



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y TÉRMICA DE UN
MATERIAL COMPUESTO TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO
PARTICULADO A PARTIR DE MATERIAL RECICLADO**

Tesis que presenta

JUAN FRANCISCO KOH DZUL

En opción al título de

MAESTRO EN MATERIALES POLIMÉRICOS

Mérida, Yucatán, Mayo 2015

Mérida, Yucatán, México; a 3 de noviembre de 2016

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de materiales y métodos experimentales, los resultados y discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el periodo que se me asignó, para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de la Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.



Juan Francisco Koh Dzul

AGRADECIMIENTOS

A Dios quien siempre ha estado presente, por la paciencia brindada, por permitirme terminar la carrera y por ayudarme a superar los retos de la vida.

Quiero dedicar el presente trabajo a mi madre Leila, mujer trabajadora, perseverante, cariñosa, a mi padre José hombre muy trabajador, demostrando que todo se puede en la vida, ambos siempre pendientes de la familia, a mis hermanos Oscar y Roberto, quiero agradecer a todos ellos, por su amor, apoyo, consejos, por sus enseñanzas a lo largo de toda vida y en todo momento, familia los Amo.

A una persona muy importante en mi vida y la considero parte de mi familia; Carmen quien me ha motivado a superarme tanto profesional y personalmente, por su cariño y amor, por estar conmigo en los buenos y malos momentos; solamente Dios sabe cuánto la quiero Amor.

A mis directores de Tesis, el Dr. Gonzalo Carrillo y al Dr. Javier Guillen, agradezco su conocimiento, sus consejos y sobre todo su tiempo. A los miembros del comité tutorial, Dr Herbe Cruz Estrada, al Dr. Rubén Domínguez, al Dr. Pedro Cortez y al Dr. Emmanuel Flores, por sus valiosas contribuciones al trabajo.

Al MC. Ricardo Gamboa por el apoyo técnico. A mis amigos del grupo de maestría por su amistad.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) por permitirme desarrollar el presente trabajo en sus instalaciones, para obtener el grado de Maestro en ciencias, en la Unidad de Materiales, agradeciendo especialmente al Dr. Gonzalo Carrillo por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y dirigir el proyecto.

Francisco

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE	iv
LISTADO DE TABLAS	viii
LISTADO DE FIGURAS	ix
ABSTRACT	4
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	6
INTRODUCCIÓN	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
JUSTIFICACIÓN	8
HIPÓTESIS	10
OBJETIVOS	10
Objetivo general	10
Objetivos específicos	10
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	11
2.1. Conceptos fundamentales	12
2.1.1. Residuos	12
2.1.1.1 Residuos sólidos urbanos	12
2.1.1.2. Generación de residuos sólidos urbanos	12
2.1.1.3. Reciclaje	13
2.1.2. Polímeros	14
2.1.2.1 Polietileno	15
2.1.2.2. Densidad	16
2.1.2.2.1. Clasificación del polietileno de acuerdo a su densidad	17

2.1.2.3. Índice de fluidez	19
2.1.2.3.1. Polímeros como adhesivos	19
2.1.2.4. Polietileno Modificado	19
2.1.3.1. Reciclaje de plásticos	21
2.1.3.2. Reciclaje primario o re-extrusión	21
2.1.3.3. Reciclaje secundario o mecánico	21
2.1.3.4. Reciclaje terciario o químico	22
2.1.3.5. Reciclaje cuaternario o recuperación de energía	22
2.1.4. Envases multicapa	23
2.1.4.1. Reciclaje de envases multicapa tipo Tetra Brik®	26
2.1.4.2 Elaboración de las placas de Tetra Brik® reciclado.	27
2.1.4.2. Elaboración de las placas de polialuminio	28
2.1.5. Clasificación y definición de los materiales compuestos	28
2.1.5.1. Materiales compuestos comparados con materiales convencionales	30
2.1.5.2. Interfase matriz refuerzo	30
2.1.5.3. Materiales compuestos y estructura sándwich	31
2.1.5.3.1 Materiales compuestos de estructuras sándwich comerciales	32
2.1.5.3.2. Aplicaciones de los paneles sándwich en la construcción	32
2.1.6. Pruebas realizadas a estructuras tipo sándwich	33
2.1.6.1. Prueba de Impacto por caída de masa	34
2.1.6.1.1. Ensayos de impacto a materiales compuestos estructura tipo sándwich	35
2.1.6.2. Transferencia de calor	39

2.1.6.2.1. Transferencia de calor por conducción	40
2.1.6.3. Flexión tres puntos	43
2.1.6.3.1. Rolado de materiales	46
III. MATERIALES Y MÉTODOS	50
3.1 Acondicionamiento de los envases multicapa de desecho	51
3.2. Separación de la celulosa	51
3.2.1. Determinación experimental de la cantidad de polietileno adherida al aluminio	54
3.2.2. Determinación analítica de la cantidad de polietileno adherida al aluminio	57
3.3. Determinación del punto de fusión de los polímeros que conforman al panel sándwich	58
3.3.1. Calorimetría diferencial de barrido	58
3.4. Obtención del núcleo PAL	59
3.5. Obtención del núcleo PAR	60
3.6. Consolidación de los paneles	61
3.7. Caracterización térmica de los núcleo PAL y PAR	63
3.8. Impacto por caída de masa	66
3.9. Flexión a tres puntos	68
3.10. Rolado del material compuesto	69
3.10.1. Caracterización del material rolado	70
3.10.2. Exposición de intemperismo natural	71
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1. Determinación de la cantidad de polietileno adherida al aluminio	75
4.2. Determinación del punto de fusión de los polímeros que conforman al	

panel sándwich	76
4.2 Obtención de los núcleos PAR y PAL	76
4.4. Consolidación del panel sándwich	78
4.5. Caracterización térmica del núcleo de material reciclado	79
4.6. Impacto por caída de masa	82
4.8. Caracterización del material rolado	92
4.9. Resultado de exposición de intemperismo natural	97
CONCLUSIONES	100
BIBLIOGRAFÍA	103

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del polietileno.

Tabla 2. Clasificación amplia de los materiales compuestos.

Tabla 3. Dimensiones y pesos de los envases multicapa.

Tabla 4. Dimensiones y pesos de las secciones analizadas de los envases multicapa.

Tabla 5. Altura, tiempo y velocidad correspondiente a cada nivel de energía para el ensayo de impacto.

Tabla 6. Peso de los componentes recuperados del proceso de hidropulpeo de 10 kg de envases.

Tabla 7. Fracción en volumen porcentual de los componentes de los núcleos PAR y PAL.

Tabla 8. Valores promedio de las propiedades de los paneles sándwich con núcleo PAR y PAL.

Tabla 9. Temperaturas registradas durante el estado estacionario del equipo.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Residuos sólidos generados en México.	13
Figura 2. Composición de los residuos sólidos reciclados.	14
Figura 3. Reacción de polimerización del polietileno.	14
Figura 4. Monómero de etileno.	16
Figura 5. Polietileno lineal.	17
Figura 6. Polietileno ramificado.	18
Figura 7. Representación de la funcionalización del PE con anhídrido maleico como monómero y peróxido como iniciador.	20
Figura 8. Esquema de acoplamiento de grupos OH con el anhídrido maleico.	21
Figura 9. Composición del envase de Tetra Brik [®] .	24
Figura 10. Sección transversal de los envases multicapa. a) papel, b) PE de adhesivo del papel con el aluminio, c) hoja de aluminio, d) se observa las dos películas internas de PE.	26
Figura 11. Aspecto de la lámina fabricada con Poli-Aluminio.	27
Figura 12. Placa elaborada con envases multicapa.	28
Figura 13. Estructura sándwich de cartón corrugado.	31
Figura 14. Panel sándwich Reynobond [®] .	32
Figura 15. Paneles sándwich en fachadas de edificios.	33
Figura 16. Montaje experimental para pruebas de impacto al panel sándwich.	37
Figura 17. Paneles impactados a 5 y 25 J, a) material con núcleo de polímero espumado, b) material con núcleo de aluminio espumado.	38
Figura 18. Fuerzas de impacto bajo diferentes velocidades.	39
Figura 19. Método para la determinación de la conductividad térmica.	42
Figura 20. Comportamiento térmico de acuerdo a la densidad del núcleo.	43
Figura 21. Material sometido a flexión en tres puntos.	44
Figura 22. Grafica esfuerzo ()-deformación () para el aluminio en tensión.	46
Figura 23. Diagrama esquemático del proceso del rolado de un panel sándwich ^[64] .	47
Figura 24. Deformación en flexión de viga.	48

Figura 25. Materia prima para la elaboración de los núcleos.	51
Figura 26. Agitador mecánico.	52
Figura 27. Proceso de hidropulpeo, a) material en contenedor, b) agitación, c)separación de la celulosa, d) mezcla heterogénea, e) pulpa de celulosa, e)producto final.	53
Figura 28. Secado del material en estufa modelo FE 292 AD.	54
Figura 29. Material recuperado del proceso de hidropulpeo.	55
Figura 30. Fracción peso de cada lámina del envase multicapa.	57
Figura 31. Proceso de molienda.	59
Figura 32. Proceso de obtención del núcleo PAL.	60
Figura 33. Proceso de molienda del envase multicapa y del PEAD.	61
Figura 34. Proceso de obtención del núcleo PAR.	61
Figura 35. Apilado del panel sándwich.	62
Figura 36. Proceso de consolidación del panel sándwich.	63
Figura 37. Componentes del equipo de pruebas térmicas.	63
Figura 38. Equivalencia de la muestra para pruebas de conductividad térmica.	64
Figura 39. Esquema de la sección transversal del equipo de pruebas térmicas.	65
Figura 40. Componentes de la torre de impacto.	66
Figura 41. Probeta sometida a flexión de tres puntos.	68
Figura 42. Proceso de rolado del Panel sándwich.	70
Figura 43. Ensayo de Pelado; a) muestras a ensayar, b) probeta sometida al ensayo de pelado.	71
Figura 44. Muestras para intemperismo natural.	72
Figura 45. Muestras de intemperisimo durante el periodo de exposición: a) cara convexa con dirección hacia el sur (hacia el sol), b) cara cóncava con dirección hacia el norte.	73
Figura 46. Termograma DSC a) PE modificado y b) polietileno con tinta.	76
Figura 47. Núcleos a) PAL y b) PAR.	77
Figura 48. Gráfica del comportamiento térmico de los núcleos PAR y PAL.	80
Figura 49. Gráficas de impacto en el panel PAR con energías de 5,15 y 25 J.	83

Figura 50. Impacto con una energía de 15 J.	84
Figura 51. Gráfica Fuerza-Desplazamiento con una energía de impacto de 25 J de los paneles PAR y PAL.	85
Figura 52. Fuerza y desplazamiento de los paneles PAR y PAL bajo diferentes energías de impacto.	86
Figura 53. Sección transversal de los paneles impactados: a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J, d) 20 J, e) 25 J.	87
Figura 54. Falla en los paneles, a) panel PAL, b) panel PAR.	88
Figura 55. Falla que se presenta en la cara expuesta a tensión.	89
Figura 56. Curva esfuerzo de flexión para los paneles sándwich.	90
Figura 57. Módulos de flexión de los paneles.	91
Figura 58. Resistencia a la flexión de las dos configuraciones de polialuminio.	92
Figura 59. Máximas fuerzas generadas en los diferentes radios de curvatura en panel PAL.	94
Figura 60. Máximas fuerzas generadas en los diferentes radios de curvatura en panel PAR.	95
Figura 61. Comparativa entre las muestras de los paneles PAL y PAR.	96
Figura 62. Modo de fallo en las muestras de pelado a) muestra con radio de curvatura de 6 cm, b) muestra sin rolar.	97
Figura 63. Medición de las muestras roladas posterior al periodo de exposición externa a) panel PAL, b) panel PAR.	98

RESUMEN

Los productos plásticos de uso cotidianos parecen inofensivos y los utilizamos todos los días sin problema alguno, sin embargo, estos productos son un foco de contaminación al momento de desecharlos debido a que en su mayoría son elaborados con polímeros no biodegradables.

Un método para combatir la contaminación y contribuir con el medio ambiente es reciclando los materiales de desecho. Un producto de uso popular pero contaminante, es el envase multicapa para alimentos Tetra Brik[®] de la compañía productora líder a nivel mundial Tetra Pak[®], debido a que los envases son desechados una vez que se ha consumido su contenido, desperdiciando un material potencialmente reciclable. El problema particular de este envase radica en que es un laminado de 7 capas bien consolidado de tres materiales; aluminio, polietileno y papel. El gasto energético para recuperar los tres materiales por separado es alto, por lo que muchos prefieren desecharlo, sin embargo, se ha demostrado que también se puede aprovechar íntegramente este envase con un menor consumo energético.

En la actualidad, los envases multicapa son reciclados utilizando dos métodos populares, los cuales requieren de un menor consumo energético si es comparado con los procesos para separar los tres componentes del envase. En el primer método de reciclaje, los envases multicapa son molidos y este se emplea para la elaboración de tableros aglomerados por medio de termo-compresión. El segundo método de reciclaje implica separar el papel del envase multicapa (una materia prima de alto valor) por medio de un proceso de hidropulpeo, del cual solo se utiliza el polietileno y el aluminio del envase. Posterior a la separación del papel, el polietileno y el aluminio (conocido como polialuminio) recuperado es molido y con este material se elaboran tableros similares al elaborado con el primer método de reciclaje utilizando termo-compresión.

Este proyecto planea la elaboración de un panel sándwich que consta de dos láminas de aluminio unidas en ambos lados de un núcleo, el cual aprovecha al mencionado envase multicapa de desecho empleando los dos métodos descritos

anteriormente para el reciclado del envase multicapa. Al material molido que se obtiene del primer método de reciclado se le adiciona polietileno de alta densidad molido y se denomina núcleo PAR (para el presente proyecto). Al producto que se obtiene del segundo método de reciclaje se denomina núcleo PAL (para el presente proyecto).

El panel PAL y PAR aquí desarrollado tiene un gran potencial en la industria de la construcción por lo que se evalúa en pruebas mecánicas y térmicas; transferencia de calor, impacto por caída de masa, flexión y adhesión interfacial en el material previamente rolado. Estas propiedades son de particular interés debido a que el panel puede estar expuesto a alguna o varias de estas situaciones en condiciones reales de uso.

Los paneles PAL y PAR obtenidos presentan un 80% en fracción volumen de material reciclado, integrando a un nuevo ciclo de vida a este material de desecho.

Por medio de análisis térmicos se identificó la temperatura óptima para el conformado de los dos diferentes núcleos y la consolidación del panel. En la caracterización para determinar la conductividad térmica, el comportamiento que presentaron los dos núcleos fue distinto debido a los materiales que los constituyen. El núcleo PAL presentó una mayor conductividad térmica. Esto se debió a que en su composición presenta un porcentaje mayor de aluminio, en comparación con el núcleo PAR que contiene papel, el cual es un excelente aislante térmico.

