-el-tetrabrik-al-cien-por-cien>
- Tetra Pak®. (2016). *Reciclaje envases de Tetra Pak®*. Obtenido de <https://docplayer.es/16063150-Caso-de-sostenibilidad-en-el-manejo-de-residuos-de-tetra-pak-colombia-reciclaje-envases-de-tetra-pak.html>
- Tetra Pak®. (11 de Noviembre de 2017). *Acerca de Tetra Pak®*. Obtenido de <https://www.tetrapak.com/ec/about/newsarchive/tetra-pak-fue-reconocida-por-su-proyecto-de-reciclaje-en-ecuador>
- Textos Científicos. (16 de Junio de 2006). *¿Qué son polímeros?* Obtenido de Textos Científicos: https://www.textoscientificos.com/polimeros/introduccion?fbclid=IwAR3Zb_8hPGoZc5G15dFl8rQHYPyCeUUFvy_mpXLJ2XW_38J84LG-ZQHilaE

Valarezo, M. I. (2018). Los desechos de tetra pak sirven para levantar casas. *EL Comercio*.
Obtenido de [https://www.elcomercio.com/tendencias/desechos-ecologia-vivienda-
materiales-construccion.html](https://www.elcomercio.com/tendencias/desechos-ecologia-vivienda-materiales-construccion.html)

Zambrano, R. (27 de Octubre de 2019). Ecuador es líder en el reciclaje de envases de Tetra Pak.
El Universo. Obtenido de
[https://www.eluniverso.com/noticias/2019/10/24/nota/7573910/envases-tetra-pak-agua-
ecuador](https://www.eluniverso.com/noticias/2019/10/24/nota/7573910/envases-tetra-pak-agua-ecuador)

ANEXOS