En las pruebas de flexión e impacto, el núcleo PAL presentó una mayor absorción de energía teniendo un área mayor bajo curva fuerza-desplazamiento en comparación con el núcleo PAR. Esto debido a que el núcleo PAL se compone de un 80 % de polietileno de baja densidad.

En el proceso de rolado, los paneles PAL y PAR se curvaron hasta obtener un radio de 6 cm sin problema alguno. Sin embargo, en la prueba de adhesión interfacial, el panel PAL presentó una mayor resistencia al desprendimiento de cara en comparación con el panel con núcleo de PAR. Esta baja resistencia se atribuye a la mala adhesión interfacial entre el polímero y las fibras de papel.

Este proyecto contribuye al estudio de un nuevo material con atractivas propiedades con potencial interés en la sociedad para su adopción, como lo han hecho otros materiales de desecho que ahora tienen una ruta bien definida de reaprovechamiento (como los envases de vidrio, el cartón y los envases de PET) pero con un mayor valor tecnológico agregado.

ABSTRACT

Plastic products seem harmless in everyday use, where we use them every day without any concern; however, these products are a source of contamination at the time of disposal because most of them are made from non-biodegradable polymers.

A method of combating pollution and contribute to the environment is by recycling waste materials. A popular product but environmentally damaging, is the multi-layer food carton Tetra Brik of the world's leading production company Tetra Pak, because the containers are discarded once its content has been consumed, potentially wasting recyclable material. The particular problem of this container is that consist of 7 layers laminate well implemented, with three used materials; aluminum, polyethylene and paper. Energy expenditure to recover the three materials separately is high, so many people prefer to dispose them, however it has been shown that it is possible to make full recover of this cartons with low energy consumption.

Currently, the multilayer carton is recycled using two popular methods, which require lower energy consumption compared with other processes to separate the three components of the laminate container. In the first method of recycling, multilayer containers are grounded and prepare with this, the particle boards by means of thermo-compression. The second method involves recycling separate paper from the multilayer container (a raw material of high value) by a process which separates by hidropulping the polyethylene and aluminum container. Following separation of paper, polyethylene and aluminum (known as polyaluminium) are milled and recovered with this material similar to that developed with the first recycling method using thermo-compression boards.

This project study the development of a sandwich panel consisting of two aluminum sheets bonded on both sides of a core that use the mentioned multilayer cartons, using the two methods described above for recycling. The grounded material obtained from recycling is added with additional milled high density polyethylene, where the result is called PAR core (for this project). The product

obtained from the second recycling method (without paper) is called PAL core (for this project).

The PAL and PAR panels developed here have great potential in the construction industry so it is evaluated mechanically and thermally; heat transfer, mass dropping impact, flexural and interfacial adhesion with the previously rolled material. These properties are of particular interest because the panel may be exposed to one or more of these situations in real conditions of use.

PAL and PAR panels obtained have approximately 80% volume fraction of recycled material, integrating into a new cycle of life the waste material studied here.

Through thermal analysis the optimum temperature for forming the two different cores and strengthening panel is identified. In the characterization to determine the thermal conductivity, the behavior of the two nuclei was different because of the materials that constitute them. The PAL core has higher thermal conductivity. This was because in its composition has a higher percentage of aluminum, compared to paper containing core PAR, which is an excellent thermal insulator.

In bending and impact tests, PAL core has a higher energy absorption having a larger area under force-displacement curve compared to the PAR core. This is because the PAL core comprises 80% low density polyethylene.

In the process of rolling the PAL and PAR, curved panels were obtained with a radius of 6 cm without any adhesion problem. However, in interfacial adhesion test, the PAL panel had a higher peel strength compared to the PAR core. This lower resistance was attributed to the poor interfacial adhesion between the polymer and the paper fibers.

This project contributes to the study of a new material with attractive properties with potential interest in society for its adoption, as well as other waste materials now have a well-defined re-use (such as glass containers, cardboard containers and PET) but with a higher added value technological route.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se plantea el estudio de un material compuesto de estructura tipo sándwich, con caras de aluminio y un núcleo proveniente del reciclaje de los envases tipo Tetra Brik[®], que aprovecha íntegramente los tres componentes (papel, aluminio y polietileno) del envase multicapa para alimentos (núcleo PAR) y un núcleo elaborado con el método de reciclaje que utiliza únicamente el polietileno y aluminio del mismo envase (núcleo PAL).

Los núcleos son aglomerados de partículas del envase multicapa aglutinados por el polietileno presente en los mismos, por medio de su fusión en el proceso de conformado con un espesor similar a una hoja de aluminio. Con la innovación de implementar el material particulado PAR y PAL como núcleo de un material tipo sándwich al adherirle caras de aluminio se le da un nuevo ciclo de vida a los envases multicapa que en la actualidad se les considera como un desecho sin aprovechamiento práctico. Esta innovación puede evitar que los envases multicapa de desecho lleguen a los vertederos donde se da por finalizado el potencial que estos materiales pueden ofrecer.

El material compuesto propuesto en el presente trabajo, podría emplearse en el área de la construcción como elementos de revestimiento exterior (fachadas), paneles para puertas, recubrimientos de columnas, paredes falsas, aplicable a edificios industriales, comerciales y residencias. Por lo que se caracterizan las propiedades mecánicas y físicas que el material compuesto posee para su valoración y su validación en las futuras aplicaciones propuestas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad los polímeros tiene un amplia gama de aplicaciones, muestra de ello, es la alta demanda de estos productos, donde la mayoría de los objetos a nuestro alrededor están constituidos parcial o totalmente por alguno de ellos. Esto genera grandes problemas ambientales, debido a que son de difícil degradación al momento de desecharlos.

En México, alrededor de 300 toneladas de envases de jugos o lácteos son

desechadas diariamente^[1]. En Yucatán se recolectan en promedio 1,361 toneladas diarias de residuos sólidos generados en las viviendas, parques, jardines y edificios públicos, el cual representa el 2% de la recolección nacional.

Mérida es la segunda ciudad del país, cuyos habitantes generan la mayor cantidad de basura, las familias meridianas producen en promedio 1.6 kilogramos de desechos al día, en su mayoría residuos orgánicos, seguidos de productos de plásticos, entre otros^[2].

Un producto contaminante es el envase multicapa para alimentos, debido a que es un producto de un solo uso. Una vez consumido el producto (jugo, leche, etc.), el envase es desechado desperdiciando un material potencialmente reciclable y/o reutilizable, debido a que la mayoría de los envases desechados aún conservan todas sus propiedades intactas. El problema particular de este material radica en que es un laminado de 7 capas bien consolidado de tres materiales, a saber, papel, polietileno y aluminio, por lo tanto no se logra la separación en sus tres materiales originales con procesos simples de bajo consumo energético.

Implementando la presente propuesta, se transformarían los envases multicapa de desecho en nuevos productos con lo que se evitaría el consumo de materia prima virgen (con excepción de las caras de aluminio) y se reducirían los residuos sólidos que llegan a los vertederos y/o basureros municipales. De igual manera se disminuiría la explotación de los recursos no renovables, abriendo oportunidades para la creación de nuevas empresas dedicadas al reciclaje de los envases multicapa de desecho para la generación de nuevos productos con un nuevo ciclo de vida.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente los envases de Tetra Brik[®] una vez utilizados, en su gran mayoría van a parar directamente a los vertederos y/o basureros municipales. Esto es debido a que no hay un interés comercial importante por este material, generando un impacto negativo para el medio ambiente. No obstante un hecho importante es que los envases pueden ser reciclados para obtener materias primas reutilizables

por lo que se le podría dar una nueva aplicación a este material de desecho considerado inservible y contaminante.

El costo de elaboración de los envases es elevado, por ejemplo el aluminio utilizado en los envases, se extrae a partir de bauxita. Este proceso es muy costoso en términos de energía y aunque la celulosa con la cual se fabrica el papel procede en su mayoría de bosques gestionados de forma sostenible, la pasta de celulosa viaja desde Suecia y Finlandia, lo cual se traduce a miles y miles de kilómetros de derroche energético y contaminación. El precio ambiental es demasiado alto para un envase que tiene un ciclo de vida muy corto^[3].

Cada día el reciclaje adquiere una mayor importancia en el mundo, muchos residuos que se creían que no podían ser reciclados, ahora son reciclados o reutilizados en diversos productos gracias a investigaciones. Siendo uno de ellos los envases multicapa para alimentos tipo Tetra Brik[®]. Los tableros particulados que se obtienen de los envases multicapas pueden ser utilizados como materia prima para la fabricación de paredes falsas, techumbres, muebles, entre otros usos^[4].

Las estructuras tipo sándwich comerciales empleadas en la construcción se basan siempre de la misma configuración, dos superficies delgadas con gran resistencia mecánica (generalmente láminas de aluminio) que encierran dentro de sí un núcleo de un material ligero, el cual puede ser poliuretano, polietileno, compuestos etc. Estos paneles utilizan materiales vírgenes para su elaboración, donde se explotan los recursos no renovables, los cuales pueden ser sustituidos por otros provenientes del reciclaje de materiales.

Entre las diversas propiedades que pueden presentar los paneles sándwich se encuentran las de ser aislantes térmicos y acústicos, las cuales dependen del núcleo con el que estén elaborados. Este trabajo es de mucho interés, debido a que en México todavía no hay empresas que se dediquen a la elaboración de materiales compuestos de estructuras tipo sándwich con núcleo proveniente del reciclaje, como las planteadas en el presente proyecto.

HIPÓTESIS

La elaboración de un arreglo de material compuesto tipo sándwich con caras de aluminio y núcleo de un material particulado proveniente del reciclaje de envases multicapa, generará un material con atractivas propiedades mecánicas y físicas para aplicaciones estructurales.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar y comparar el comportamiento mecánico y térmico de un material compuesto tipo sándwich con caras de aluminio y un núcleo que se obtiene del reciclaje de envases multicapa de desecho tipo Tetra Brik[®] denominados panel PAR y PAL para aplicaciones estructurales.

Objetivos específicos

- Elaborar arreglos tipo sándwich encontrando las condiciones óptimas de procesamiento.
- Evaluar la transferencia de calor a través del núcleo PAR y PAL.
- Evaluar las propiedades de los paneles PAR y PAL con ensayos de impacto por caída de masa.
- Evaluar el daño que pueda presentarse en el panel durante la deformación plástica que involucra el proceso de rolado por medio del momento flector que inducen los rodillos al material.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

2.1.1. Residuos

El término residuo se emplea normalmente para designar a todos aquellos restos y sobrantes que quedan del consumo que el ser humano hace de manera cotidiana^[6].

El crecimiento industrial que se presentó en México durante la segunda mitad del siglo pasado, produjo una mayor demanda de materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población en aumento y con patrones de consumo cambiantes y cada vez más demandantes. A la par crecieron la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada^[6].

2.1.1.1 Residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias. Su manejo y control es competencia de las autoridades municipales^[6].

2.1.1.2. Generación de residuos sólidos urbanos

De acuerdo con los datos reportados por SEDESOL en 2011, se generaron alrededor de 41 millones de toneladas de RSU, lo que equivale a cerca de 112.5 mil toneladas de desechos diariamente. En la Figura 1 se observa la cantidad que le corresponde a los distintos tipos de RSU generados^[6].

La generación de RSU se ha incrementado notablemente en los últimos años; tan sólo entre 2003 y 2011 se incrementó un 25%, como resultado del crecimiento urbano principalmente, el desarrollo industrial y las nuevas costumbres.

La generación total de RSU en el país difiere de manera importante a nivel geográfico. En el 2011 la región centro contribuyó con el 51% de la generación

total en el país, seguida por la región Frontera Norte (16%) y el Distrito Federal (12%). Si se analiza el incremento de la generación de RSU por región, las regiones que más incrementaron su generación entre 1997 y 2011 fueron: Frontera Norte (207%), Centro (49%), Sur (44%) y el Distrito Federal (19%)^[6].



Figura 1. Residuos sólidos generados en México^[6].

2.1.1.3. Reciclaje

En la Figura 2 se puede observar que del volumen total de RSU reciclados en 2011, la mayor cantidad correspondió a los productos de papel y cartón con 835 mil toneladas, seguido por vidrio con 566 mil toneladas, metales con 550 mil toneladas, plásticos con 24 mil toneladas y textiles con 3 mil toneladas. Por otro lado, si se considera el volumen reciclado de cada tipo de RSU con respecto a su volumen producido, los sólidos que más se reciclaron en 2011 fueron los metales (39% del total de metales generados), el vidrio (23.5%) y el papel (14.7%). De los plásticos y textiles sólo se recicla alrededor del 0.5% de cada uno de ellos^[6].

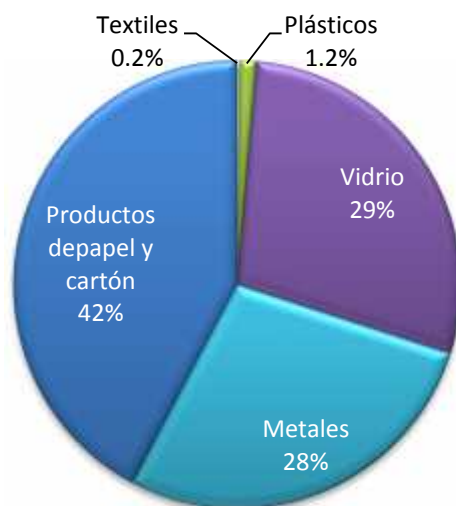


Figura 2. Composición de los residuos sólidos reciclados^[6].

2.1.2. Polímeros

Los polímeros también conocidos como plásticos, son moléculas muy grandes, con una masa molecular que puede alcanzar millones de Unidades de Masa Atómica (UMA). Se obtiene por la repetición de una o más unidades simples llamadas monómeros (moléculas no polares), unidas entre sí por medio de enlaces covalente, en un proceso denominado polimerización^[7]. En la Figura 3 se muestra la polimerización del polietileno, durante la síntesis del polietileno los monómeros forman cadenas macromoleculares y éstas pueden unirse entre sí por medio de fuerzas de van der Waals o puentes de hidrogeno.

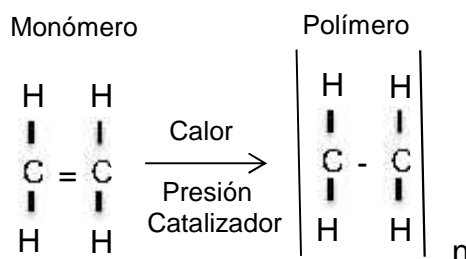


Figura 3. Reacción de polimerización del polietileno^[8, 9].

Clasificación de los polímeros según su origen:

- Naturales: caucho, polisacáridos (celulosa y almidón), proteínas, etc.
- Artificiales: poliolefinas, fibras textiles sintéticas, poliuretano, baquelita, etc.

Clasificación de los polímeros por su comportamiento ante el calor:

- Termoestables. Su estructura no se ve afectada por la temperatura debido a que en su estructura presenta una red entrecruzada por enlaces covalentes^[10].
- Termoplásticos. Al contrario de las resinas termoestables, los termoplásticos no tienen enlaces cruzados de los cuales obtienen su resistencia y rigidez de las propiedades inherentes a las unidades monoméricas y su peso molecular elevado. Esto asegura que en los termoplásticos amorfos haya una alta concentración de entramados moleculares que actúan como enlaces cruzados y que en los materiales cristalinos haya un alto grado de orientación y ordenación molecular. En los materiales amorfos el calentamiento conduce al desentramado y el cambio de sólido rígido a líquido viscoso. En los materiales cristalinos el calentamiento da como resultado la fusión de la fase cristalina para dar un líquido amorfo y viscoso^[11].

La longitud de la cadena del polímero se determina por el número de unidades repetitivas que se encuentran en la cadena. Esto se llama grado de polimerización, y su peso molecular viene dado por el peso de la unidad repetitiva multiplicado por su grado de polimerización^[8]. Por ejemplo, en el caso del polietileno, el grado de polimerización medio varía aproximadamente entre 3,500 y 25,000. Teniendo en cuenta que el peso de la unidad repetitiva es de 28 g/mol, la masa molecular media para el polietileno está comprendida entre 100,000 y 700,000 g/mol^[9].

2.1.2.1 Polietileno

El polietileno (PE) es un polímero termoplástico perteneciente a la familia de las poliolefinas, el cual es un material semicristalino, de color blanquecino y

translucido. El PE es un polímero de cadena repetitiva de etileno $(CH_2)_n$ y se caracteriza por tener una molécula compuesta únicamente de átomos de carbono e hidrógeno. Posee propiedades químicas y mecánicas sobresalientes, destacándose su lubricidad, resistencia al impacto y abrasión, y por ser químicamente inerte. La Figura 4 muestra la configuración química del monómero del PE^[12, 13].

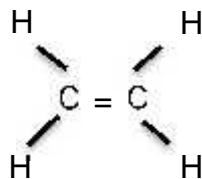


Figura 4. Monómero de etileno^[12, 13].

Los polímeros basados en PE, independientemente de su proceso de polimerización, se emplean en gran número de aplicaciones industriales por sus excepcionales propiedades y bajo precio en el mercado. Sin embargo, algunas limitaciones del PE son su baja resistencia a la radiación ultra violeta y su alta expansión térmica, por mencionar algunas.

El principal problema asociado a su uso de las poliolefinas, es que son sustratos que poseen baja energía superficial, lo que dificulta su adhesión con otros materiales de igual o distinta naturaleza (polares y no polares). Por lo tanto se debe recurrir a modificaciones y/o tratamientos superficiales para obtener buenas uniones adhesivas^[14].

El objetivo de los tratamientos y/o modificaciones superficiales es el incremento de la afinidad entre la superficie de los adherentes y la superficie de los adhesivos^[14].

2.1.2.2. Densidad

La densidad del PE es una medida aproximada de cristalinidad y, por tanto, de las propiedades físicas y ópticas. La rigidez, resistencia a la tensión, dureza y punto de reblandecimiento disminuyen al disminuir la densidad, mientras que la resistencia al impacto, la resistencia a la flexión y la resistencia a la rotura

aumentan al incrementar la densidad. La densidad del PE depende de la morfología de sus cadenas macromoleculares^[14].

2.1.2.2.1. Clasificación del polietileno de acuerdo a su densidad

La densidad del PE puede indicar el tipo de estructura que posee el polímero. De manera general y de acuerdo a su densidad, el PE se puede clasificar en dos diferentes grupos, en PE de alta densidad y PE de baja densidad^[14].

El PE de alta densidad es un polímero con estructura lineal de muy pocas ramificaciones como se aprecia en la Figura 5. Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas utilizando catalizadores Ziegler-Natta o proceso Phillips, aunque existe un tercer proceso que utiliza catalizadores metallocenos para obtener PE de ultra alto peso molecular (PEUAPM o sus siglas en inglés UHMWPE). Es un polímero con densidad comprendida entre 0.941 – 0.954 gr/cm³ es incoloro, inodoro, no tóxico y resistente tanto a esfuerzos como a agentes químicos, tiene una temperatura de fusión de 130 °C y una temperatura de transición vítrea de -90 °C^[8].

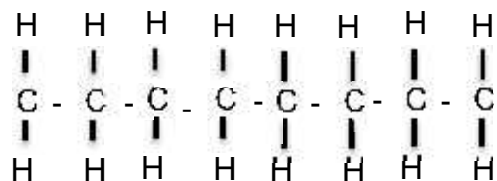


Figura 5. Polietileno lineal^[8].

En la Figura 6 se observa la morfología del PE de baja densidad que tiene cadenas ramificadas^[8]. El PE de baja densidad se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones por el mecanismo de radicales libres. Contiene sustituyentes alquilo, o pequeñas ramificaciones en la estructura de la cadena, las cuales se producen durante el proceso de síntesis. Es un polímero con una densidad comprendida entre 0.910 y 0.925 g/cm³; es incoloro, inodoro y no tóxico. Este PE tiene una temperatura de flujo entre 106 y 116 °C y una temperatura de transición vítrea (T_g) de -120 °C^[14-16].

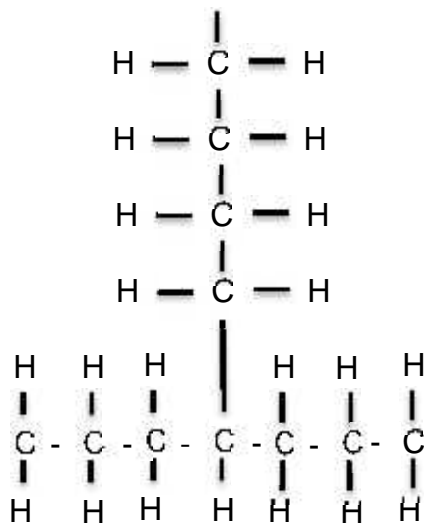


Figura 6. Polietileno ramificado^[8].

El PE de baja densidad puede poseer cadenas lineales, que se obtienen incorporando suficiente cantidad de comonómeros (alfa olefinas) para proporcionar polímeros con densidades en el rango de 0.910-0.940 g/cm³. El 1-buteno es el comonómero más empleado, aunque en los casos en que se requieren mejores propiedades físicas y ópticas, se emplean como comonómeros el 1-hexano, el 1-octeno o el 4-metil-1-penteno. Las condiciones de síntesis, así como el equipo necesario, son muy similares a las empleadas para el polietileno de alta densidad.

Sin embargo la producción de copolímeros etileno/ -olefinas (tales como 1-octeno, 1-hexeno) mediante catálisis Ziegler-Natta es difícil, debido a la mayor reactividad de la polimerización del etileno respecto a la -olefinas. El PE resultante posee una distribución de pesos moleculares muy ancha^[14-16]. La Tabla 1 muestra el comparativo de las propiedades del PE de alta y baja densidad^[14-16].

Tabla 1. Propiedades del polietileno^[15, 16].

Propiedades	Unidad	PE de alta densidad	PE de baja densidad
Peso molecular	g/mol	200,000-400,000	100,000-300,000
Resistencia a la tensión	MPa	21	38
Conductividad térmica a 23 °C	W/m ⁻¹ K ⁻¹	0.52	0.45
Módulo de Young	MPa	1000	250
Temperatura de transición vítrea	°C	-90	-120
Temperatura de fusión	°C	130-140	105-115

2.1.2.3. Índice de fluidez

El índice de fluidez es una medida aproximada del peso molecular medio y de la viscosidad del polímero fundido. Por lo tanto es un parámetro que indica la facilidad de un polímero en fundido para fluir. Un polímero termoplástico en estado fundido puede ser utilizado como adhesivo. El adhesivo de fusión en caliente (HMA, del inglés Hot-Melt Adhesive), es también conocido como pegamento caliente^[14] y una de las propiedades más importantes es la viscosidad del polímero fundido, debido a que influye en la propagación del adhesivo aplicado y la humectación de las superficies, donde a mayor temperatura menor viscosidad.

2.1.2.3.1. Polímeros como adhesivos

Los adhesivos de fusión en caliente se basan generalmente en uno o más materiales de base, con varios aditivos. La composición suele ser formulada para tener la temperatura de transición vítrea (inicio de la fragilidad) por debajo de la temperatura de servicio y una temperatura de fusión por encima de la temperatura de servicio^[14].

Dentro del grupo de poliolefinas se utiliza mayormente el PE de baja densidad, aunque es importante mencionar que son considerados de bajo rendimiento, debido a la dificultad de adhesión. Tienen muy buena barrera contra la humedad, resistencia química frente a los disolventes polares y las soluciones de ácidos, bases y alcoholes. Las poliolefinas tienen baja energía de superficie y proporcionan un buen mojado en la mayoría de metales y polímeros^[14].

El PE se emplea habitualmente solo o con una pequeña cantidad de adherentes (por lo general, hidrocarburos) y ceras (parafinas o ceras microcristalinas) para reducir el costo. El peso molecular del polímero debe ser bajo para proporcionar un mejor rendimiento a baja temperatura y una mayor flexibilidad^[14].

2.1.2.4. Polietileno Modificado

La necesidad de mejorar la compatibilidad de poliolefinas con otros polímeros polares, se ha convertido en tema de interés, especialmente en áreas como recubrimientos, mezclas y en materiales compuestos, en donde se busca mejorar

las propiedades adhesivas de las poliolefinas. En las últimas décadas se han generado investigaciones para funcionalizar poliolefinas usando anhídrido maleico.

El anhídrido maleico es el monómero más utilizado, debido a que es un poderoso receptor de electrones. La reacción de funcionalización se lleva a cabo por radicales libres usando un peróxido como iniciador, por su baja volatilidad, buena solubilidad y compatibilidad con las poliolefinas como se ejemplifica en la Figura 7. Las altas temperaturas generan radicales libres por la descomposición térmica del iniciador generándose así la abstracción de átomos de hidrógeno de la cadena del polímero y la adición del monómero insaturado^[17].

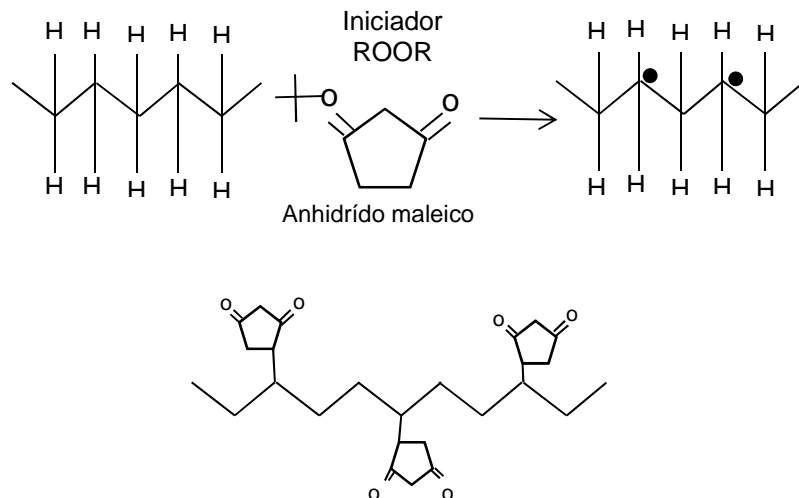


Figura 7. Representación de la funcionalización del PE con anhídrido maleico como monómero y peróxido como iniciador^[17].

El anillo del anhídrido maleico se abre con el incremento de la temperatura durante el proceso de adhesión y se crean grupos OH que interaccionan formando enlaces con los OH superficiales de los sustratos a adherir, ver Figura 8^[18]. Sin embargo la teoría de adhesión señala que ésta puede ser atribuida a cinco mecanismos principales que tienen lugar en la interfase; adsorción y mojado, interdifusión, atracción electrostática, enlace químico y anclaje mecánico. Las poliolefinas injertadas con anhídrido maleico, tienen una adherencia al acero tan

alta que supera la cohesión del propio polímero^[19].

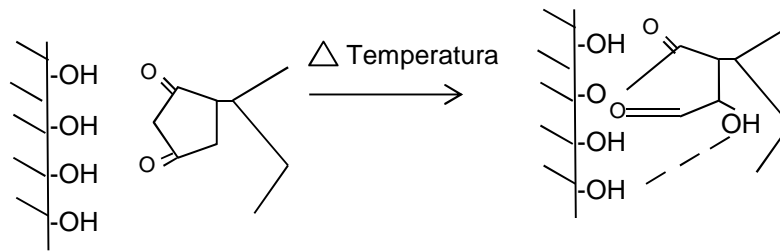


Figura 8. Esquema de acoplamiento de grupos OH con el anhídrido maleico^[18].

2.1.3.1. Reciclaje de plásticos

Las distintas formas de reciclaje con la clasificación más aceptada de los procesos que se llevan a cabo para reciclar los plásticos se dividen en cuatro categorías^[20]:

- Reciclaje primario o re-extrusión
- Reciclaje secundario o mecánico
- Reciclaje terciario o químico
- Reciclaje cuaternario o valorización energética^[20]

2.1.3.2. Reciclaje primario o re-extrusión

Este tipo de reciclaje también se conoce como reciclaje in situ, de ciclo cerrado o re-procesamiento. Se realiza al reintroducir los residuos, recortes y rebabas (de origen post-industrial), que se generan durante la producción, al proceso de extrusión^[20].

2.1.3.3. Reciclaje secundario o mecánico

En esta categoría se agrupan todos los procesos físicos de reciclaje, es decir, aquellos en los que no se modifica la estructura química o la composición de los plásticos. Pueden realizarse a partir de residuos post-industriales o post-consumo, que mediante la fusión del termoplástico son transformados nuevamente en pellets, perfiles o se mezclan con residuos de madera para obtener madera plástica^[20]. Aunque existen variaciones en los procesos, estos generalmente incluyen procesos de corte o molienda, limpieza, extrusión, enfriamiento y

almacenaje hasta su posterior comercialización.

En el caso de los plásticos de ingeniería, los termofijos y elastómeros, el reciclaje mecánico se enfoca en procesos de reducción de tamaño a base de cuchillas de alta precisión, métodos criogénicos o molinos de alta eficiencia^[21]. Las partículas obtenidas se usan como carga en materiales compuestos.

2.1.3.4. Reciclaje terciario o químico

A diferencia de lo que ocurre en los procesos físicos, en los químicos los plásticos cambian su estructura y forman nuevas moléculas, que pueden ser similares o diferentes a los monómeros que les dieron origen. Estos nuevos compuestos pueden utilizarse como materias primas para la industria química - para fabricar plásticos u otro tipo de productos o como combustibles^[21]. Sus mayores ventajas son la posibilidad de tratar plásticos contaminados y mezclados, sin necesidad de un pretratamiento complejo, así como la posibilidad de obtener productos de alto valor agregado. Entre las desventajas se encuentran el alto requerimiento energético^[22], la necesidad de adquirir un equipo costoso que requiere mantenimiento, el cuidado que debe mantenerse para no introducir plásticos clorados (como el PVC) que puedan dar origen a productos contaminantes y la dificultad de prever con exactitud las características de los productos que se obtendrán. Esto ha provocado que, a pesar de que existen diferentes plantas que aplican este proceso en el mundo, no se haya generalizado su uso^[23].

2.1.3.5. Reciclaje cuaternario o recuperación de energía

Este proceso, recupera de forma directa la capacidad calorífica de los residuos plásticos. La estructura principal de los polímeros, especialmente en el caso de las poliolefinas, están compuestos principalmente por carbono e hidrógeno. Estos liberan mucha energía durante el proceso de combustión^[21].

El calor que se libera durante la combustión de los plásticos se puede transformar en energía mecánica, eléctrica o cualquier proceso que requiera calor. El proceso permite reducir su volumen hasta en un 99%, lo que disminuye los

requerimientos de rellenos sanitarios. Durante el mismo se destruyen compuestos como los agentes espumantes, pero al mismo tiempo se genera CO₂ que contribuye al calentamiento global.

En 2009 se estimaba que en Europa se reciclaba el 22.5% del plástico post-consumo, del cual el 31.5% del mismo se usaba en valorización energética, 4% en reciclaje químico y el resto en reciclaje mecánico^[24].

2.1.4. Envases multicapa

El uso de la marca Tetra Pak[®] está íntimamente relacionada con el producto “estrella” de esta empresa, el Tetra Brik[®] donde cada producto tiene un nombre característico según su forma. Sin embargo, generalmente se identifica a estos envases con el nombre de la empresa.

La empresa Tetra Pak[®] comenzó en 1951 en Suecia con un solo producto, el envase de cartón de forma de tetraedro, conocido como “Tetra Pak estándar”. El siguiente paso fue el desarrollo del sistema de envasado aséptico en cartón. La compañía se amplió espectacularmente tras la introducción en 1969 del envase Tetra Brik[®] (siete capas protectoras) revolucionando el sistema de envasado aséptico que permite que los líquidos sean sellados herméticamente en cajas de cartón. Entre 1974 y 1980, esta invención tuvo un gran impacto en Europa y Japón^[25].

Tetra Brik[®] Aseptic es el envase de cartón para alimentos líquidos más vendido de la historia. Cuando se introdujo en el mercado, revolucionó la industria del envasado no sólo por su forma, la más eficiente para transportar y almacenar, sino porque fue el primer envase que permitió distribuir jugo y leche sin necesidad de refrigeración ni conservadores, manteniendo todas sus propiedades nutritivas.

En la actualidad México es el cuarto mercado más importante nivel mundial para la empresa Tetra Pak[®] en términos de volumen por litro y por número de envases México se encuentra entre el quinto y sexto lugar. Es uno de los países que más crecen dentro del "top ten" sobre todo frente a mercados maduros. La planta de la empresa Tetra Pak[®] ubicada en Querétaro se ha ampliado en los

últimos ocho años, al reportar una capacidad de ocho mil millones de envases al año^[26].

El proceso industrial para la fabricación de los envases consta de tres etapas:

En la primera se imprime el papel kraft, soporte físico del diseño gráfico de las empresas envasadoras clientes. La impresión utilizada es la flexografía, técnica que aplica la tinta líquida de base acuosa desde un cliché flexible a la superficie externa del papel. Actualmente es de los más importantes en la industria del envase y el embalaje, suele utilizarse para envases flexibles^[27].

La segunda etapa, denominada de laminación, consiste en la aplicación de finas capas de PE y aluminio mediante una técnica de extrusión en film plano y el calandrado de las capas sobre el papel impreso, formando un material multicapa que asegura la estanqueidad de los envases, tanto a líquidos como a gases y radiaciones^[27].

La etapa final, corte, subdivide las grandes bobinas de material de envase en rollos de dimensiones inferiores, que son enviados a las empresas para elaborar sus envases^[27].

Los envases de Tetra Brik[®] están conformados por 7 capas que evitan el contacto con el medio externo como se esquematiza en la Figura 9, para conservar los productos alimenticios.

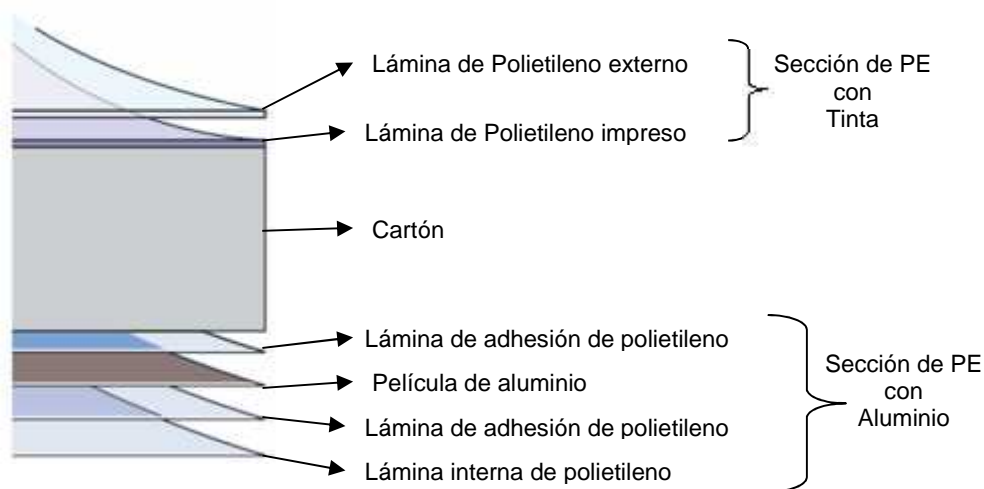


Figura 9. Composición del envase de Tetra Brik[®]^[28].

Las siete capas protectoras y su función en el envase son:

- Primera capa de PE: tienen la función de proteger el envase de la humedad exterior.
- Segunda capa de PE: ofrece adherencia entre la capa externa de PE y el papel.
- Tercera capa de papel: Brinda resistencia y estabilidad.
- Cuarta capa de PE: ofrece adherencia fijando la capa de cartón y el aluminio.
- Quinta capa de aluminio: evita la entrada de oxígeno, luz y pérdida de aromas.
- Sexta capa de PE: ofrece adherencia fijando la capa de aluminio y la capa interna de PE del envase.
- Séptima capa de PE: garantiza por completo la protección del alimento ^[28].

Las películas de adhesivo de PE son adhesivos de fusión en caliente. Estas películas tienen un costo más elevado que las películas protectoras de PE presente en el envase. Las películas de adhesivo se utilizan para mejorar la mala adhesión que ofrecen las poliolefinas por si solas.

En la Figura 10, se puede observar la sección transversal de un envase multicapa vista desde un microscopio electrónico de barrido, en donde se aprecian 5 de las siete capas de los tres materiales que conforman el envase; donde la adherencia de las capas es por compatibilidad física (anclaje mecánico)^[29].

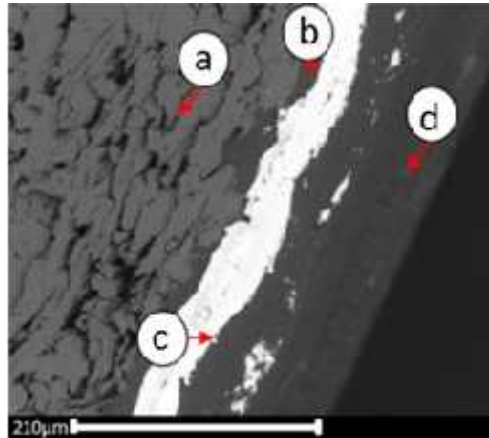


Figura 10. Sección transversal de los envases multicapa. a) papel, b) PE de adhesivo del papel con el aluminio, c) hoja de aluminio, d) se observa las dos películas internas de PE^[29].

Durante el proceso de fabricación de los envases, el PE se encuentra en un estado líquido viscoso a una temperatura de 310 °C. Este material embebe las fibras de la superficie del papel. Cuando el PE se enfría adquiere un estado sólido, encapsulando las fibras lo que da como resultado un anclaje mecánico entre el papel y el PE^[29].

2.1.4.1. Reciclaje de envases multicapa tipo Tetra Brik®

El Tectán es un tablero de material aglomerado que utiliza como materia prima para su fabricación los envases de Tetra Pak® por medio de la molienda de los mismos. El Tectán se está usando en países de Europa y algunos países Sudamericanos (como Chile) para sustituir la madera en la fabricación de diversos artículos, como muebles, escritorios etc.

Los países asiáticos producen el equivalente del Tectán, nombrado como CHIPTEC. China cuenta con 3 fábricas de CHIPTEC y la Agencia China de Protección Ambiental desde 1997 reconoce al CHIPTEC como "una de las tecnologías recomendables a escala nacional, para la protección del medio ambiente"^[30]. En Chile se utilizó el Tectán en el programa "Un Techo para Chile" del Hogar de Cristo^[30].

En San Martín de las pirámides México existe una empresa dedicada al reciclaje de envases multicapa post-consumo, tipo Tetra Pak® llamada Verdek®,

que recupera el papel del envase multicapa. El papel recuperado de los envases se utiliza para la fabricación de diversos productos de papel y cartón. El PE con aluminio que queda después de la separación de la celulosa es destinado para la fabricación de láminas denominadas "láminas de Poli-Aluminio" las cuales son ideales para la industria de la construcción. La Figura 11 presenta una teja elaborada con Poli-Aluminio^[31-33]. El 65% de la materia prima que se procesa se obtiene de empresas dedicadas a reciclar residuos sólidos y el 35% de recolectores (pepenadores)^[31-33].



Figura 11. Aspecto de la lámina fabricada con Poli-Aluminio^[31].

2.1.4.2 Elaboración de las placas de Tetra Brik® reciclado.

Para la elaboración de estos tableros según Pool^[34], los envases multicapa se trituran para utilizar sus tres componentes (polietileno, aluminio y papel). Se utiliza una prensa con placas de calentamiento para conformar al material por termo compresión ejerciendo una presión de 1.13 MPa, a una temperatura de 150 °C, durante un tiempo de 10 minutos. Posteriormente a este tiempo se realiza un enfriado rápido^[34].

Con la finalidad de mejorar las propiedades, se procede a realizar una modificación agregando polietileno de alta densidad que se obtiene del reciclado de envases, con la finalidad de lograr una mejor transferencia de esfuerzos y proporcionarle un mayor carácter hidrofóbico al tablero ^[34].

Los tableros elaborados a partir de los envases multicapa poseen un acabado

que los hacen atractivos a la vista como se aprecia en la Figura 12, debido a que tienen una superficie lisa y una combinación de matices de la mezcla de los colores de los envases utilizados para la elaboración. Además, tiene la característica de ser fácil de maquinar^[34].



Figura 12. *Placa elaborada con envases multicapa^[34].*

2.1.4.2. Elaboración de las placas de polialuminio

Para la elaboración del material denominado polialuminio, la celulosa es separada por medio del proceso de hidropulpeo, el cual consiste en sumergir los envases en un contenedor con agua y agitarlo, después de un cierto tiempo la celulosa comienza a separarse. El método de Farfán^[35] dice que para llevar a cabo el proceso de hidropulpeo los envases multicapa son trozados y lavados para eliminar residuos e impurezas que se encuentran adheridos en los envases multicapa de desecho. Posteriormente son introducidos al agitador mecánico, a razón de 5% de envases y 95% de agua en fracción peso, a temperatura ambiente. El control en la velocidad de agitación es muy importante; experimentalmente se encontró que la velocidad ideal es de 1500 r.p.m., ya que a velocidades más altas el material es destrozado por las aspas del agitador y por debajo de esta velocidad la celulosa no se separa del envase^[35].

2.1.5. Clasificación y definición de los materiales compuestos

En la ciencia de los materiales, un material compuesto es aquel que se forma por la unión de dos o más materiales. Esta combinación es utilizada con la finalidad de conseguir propiedades que no es posible obtener con materiales independientes. Estos materiales pueden seleccionarse para lograr una combinación de propiedades poco usuales de rigidez, resistencia, peso,

rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductibilidad térmica o eléctrica.

Es posible obtener casi cualquier material compuesto mediante la combinación entre metales, polímeros y materiales cerámicos. En muchos casos, se puede utilizar la regla de las mezclas para estimar las propiedades del compuesto [7].

Los materiales compuestos se han clasificado de muchas maneras, según las ideas y conceptos necesarios para identificarlos. La mayoría de los materiales que se encuentran en la naturaleza obtienen sus magníficas propiedades de una combinación de dos o más compontes que pueden distinguirse prontamente cuando se examinan con microscopios ópticos o electrónicos. Por ejemplo, muchos tejidos del cuerpo, que tienen una alta resistencia combinada con una enorme flexibilidad, están hechos de fibras resistentes tales como el colágeno, embebidas en una matriz menos rígida. La Tabla 2^[36] muestra la clasificación de los materiales compuestos^[37].

La mayor parte de los materiales de ingeniería son combinaciones de dos o más fases dispersas en escala microscópica para obtener propiedades óptimas^[37].

Tabla 2. Clasificación amplia de los materiales compuestos^[37].

	Ejemplos
Materiales naturales	Madera Hueso Bambú
Materiales microcompuestos	Músculos y otros tejidos Aleaciones metálicas: p. ej. Aceros Termoplásticos endurecidos: p. ej. Poliestireno de impacto ABS
Macrocomposites (productos ingenieriles)	Termoplásticos reforzados Acero galvanizado Vigas de hormigón armado Palas de helicópteros Esquíis

2.1.5.1. Materiales compuestos comparados con materiales convencionales

En los últimos años ha habido un rápido crecimiento en el uso de materiales compuestos y todo indica que esto continuará a este ritmo. El rápido crecimiento se ha alcanzado principalmente por el reemplazo de los materiales tradicionales, principalmente los metales. Esto sugiere que en algunos aspectos, los materiales compuestos tienen propiedades superiores^[7, 37].

Las ventajas de los materiales compuestos aparecen cuando se consideran el módulo de elasticidad por unidad de peso (módulo específico) y la resistencia por unidad de peso (resistencia específica). El mayor módulo específico y resistencia específica de los materiales compuestos significa que el peso de los componentes puede reducirse. Este es un gran factor de importancia en las piezas móviles, especialmente en piezas que conforman un medio de transporte donde las reducciones de peso da como resultado un mayor rendimiento y ahorro de energía^[7].

2.1.5.2. Interfase matriz refuerzo

La interfase es el efecto relacionado con la facilidad de desunión y desprendimiento de los materiales que constituyen al material compuesto durante la propagación de la rotura. La unión entre la matriz y el refuerzo depende de la ordenación atómica y de las propiedades químicas de la matriz de los polímeros, se deduce que la interfase es específica para cada sistema^[37].

La estructura y las propiedades de la interfase refuerzo-matriz juegan un papel principal en las propiedades física y mecánicas de los materiales compuestos.

En particular, las grandes diferencias entre las propiedades elásticas de la matriz y el refuerzo deben de estar comunicadas entre la interfase o, en otras palabras los esfuerzos que actúan sobre la matriz se transmiten a las fibras a través de la interfase^[37].

Una apreciación de las propiedades reales de la interfase es esencial para la comprensión de las propiedades de los materiales compuestos. Así por ejemplo, la

interfase es un factor dominante en las propiedades de tenacidad de rotura de los materiales compuestos y en su respuesta a los ambientes húmedos y corrosivos^[37].

2.1.5.3. Materiales compuestos y estructura sándwich

La necesidad del uso de los materiales compuestos ha aumentado en diversas industrias debido a que estos materiales tienen buenas propiedades mecánicas y son ligeros^[38].

Las estructuras tipo sándwich, se basan siempre de la misma configuración, dos superficies delgadas con gran resistencia mecánica que encierran dentro de sí un núcleo de un material típicamente ligero.

Los materiales comúnmente utilizados para las caras son laminados de compuestos fibroreforzados con matriz de polímeros (fibra continua, fibra corta, partículas, etc.) o láminas metálicas, mientras que los núcleos pueden ser metálicos o no metálicos, como espumas celulares de polímeros, madera o estructuras reticuladas. Para entender la forma de trabajo de un panel tipo sándwich es necesario diferenciar las formas de trabajo individual de la cara y del núcleo del sistema. Las caras soportan las cargas inducidas por la flexión y el núcleo soporta el esfuerzo cortante que actúa sobre el panel ^[39].

Una de estas estructuras más comunes tipo sándwich es el cartón corrugado para embalaje que se representa en la Figura 13, el cual consta de un núcleo de papel corrugado que se une en ambos lados a un cartón plano y grueso. Ni el núcleo de papel corrugado, ni las caras del papel de recubrimiento son rígidos, pero su combinación si lo es^[7].



Figura 13. Estructura sándwich de cartón corrugado ^[39].

2.1.5.3.1 Materiales compuestos de estructuras sándwich comerciales

El campo de aplicación de las estructuras tipo sándwich construidas con materiales compuestos es muy amplio en el sector de la construcción.

Pueden ser utilizadas en la fabricación de muros, y por medio de la creación de superficies lisas o curvadas, los paneles tipo sándwich pueden ser utilizados para revestir y/o aislar los muros de edificios, oficinas, fábricas, etc.^[40].

2.1.5.3.2. Aplicaciones de los paneles sándwich en la construcción

En el mercado se encuentran varias marcas comerciales de paneles sándwich entre ellas está el producto Reynobond[®], el cual es una creación de Alcoa architectural products. Es un elemento sándwich que consta de dos láminas de aluminio de 0.50 mm lacado al horno, resistentes a la corrosión y están unidos permanentemente por un proceso de fijación por fusión en ambos lados de un núcleo de un material termoplástico extruido. El resultado es un material plano y de gran ductilidad, con una excelente relación resistencia-peso, la cual es doble que la del acero, en la Figura 14 se muestra la composición del panel Reynobond[®].

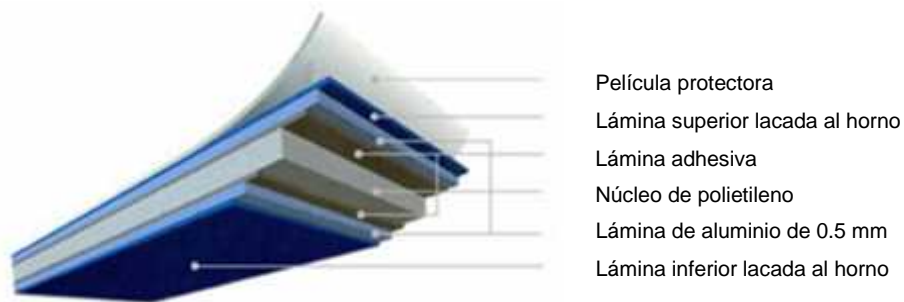


Figura 14. Panel sándwich Reynobond[®]^[41].

Este producto se comercializa con dos núcleos diferentes, uno de los núcleos es de polietileno (PE), en tanto que el otro es un material resistente al fuego (FR, por su nombre en inglés “Fire-Resistant”) que contiene resinas KELDAX de DuPont^[41].

Los paneles pueden procesarse rápidamente para adaptarse a las aplicaciones

de diseño interior y a las exigencias del diseño exterior, desde curvaturas dramáticas, hasta ángulos agudos y singulares de formas trapezoidales. En la Figura 15 se observa las fachadas de edificios revestidos con paneles sándwich de este tipo. El material ofrece flexibilidad, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión^[41].



Figura 15. Paneles sándwich en fachadas de edificios.

Los productos Alucobond[®], Alucoflex[®] y Alucomex (empresa mexicana) y Composite Noparc[®] tienen una configuración similar a la del panel Reynobond[®] de núcleo de polietileno y caras de aluminio con aplicaciones para la industria de la construcción como en fachadas, revestimiento de edificios, decoraciones de interiores/exteriores, paneles publicitarios etc.^[41].

2.1.6. Pruebas realizadas a estructuras tipo sándwich

Los compuestos tipo sándwich son ampliamente utilizados en la industria aeroespacial y en aplicaciones marinas donde haya necesidad de estructuras ligeras con una alta rigidez a la flexión^[42]. Las estructuras sándwich son conocidas por ser susceptibles a daños por impacto de objetos extraños. En muchas ocasiones dependiendo de la aplicación, los materiales compuestos estarán sometidos a impactos localizados y el daño que se produce en un material compuesto debido a un impacto es difícil de detectar por la geometría o naturaleza del material. Esto puede causar una considerable reducción de sus propiedades

mecánicas por lo que es necesario caracterizar, predecir y prevenir el daño del impacto sobre los diferentes materiales que constituyen la estructura^[39].

La mayoría de los estudios hasta la fecha se han centrado en la respuesta de las vigas tipo sándwich y paneles sujetos a choques a baja velocidad. El daño inducido puede que no sea muy evidente, pero sus efectos en la resistencia del material compuesto y la fiabilidad de la estructura, pueden disminuir al igual que la vida útil de la estructura^[43]. Varios modos de fallo han sido identificados y estudiados, tales como hendiduras y agrietamiento en el núcleo, pandeo en las caras, y delaminación entre la cara y el núcleo, etc.^[44, 45]. Los materiales compuestos tipo sándwiches reforzados con fibra típicamente responden mal a impactos transversales^[46].

2.1.6.1. Prueba de Impacto por caída de masa

Un impacto, choque o colisión es un proceso en el que dos cuerpos interaccionan en un intervalo de tiempo muy breve. En un impacto siempre se cumple el principio de conservación de la energía y la ley de conservación de la cantidad de movimiento. En el caso de choques elásticos, la energía cinética previa al choque se mantiene como tal después de ocurrir el impacto. Los choques elásticos son una idealización, en la realidad sólo se producen choques parcialmente elásticos: una parte de la energía se pierde en forma de calor o deformación y otra parte se mantiene como energía cinética. En el caso de choques inelásticos, toda la energía puesta en juego en el choque se transforma en calor o deformación y no se recupera con el movimiento de retroceso^[47, 48].

Según la ley de conservación de la cantidad de movimiento, en un sistema en el que no actúa ninguna fuerza, el momento lineal se conserva. La 2ª ley de Newton establece que la fuerza es la variación de momento lineal con respecto al tiempo. Si dicha fuerza es cero, el momento es necesariamente constante. Ésta es una ley general de la física y se cumple independientemente de que la colisión sea elástica o inelástica, bajo la restricción de que no actué ninguna fuerza externa al sistema^[47-51].

2.1.6.1.1. Ensayos de impacto a materiales compuestos estructura tipo sándwich

Se define resistencia al impacto como la energía que absorbe un material por unidad de área ante un impacto. La capacidad de absorber energía no depende sólo del material, sino también de su tamaño, forma y espesor. Un polímero termoplástico es más susceptible de producir fallo cuando es sometido a un prueba dinámica (p. ej. impacto) en comparación con las pruebas cuasiestáticas (p. ej. tensión) debido a sus propiedades viscoelásticas. Durante el tiempo en el cual ocurre el impacto el material no tiene la oportunidad de compensar el esfuerzo con el movimiento molecular, es decir, las cadenas macromoleculares del polímero no tienen el tiempo suficiente para orientarse, ni relajarse. Los dos ensayos de impacto más frecuentes son los de tipo péndulo y por caída de masa (caída libre)^[7, 52].

El principio básico del ensayo de impacto por caída de masa es someter a la muestra a un impacto de una masa conocida que se deja caer desde una altura determinada, las probetas tienen forma cuadrada o rectangular. La norma ASTM D7136/D7136M menciona que el instrumento de impacto consta básicamente de un soporte donde se coloca la probeta, el dardo de impacto (impactor) y un sistema de ejes guía graduados por donde se eleva el impactor hasta la altura deseada y cae por gravedad. En estos equipos la energía puede variarse de dos formas; variando la masa del impactor o variando la altura desde la cual se deja caer^[53, 54].

Para el cálculo de la velocidad^[53-55]:

$$V^2 = -2gh$$

Dónde:
V= Velocidad de impacto
g= Gravedad
h=Altura

(1)

Para el cálculo de la energía cinética^[53, 54]:

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$$

Dónde:

m= masa del impactor

v=velocidad

(2)

Es conveniente observar la superficie de fractura de las muestras, ya que pueden proporcionar información sobre qué tipo de ruptura se ha producido (dúctil o frágil).

En los ensayos instrumentados, se trabaja con un exceso de energía de impacto respecto a la que será absorbida por el material para encontrar el nivel de energía en el que fallara la muestra. Los equipos permiten determinar a su vez las curvas de Fuerza desplazamiento en donde el área bajo la curva proporciona información de la energía de impacto absorbida por el material^[56].

Las propiedades mecánicas de los polímeros dependen fundamentalmente de su composición, estructura y condiciones de procesado. Así mismo, existen otros factores que influyen en las propiedades y son principalmente el tiempo (velocidad de aplicación de carga) y la temperatura^[56].

En un estudio, se hicieron pruebas de impacto paneles sándwich con núcleo de polímero espumado de PVC y con caras de tejido de carbono con resina epóxica, y de paneles con núcleo de madera de balsa con caras de tejido de fibra de vidrio con viniléster. Estos paneles fueron sometidos a pruebas de impacto en donde la energía estuvo entre 8-108 J y las velocidades de impacto estuvieron en un rango de 1.5-5 m/s. La torre de impacto empleada se muestra en la Figura 16. Después del contacto inicial, se detuvo el carro manualmente para evitar impactos repetidos^[44].

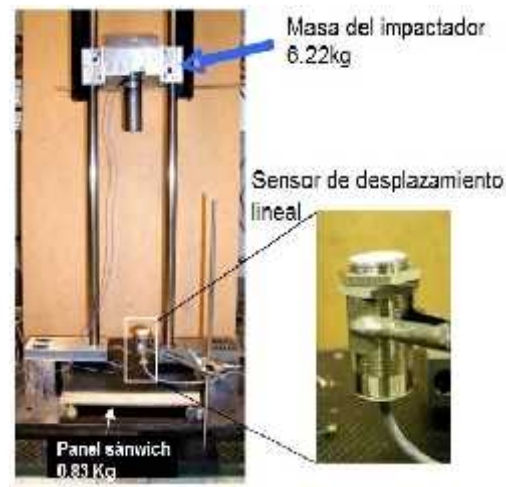


Figura 16. Montaje experimental para pruebas de impacto al panel sándwich^[44].

Los patrones de falla de las probetas bajo dicho impacto mostraron que estos dependen de la energía con la cual se realizó la prueba y de las propiedades del núcleo. La respuesta de los paneles sándwich se relacionó a 4 niveles de energía dependiendo del daño que presentó en su superficie:

- Impactos de baja energía, el material es sometido a una deformación elástica, no presenta daños permanentes.
- Impactos de energía media, se presenta la indentación permanente, pero sin falla en la cara del panel.
- Impactos de alta energía, causa delaminaciones o desunión de núcleo.
- Impactos de muy alta energía, pueden penetrar la cara del panel.

En otro estudio se comparó el comportamiento de dos paneles sándwich, uno con núcleo de policloruro de vinilo (PVC) y el otro núcleo de aluminio espumado. Ambos núcleos tenían caras de fibra de vidrio y vinil éster adheridas con un adhesivo de polipropileno. Los paneles se sometieron a pruebas de impacto para una comparación en el comportamiento de las configuraciones de las estructuras tipo sándwich^[56].

Los resultados que se obtuvieron se muestran en una gráfica típica del cambio en la energía potencial durante la prueba de impacto. Se observó que el material compuesto con núcleo de polímero espumado absorbe la energía de impacto

sufriendo menos daño en comparación con el núcleo de aluminio espumado (Figura 17)^[56].

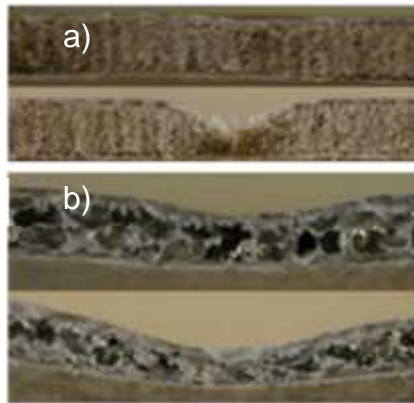


Figura 17. Paneles impactados a 5 y 25 J, a) material con núcleo de polímero espumado, b) material con núcleo de aluminio espumado^[56].

En otro estudio se investigó la respuesta dinámica de un material compuesto de fibra de vidrio tipo E con matriz de resina epóxica sometido a impactos por caída de masa, variando la velocidad del impactor entre 0.54-3.1 m/s^[36]. Los resultados se obtuvieron utilizando una ley de contacto de Hertz, para determinar la influencia de las velocidades del impactor en la respuesta de impacto en las placas laminadas. La ley de contacto utilizado en el análisis teórico se basa en la combinación de las soluciones dinámicas y estáticas en casos de impacto de dos cuerpos elásticos. Con el fin de determinar la rigidez de las placas de material compuesto, el sistema se representó por un modelo de masa y resorte. Se prestó especial atención durante la comparación de los resultados teóricos y experimentales.^[36]

Las muestras para las pruebas de impactos fueron circulares con un radio de 20 cm y fueron sujetadas al porta muestras a lo largo de su periferia. Cada muestra pesó 111 g y fueron moldeadas con técnica de vacío^[36].

Durante cada prueba, se eleva la masa con el impactador a una altura determinada, y cuando se deja caer el impacto se realiza en el centro de la muestra. La aceleración en función del tiempo se registra por medio de un acelerómetro que se encuentra montado en el carro móvil del impactador^[36].

Los valores registrados por el acelerómetro se utilizan para calcular la fuerza de contacto siguiendo la segunda ley de movimiento de Newton. A medida en que una muestra se somete a un impacto con el impactor depunta semiesférica rígida, la deflexión que se produce en el punto de contacto está dada por la diferencia entre el desplazamiento del impactador y la indentación del material^[36].

Las pruebas se realizaron a velocidades crecientes (0.54, 1.84 y 3.10 m/s) y con estas velocidades se obtienen la fuerza del impacto, como se observa en la **Figura 18**; la magnitud de las fuerzas de impacto son directamente proporcional a la velocidad^[36].

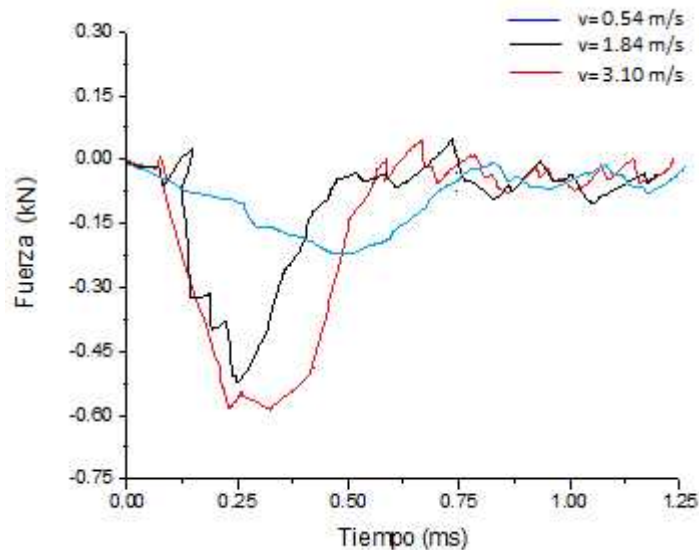


Figura 18. Fuerzas de impacto bajo diferentes velocidades^[36].

2.1.6.2. Transferencia de calor

La transferencia de calor es la ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre dos cuerpos, como resultado de una diferencia de temperaturas. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino trata de predecir la rapidez a la que se realizará este cambio bajo ciertas condiciones específicas.

El hecho de que un régimen de transferencia de calor sea el objetivo deseado de un análisis, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica^[57]. La termodinámica trata de sistemas en equilibrio y de los

cambios de un sistema en equilibrio hacia otro

Las reglas utilizadas experimentalmente como base del tema de transferencia de energía son muy simples y se pueden ampliar con facilidad para que abarquen diversas situaciones prácticas. La diferencia de temperatura en distintos puntos de un sistema genera los procesos de intercambio de calor, que pueden ser debido a tres mecanismos; conducción, convección y radiación.

2.1.6.2.1. Transferencia de calor por conducción

La experiencia ha demostrado que cuando existe un gradiente de temperatura en un cuerpo sólido, hay una transferencia de energía de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Decimos que la energía es transferida por conducción y que la rapidez de la transferencia de energía por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

Cuando se inserta la constante de proporcionalidad

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4)$$

Donde q es la rapidez de transferencia de calor y $\partial T / \partial x$ es el gradiente de temperatura en la dirección de flujo de calor. La constante positiva k se le llama conductividad térmica del material. El signo negativo (-) se inserta para satisfacer el segundo principio de la termodinámica, es decir, el calor fluye del cuerpo con mayor energía al de menor energía. La ecuación anterior se le llama ley de Fourier de la conducción de calor^[57].

Es importante observar que la ecuación es la igualdad que define la conductividad térmica y que en un sistema de unidades típico, el flujo de calor es expresado en watts. La conductividad térmica k tiene unidades de watts por unidad cuadrada (en sistema métrico es $w / m^2 \cdot ^\circ C$).

Obsérvese que incluye una rapidez de calor y que el valor numérico de la

conductividad térmica indica que tan rápido fluirá el calor en un material dado.

La norma estándar ASTM C518 nos indica los parámetros para un método de prueba de transmisión térmica en estado estacionario a través especímenes planos utilizando un dispositivo de flujo de calor. El método puede ser utilizado en condiciones ambientales de 10 -40 °C de temperatura y es ampliamente utilizado debido a que aplica para toda muestra que sea plana con espesores de hasta 25 cm.

Este método puede ser utilizado para caracterizar la propiedad del material, en condiciones de laboratorio las cuales puede ser o no representativo de las condiciones reales en las cuales se utiliza el material. Para satisfacer los requerimientos de este método de prueba, la resistencia térmica del espécimen deberá ser mayor a $0.10 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$, con el fin de poder observar una diferencia clara de temperatura cuando el sistema alcance el estado estacionario.

La base matemática del proceso de conducción es la ley de "Fourier", cuyo enunciado, para sistemas unidimensionales de tamaño finito, es el siguiente:

Sí un material en forma de lámina plana, tal y como aparece en la Figura 19, se encuentra en contacto con temperaturas diferentes en cada una de sus caras T_c (caliente) y T_f (frío) y ha alcanzado el régimen estacionario, la cantidad de calor por unidad de tiempo y superficie que atraviesa la placa será proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a su espesor, y dicha constante de proporcionalidad se denomina conductividad térmica, k , del material^[57].

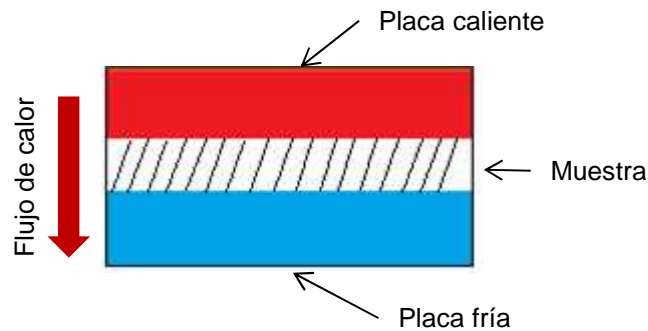


Figura 19. Método para la determinación de la conductividad térmica^[57].

La propiedad asociada a la capacidad de transmisión del calor en los materiales, es denominada “conductividad térmica”. Esta se calcula a partir de una fórmula definida y es intrínseca para cada material. Debe tenerse en cuenta que la conductividad térmica puede depender de las condiciones del ensayo, espesor de la muestra y diferencias de temperatura^[57].

Asimismo el contenido de humedad de la muestra analizada tiene una importante influencia sobre la transmisión de calor, afectando el valor de la propiedad que se pretende determinar. Por ello, siendo este análisis algo complejo, se deben ensayar probetas secas, de acuerdo a procedimientos normalizados (ASTM C518), teniendo en cuenta la influencia de diversos factores sobre las propiedades de transmisión del calor, como por ejemplo la composición del material, homogeneidad de la muestra, método y condiciones de elaboración^[57].

En un estudio se determinó el aislamiento térmico de las estructura tipo sándwich de madera contra-chapada para paredes y suelos (PSW). Las propiedades se centraron en la conductividad térmica (k) y la resistencia térmica (R). Los valores de k para paneles PSW con densidades de 340 kg/m^3 (PSW350) y 410 kg/m^3 (PSW400) fueron 0.070 y 0.077 W/mK , respectivamente. Los valores de R para PSW350 y PSW400 fueron de $1,4$ y $1,2 \text{ m}^2 \text{ K/W}$. Se concluyó que la conductividad térmica incrementa conforme incrementa la densidad del material^[58].

En otro estudio se evaluó la conductividad térmica en paneles sándwich de baja densidad que consta de un núcleo de madera de palma recubierto con caras de

caucho. Los resultados mostraron que a mayor densidad de núcleo, los valores de conductividad térmica aumentaron como lo muestra la Figura 20. La conductividad térmica de los paneles sándwich (0.06-0.11 W/mK) se incrementó linealmente con la densidad de la placa. Los paneles con las fibras del núcleo orientadas perpendicular a la superficie del panel presentaron mayor conductividad térmica que aquellos con la fibra del núcleo orientada paralela a la superficie del panel.

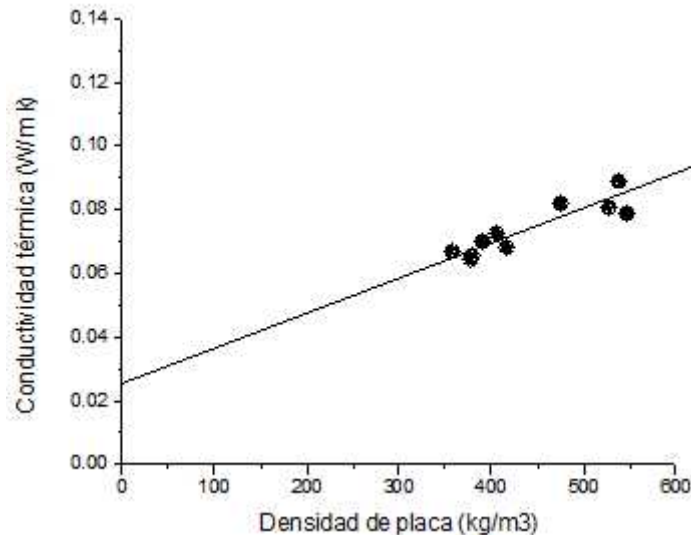


Figura 20;Error! No se encuentra el origen de la referencia.. *Comportamiento térmico de acuerdo a la densidad del núcleo*^[59].

2.1.6.3. Flexión tres puntos

La prueba de flexión en un material es una prueba cuasiestática que determina el módulo de flexión, el esfuerzo de flexión y la deformación por flexión en una muestra de material^[60].

Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie de la cara inferior. En la zona central de esta cara suele iniciar la fractura. Debido a que se concentra el mayor esfuerzo, y siendo la resistencia a la flexión o módulo de ruptura la que describe la resistencia del material^[60].

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (5)$$

Dónde F es la carga a la fractura (N), L es la distancia entre puntos de apoyo (m), w es el ancho de la probeta (m), y h es su altura (m). La Figura 21 muestra el esquema de flexión a tres puntos. Existe un eje en el cual la sección transversal no sufre deformación alguna y se denomina eje neutro, el cual se localiza a un medio de la altura (h), en la parte superior del eje neutro se generan esfuerzos de compresión y en la parte inferior se generan esfuerzos de tensión. En las superficies de las muestras se generan los máximos esfuerzos de tensión y compresión, mientras más cercano al eje neutro los esfuerzos van disminuyendo ya que el eje neutro no se encuentra sometido a esfuerzos^[60].

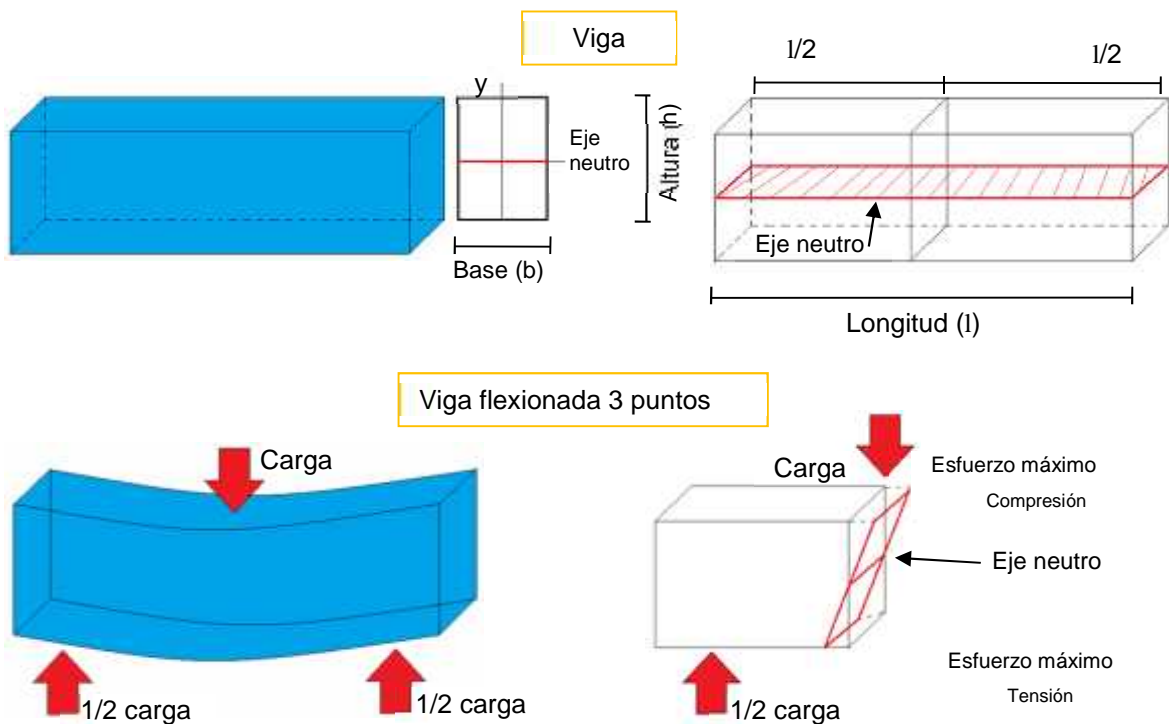


Figura 21. Material sometido a flexión en tres puntos.

Los resultados de esta prueba son similares a las curvas esfuerzo-deformación; sin embargo, el esfuerzo se traza en función de deflexiones, en vez de en función de deformaciones como se presentan en las pruebas de tracción y compresión. A

través de la prueba de flexión podemos obtener información de su módulo de elasticidad o módulo de flexión que se determina en la región elástica. Esto nos indica si el material es rígido o flexible y se calcula con la siguiente ecuación^[60]:

$$\text{Módulo de flexión} = \frac{L^3 F}{4wh^3u} \quad (6)$$

Dónde u es la deflexión (m) de la viga al aplicare un fuerza F . Las propiedades en las pruebas de flexión dependen de la estructura interna que posean los materiales^[60].

En un estudio en donde se ensayaron a flexión de tres puntos muestras de tableros elaborados con el reciclaje de envases multicapa con adición de polietileno de alta densidad del 45% en fracción volumen, se encontró que las muestras presentan una resistencia a la flexión de 26.7 MPa, mientras que el aglomerado comercial que más se le aproxima presenta una resistencia a la flexión de 20 MPa^[61].

En estudios con un material compuesto de similar construcción, con caras de aluminio y núcleo obtenido del reciclaje de envases multicapa sin celulosa, que sometieron a flexión tan sólo el núcleo elaborado de polialuminio (núcleo PAL denominado en este proyecto), obtuvieron una resistencia a la flexión de 12.57 ± 1 MPa. Al ensayar a flexión el material compuesto tipo sándwich se obtuvo una resistencia a la flexión de 58 ± 2.8 MPa con la característica (que menciona el autor) de sólo fracturarse la cara de aluminio sometida a tensión manteniendo intacto el núcleo de polialuminio^[62].

También se publicó un artículo^[63] en el cual se estudió un el comportamiento físico-mecánico del polialuminio reciclado de empaques Tetra Pak® de origen post consumo reforzado con fibras de fique, en el cual se enfatizó el reforzamiento del material con fibras cortas en disposición aleatoria. Para observar el efecto producido por la incorporación de las fibras en las propiedades físico-mecánicas, se fabricaron tableros por medio del proceso de moldeo en prensa de platos calientes, con diferentes cantidades en fracción volumen de fibra de fique. Se realizó la comparación con las propiedades obtenidas con las de polialuminio sin

refuerzo. Siguiendo la metodología, los mejores resultados a flexión alcanzados se presentaron con una cantidad de 30% de fique, el cual presentó una resistencia a la flexión de 33 MPa aproximadamente y el material sin refuerzo presentó una resistencia a la flexión de 10 MPa aproximadamente. También se pudo observar, que al reforzar el polialuminio con fibra de fique, incrementó la absorción del agua del compuesto, limitando de esta forma, las aplicaciones del material bajo condiciones ambientales de humedad. El autor recomendó implementar técnicas que impidan la absorción de agua del material^[63].

2.1.6.3.1. Rolado de materiales

Durante el proceso de manufactura de los materiales es muy común cambiar la forma y la geometría del material. El proceso de rolado es un proceso de conformado por el cual un material en estado sólido, cambia su forma mediante la aplicación de cargas que producen esfuerzos mayores que el límite de fluencia pero menores que el límite de rotura (zona plástica). En la Figura 22 se puede observar que en la gráfica esfuerzo-deformación, la zona plástica del aluminio en tensión (en el punto "ab"), ha rebasado del límite elástico del material; el material al estar en esta zona ya no regresa a su longitud inicial (forma inicial) cuando se libera la carga^[7].

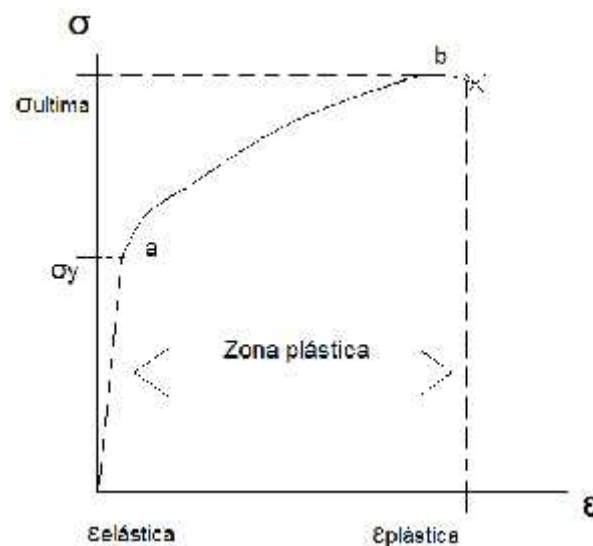


Figura 22. Grafica esfuerzo ()-deformación () para el aluminio en tensión^[7].

Durante el proceso de rolado el material se curva para obtener piezas cilíndricas. La máquina de rolado está formada por tres rodillos del mismo diámetro; dos se mantienen en posición fija y el tercero se puede desplazar axialmente para ajustar el radio de la curvatura, como lo ejemplifica la Figura 23^[64].

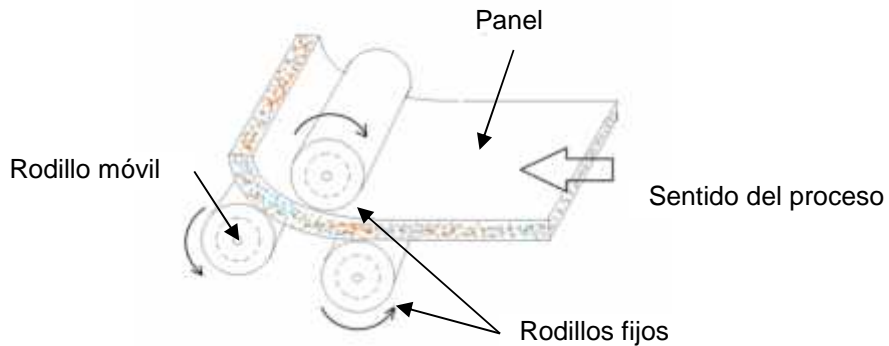


Figura 23. Diagrama esquemático del proceso del rolado de un panel sándwich^[64].

Durante el proceso de rolado existen dos tipos de radios: el primero está expuesto a tracción (se le denomina radio “exterior”) y el segundo se encuentra en compresión (llamado radio “interior”). El radio mínimo que puede formarse en la pieza siempre va a estar limitado por la deformación real que alcanza el material que se encuentra en el radio exterior. Este proceso implica una deformación plástica por flexión^[64]. En la Figura 24 se puede observar la deformación en flexión en una viga con un momento flector en el extremo derecho en sentido anti horario, el cual es el mismo mecanismo de deformación en el proceso de rolado. En la Figura 24a los esfuerzos de tensión y compresión que se presentan en las superficies del material únicamente generan deformaciones elásticas (zona elástica del material) lo que significa que el material recupera su forma original al retirar el momento flector. En la Figura 24b los esfuerzos generados en las superficies han sobre pasado el límite elástico del material y ocurre una deformación plástica (zona de color beige de la figura). Estas deformaciones son responsables de que el material mantenga su forma curva. Se debe recordar que

los máximos esfuerzos en los materiales a flexión se originan en las superficies y por lo consiguiente el material se va deformando con un comportamiento plástico del exterior al interior hasta que todo el material presente una deformación plástica como se observa en la figura 24c. Dependiendo del diámetro final que se desee, será el grado de deformación plástica que el material tendrá^[60].

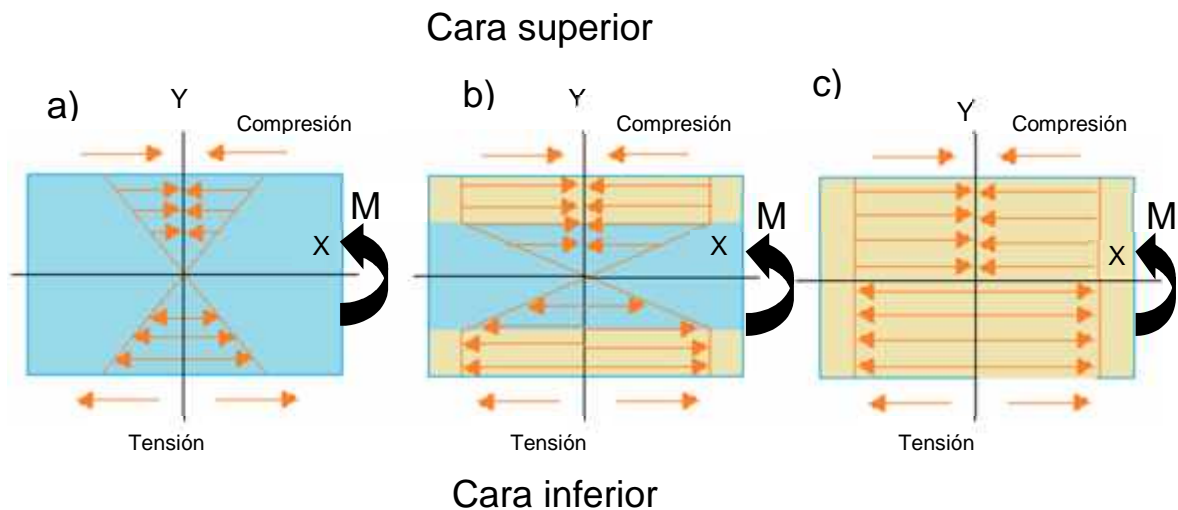


Figura 24. Deformación en flexión de viga^[60].

El comportamiento mecánico real en el ensayo a flexión se utiliza para el diseño de manufactura en el que el material se deforma plásticamente; cuando se excede el esfuerzo de cedencia el material se deforma permanentemente, porque ya no tiene su forma original^[7].

En un material deformado más allá de su punto de cedencia, al retirar la carga el material no recupera su forma original debido a que se ha sufrido una deformación plástica permanente^[7]. Sin embargo, al retirar la carga que deformaba al material se podría decir que todos los esfuerzos desaparecen pero sólo algunas partes del material sufren deformaciones plásticas (Figura 24b); los esfuerzos no regresan a cero por lo general después de que la carga haya sido retirada. Los esfuerzos llamados "esfuerzos residuales" permanecen en las distintas partes de la estructura debido a que las deformaciones elásticas tienden a regresar a su forma original pero las deformaciones plásticas lo impiden^[60].

La falta de cuidado en los parámetros del proceso ocasiona defectos o fallas en

las piezas elaboradas, tales como: deformaciones no deseadas, falta de precisión de los ángulos de doblado y de geometría, adelgazamiento de las paredes, aplanamiento de las superficies curvadas y la aparición de las grietas y arrugas, entre otros ^[64].

El proceso de rolado y plegado en frío de un material compuesto sándwich con matriz polimérica puede producir deformación y fractura. Los patrones de deformación que se observan son similares a los encontrados en algunas estructuras de roca (erosión). Estas similitudes también se encuentran en la microestructura de los materiales compuestos cerámicos laminados sometidos a rolado y plegado así como en los laminados metal/metal sometidos a los mismos procesos. El factor común entre estos procesos es la deformación de las fases contiguas, las cuales tienen diferentes propiedades mecánicas, que podrían producir formación de cuellos y/o fractura de uno de los elementos que conforman al material compuesto.

El comportamiento de falla del material compuesto, no depende solamente de las propiedades mecánicas de los constituyentes tales como el comportamiento de la matriz polimérica ante la deformación y la adhesión interfacial, sino también de los parámetros de procesamiento y la velocidad en que el material compuesto tipo sándwich pasa a través de los rodillos ^[65].

El proceso de deformación plástica siempre ha sido aplicado para mejorar las propiedades del material metálico por el refinamiento del grano y la recristalización. Los materiales poliméricos pueden cambiar sus propiedades de acuerdo a la morfología que presentan, tales como la estructura cristalina y la orientación molecular. En el proceso de rolado en frío el material pasa a través de rodillos giratorios lo cual conduce a una alta orientación molecular de los materiales debido a la presión que ejercen los rodillos. Por lo tanto, el proceso de rolado ha sido ampliamente estudiado para materiales poliméricos, ya que produce un alto rendimiento y materiales funcionales ^[66].

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ACONDICIONAMIENTO DE LOS ENVASES MULTICAPA DE DESECHO

Para la elaboración de los laminados que utiliza el material compuesto en el núcleo, se utilizaron envases multicapa de desecho tipo Tetra Brik® como los que se observan en la Figura 25. Los envases se obtuvieron de una recolecta que se lleva a cabo en el centro de acopio que se encuentra en el interior del Centro de Investigación de Científica de Yucatán (CICY). Entre los materiales que se reciben, se encuentra los envases multicapa para alimentos. Dichos envases pasan por un proceso de clasificación y limpieza con el propósito de eliminar los residuos de alimentos que se encuentran presentes en el interior y que son responsables de los malos olores característicos de alimentos en descomposición.



Figura 25. *Materia prima para la elaboración de los núcleos.*

En el proceso de lavado los envases son abiertos para facilitar la manipulación y garantizar la limpieza del envase. Para este proceso se emplea una fibra de lavado y agua para retirar los residuos orgánicos adheridos en las paredes internas de los envases.

Los envases destinados para la elaboración de núcleos de polialuminio son cortados en cuatro partes para obtener piezas más pequeñas y reducir el tiempo de inmersión de los envases en el agua. No se realizaron más cortes a los envases debido a que al tener piezas más pequeñas, se dificulta la limpieza posterior al proceso de hidropulpeo. Para agilizar el corte de los envases se empleó una cierra cinta de la marca Truper® modelo SCL-10.

3.2. Separación de la celulosa

Para la separación del papel presente en los envases multicapa (75% fracción peso), los envases son sumergidos en agua por un período de 3 días, con el fin de

que el papel absorba la mayor cantidad de agua para facilitar la separación de las fibras durante el proceso de hidropulpeo.

Posterior a los tres días de inmersión, los envases son sometidos a un proceso de hidropulpeo con ayuda de un agitador mecánico de la marca GUSTAV SPANGENBERG tipo LSD206, que se muestra en la Figura 26. En el tanque de agitación se depositaron los envases multicapa con agua a una razón 95% de agua y 5% de envases, en fracción peso. La cantidad de envases presente en la mezcla, no se excedió debido que al colocar una mayor cantidad de envases, la mezcla de agua y fibras de papel (pulpa de celulosa) que se origina durante el proceso queda muy espesa. El proceso de hidropulpeo tiene una duración de 15 minutos con una velocidad de rotación de 1047 revoluciones por minuto. La velocidad en la que opera el equipo es muy importante; si el proceso se realiza con una velocidad elevada el material es destrozado por las espas metálicas del agitador y con una velocidad muy baja la celulosa no se separa del envase ^[35].



Figura 26. *Agitador mecánico.*

Del proceso de hidropulpeo se obtiene una mezcla heterogénea de pulpa de celulosa, aluminio y PE. Tanto el PE como el aluminio son extraídos manualmente de la mezcla (este material es conocido como polialuminio) y el agua es filtrada con ayuda de una malla para retener las fibras de celulosa y poder reutilizar el agua en un nuevo ciclo del proceso; la Figura 27 presenta el proceso de hidropulpeo. El polialuminio que se extrae del proceso de hidropulpeo posee remanentes de papel adherido a sus superficies. Debido a este inconveniente, el material pasa por un proceso, en el cual se separa de forma manual dicho remanente de celulosa. Esto se logra raspando la superficie de aluminio y PE con

la ayuda de una espátula plástica con el objetivo de separar la mayor cantidad de celulosa posible. Para reunir un kilogramo de envases multicapa se requiere de 35 envases aproximadamente. Debido a que cada envase multicapa tiene un peso aproximado de 30 g. Como se mencionó anteriormente cada envase se secciona en cuatro partes, donde por cada kilogramo se limpian 140 piezas, lo cual resulta en un proceso de limpieza tardado. De igual manera por cada kilogramo de envases al que se le retira el papel, se pierde un 75% en peso dando como resultado la obtención solamente de 250 g del material de polialuminio. Para la elaboración de una placa de polialuminio con dimensiones de 25 x 35 cm con un espesor de 0.32 cm, se requiere de 350 g del material sin papel.

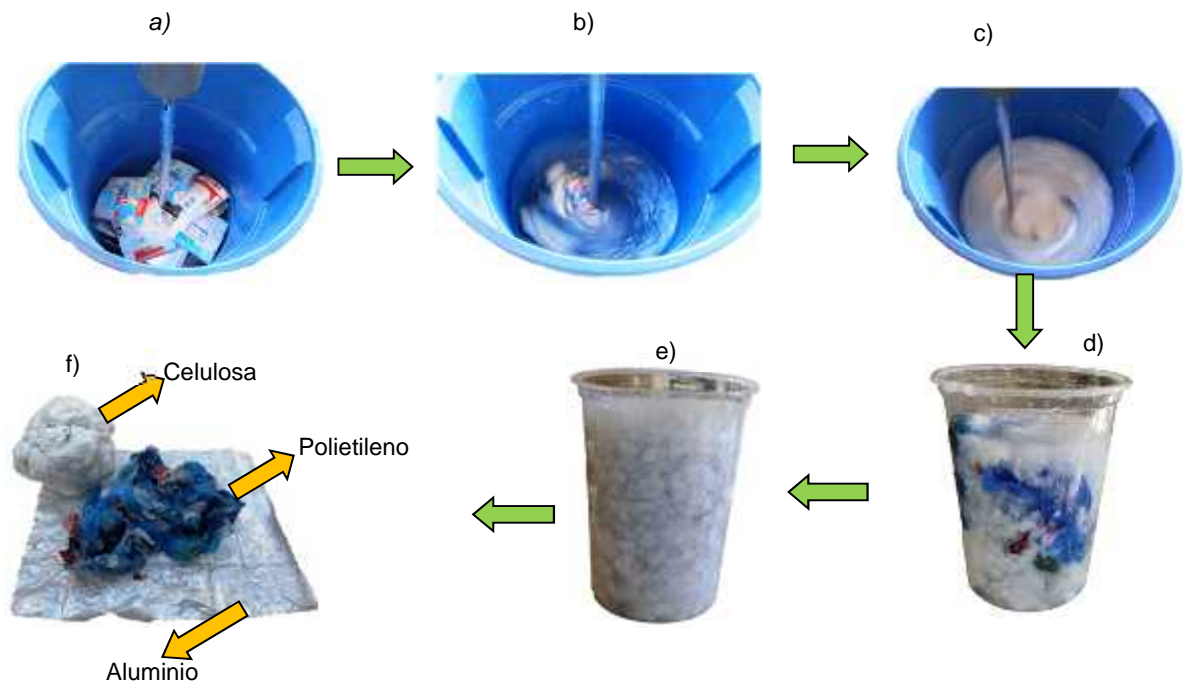


Figura 27. Proceso de hidropulpeo, a) material en contenedor, b) agitación, c) separación de la celulosa, d) mezcla heterogénea, e) pulpa de celulosa, e) producto final.

Posterior a los procesos de limpieza, el material es secado para eliminar el exceso de humedad en una estufa marca Felisa a 70 °C por 24 horas, como se muestra en la Figura 28. La celulosa seca es almacenada, para otras aplicaciones tales como la elaboración de cartón reciclado, de embalaje, hojas bond, etc., por mencionar algunas posibles aplicaciones.



Figura 28. Secado del material en estufa modelo FE 292 AD.

Para retirar la celulosa de 10 kg de envases multicapa (1400 piezas de 350 envases dividido en cuatro partes) se requirió de aproximadamente de 600 horas, este período comprende desde la recolección de los envases hasta obtener el material libre de celulosa (en un proceso manual, en la industria se podría procesar una mayor cantidad de material en un menor tiempo con procesos automatizados).

3.2.1. Determinación experimental de la cantidad de polietileno adherida al aluminio

El problema particular del envase multicapa, radica en que es un laminado de 7 capas bien consolidado de tres materiales: papel, polietileno y aluminio, por lo que no se logra la separación en sus tres materiales originales con procesos simples. El proceso de hidropulpeo por el que pasan los envases multicapa es solamente para retirar la mayor cantidad posible del papel de dicho envase.

En la Figura 29 se puede observar que al finalizar el proceso de hidropulpeo se pueden diferenciar tres materiales, a saber los siguientes: celulosa, sección de PE con tinta y sección PE con aluminio. Cabe mencionar que se denominó sección de PE con aluminio debido a que el PE se encuentra adherido en ambas caras de la lámina de aluminio. Estos materiales no se separan durante el proceso de hidropulpeo y sólo se puede estimar la fracción en peso que le corresponde al aluminio en dicha sección del envase multicapa.

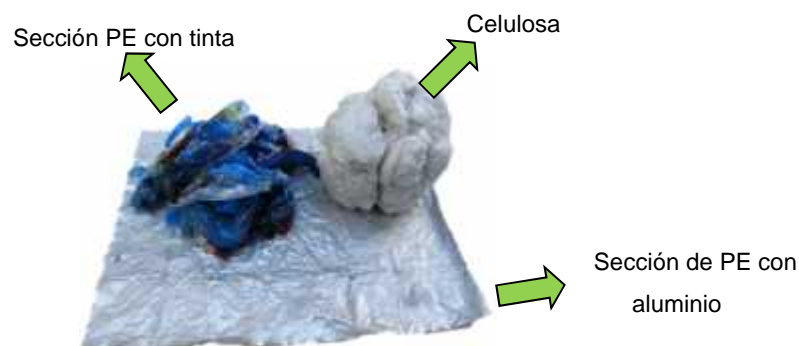


Figura 29. Material recuperado del proceso de hidropulpeo.

Las cantidades en los que se encuentran presentes los materiales en el envase son: 75% de papel, 20% de PE y 5% de aluminio (fracción peso). Al retirar el 75% del papel por medio del proceso de hidropulpeo, la nueva configuración final de polialuminio que se consigue es de 80% de PE y 20% de aluminio (en un proceso ideal en el cual se retira el 100% del papel). Para determinar la cantidad de PE que se encuentra adherida al aluminio, se tomaron varias muestras de los envases con dimensiones conocidas para poder calcular la densidad. Tabla 3. Dimensiones y pesos de los envases multicapa. La Tabla 3 presenta las densidades de los envases multicapa de desecho, observando que las desviaciones estándares no tienen variaciones significativas, por lo tanto los valores de las densidades obtenidas experimentalmente de los envases Tetra Brik[®] se consideran confiables.

Tabla 3. Dimensiones y pesos de los envases multicapa.

Envases	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
Envase 1	32.58	35.45	0.88
Envase 2	31.18	36.27	0.82
Envase 3	31.84	36.26	0.86
Envase 4	31.87	36.85	0.84
Envase 5	31.22	36.16	0.83
Envase 6	31.53	36.51	0.85
Promedio	34.16	36.25	0.85
D.E.	0.89	0.46	0.022

De los envases se cortaron secciones rectangulares con dimensiones de 26 x 6.5 cm (169 cm²) para eliminar el papel y facilitar el proceso de hidropulpeo, del cual se obtuvo un peso promedio de 1.047 g de PE con aluminio y 0.303 g de PE

con tinta. Posterior a la separación de la celulosa se midió la pérdida de peso de las secciones de los envases y se calculó la fracción peso del papel presente en el envase multicapa. Como se puede observar en la Tabla 4, de las 6 muestras iniciales solamente en cuatro se logró retirar el papel casi en su totalidad (siendo estos envases de las marcas “San Marcos y Alpura” envases seleccionados para este proyecto); las dos muestras restantes se descartaron del estudio. Se observa que la fracción peso obtenida de forma experimental es de 78% para el papel, la cual es próxima a 75% de fracción en peso que reporta la empresa Tetra Pak[®], lo que indica que se está próximo a los datos teóricos.

Tabla 4. Dimensiones y pesos de las secciones analizadas de los envases multicapa.

Muestra	Peso con papel (g)	Peso sin papel (g)	Peso del papel (g)	Fracción Peso del papel (%)
Envase 1	6.63	1.43	5.2	78.43
Envase 2	6.54	1.36	5.1	79.2
Envase 3	6.3	1.33	4.9	78.8
Envase 4	6.52	1.26	5.2	80.67
Promedio	6.49	1.35	5.1	79.27
D.E.	0.14	0.06	0.1	0.98

Utilizando la ecuación para el cálculo de la densidad se puede obtener el peso de la lámina de aluminio que se encuentra presente en la sección denominada PE con aluminio. Esta lámina de aluminio tiene un espesor de 6.5 micras, una densidad de 2.7 g/cm³[67] y el área de las secciones utilizadas para este análisis es de 169 cm².

$$V_{Aluminio} = \text{Área} * \text{espesor} = 169 \text{cm}^2 * 6.5 \times 10^{-4} \text{cm}$$

$$V_{Aluminio} = 0.109 \text{cm}^3 \quad (7)$$

$$\rho_{Aluminio} = \frac{m_{Aluminio}}{V_{Aluminio}} \quad (8)$$

$$m_{Aluminio} = V_{Aluminio} * \rho_{Aluminio} = 0.109 \text{cm}^3 * 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0.296 \text{g} \quad (9)$$

La lámina de aluminio tiene un peso de 0.296 g. Por lo tanto el peso del PE que se encuentra adherida al aluminio es de 0.751 g. El peso del aluminio corresponde

al 28% del 1.047 g de la sección denominada PE con aluminio. El peso total del PE con tinta más el PE adherido al aluminio es de 1.053 g y el peso total de aluminio es de 0.296 g. La configuración final que se obtiene al retirar el papel del proceso de hidropulpeo es de 78% de PE y 22% de aluminio, la cual es muy cercana a la configuración ideal de 80% PE y 20% de aluminio.

3.2.2. Determinación analítica de la cantidad de polietileno adherida al aluminio

Para validar el dato anterior se procedió a una revisión bibliográfica, donde se encontró que el envase multicapa para alimentos se conforma de 7 capas protectoras, de las cuales una es de papel, una de aluminio, y cinco le corresponden al PE^[28]. La Figura 9 muestra la distribución de las capas en el envase. Al retirar el papel del envase se obtiene la sección de PE con tinta (2 capas) y la sección PE con aluminio (tres capas de polietileno y una de aluminio).

Se observa en la Figura 30, que al considerar la sección de PE con aluminio como el 100% del material, la configuración cambia y la lámina de aluminio representa el 28% del peso total de la sección, dicha cantidad corresponde con la cantidad determinada de manera experimental. Por lo tanto al utilizar la mezcla de PE con tinta y PE con aluminio se obtiene la configuración de 80% de PE y 20% de aluminio.

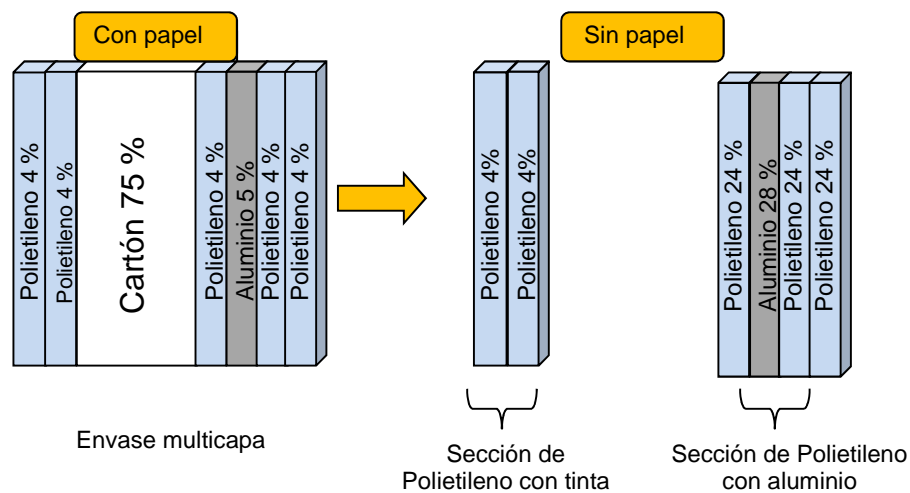


Figura 30. Fracción peso de cada lámina del envase multicapa.

En este estudio se considera que las 5 láminas de PE que conforman al envase multicapa tienen el mismo espesor (10 micras^[68]) y una densidad de 0.917 g/cm³ que corresponde al polietileno de baja densidad.

3.3. Determinación del punto de fusión de los polímeros que conforman al panel sándwich

Para determinar el punto de fusión de los polímeros se realizaron análisis térmicos de los componentes del núcleo y de la película de polietileno modificado, la cual se utiliza como adhesivo para unir el núcleo de reciclado de envases multicapa y las caras de aluminio. Esto es debido a que el polietileno por si solo posee una baja energía superficial lo que dificulta su unión con otros materiales por lo que se recurre en este caso al polietileno modificado para obtener buenas uniones adhesivas^[14].

3.3.1. Calorimetría diferencial de barrido

Se realizó un análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido (DSC por sus siglas en inglés) para determinar la temperatura óptima para consolidación del panel sándwich. En el campo de los polímeros este método es ampliamente utilizado para determinar transiciones térmicas como la temperatura de transición vítrea T_g y la temperatura de fusión T_m . Con esto se pueden realizar estudios de compatibilidad de polímeros, reacción de polimerización y procesos de curado^[69].

El método utilizado es el de DSC de flujo de calor, el cual mide la diferencia de cantidad de calor de la muestra y de una referencia (un porta muestras vacío). El proceso de fusión que ocurre al incrementar la temperatura da lugar a un pico endotérmico en el termograma, el cual indica la temperatura de fusión del polímero T_m ^[69].

El análisis térmico DSC se realizó a las muestras de polietileno modificado y polietileno con tinta. Para esta prueba se empleó el equipo Diamond DSC de la marca Perkin Elmer. Por cada muestra se realizaron dos barridos de 50 °C a 300 °C con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. El primer barrido se realiza con el fin de borrar el historial térmico de la muestra y el segundo se realiza bajo las

mismas condiciones. Este análisis ayuda a la selección adecuada de la temperatura para la elaboración del material compuesto.

3.4. Obtención del núcleo PAL

El material seco obtenido por hidropulpeo pasa por un proceso de molienda en un molino de la marca Pagani modelo 1520 utilizando una criba de 3 mm. El PE con tinta y el PE con aluminio se muelen por separado, esto con el fin de tener el control sobre la configuración de 80-20% al momento de elaborar los núcleos PAL; el proceso se puede observar en la Figura 31.

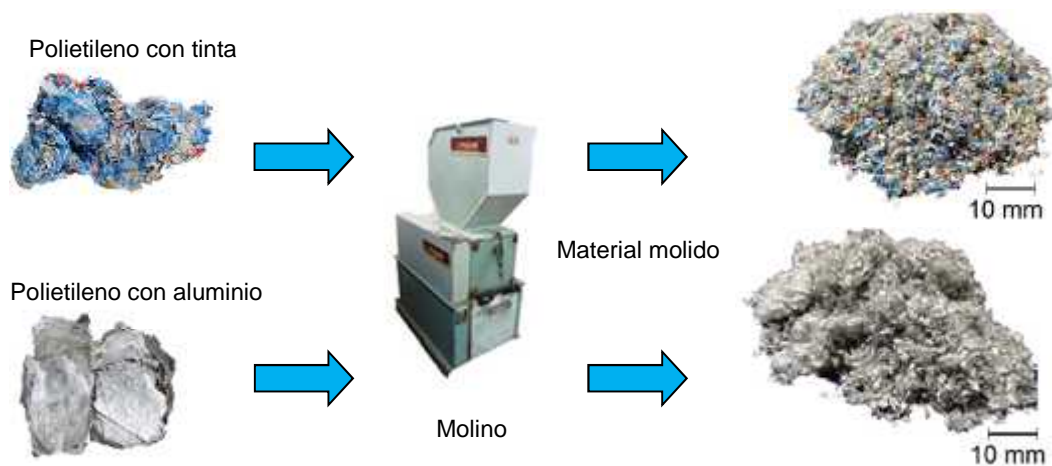


Figura 31. Proceso de molienda.

Cada núcleo PAL con dimensiones de 25 x 35 cm y con un espesor de 0.32 cm requiere de 350 g de material sin papel, donde el 80% es de PE (280 g) y el 20% es de aluminio (70 g). Por lo tanto se requiere de 250 g de PE con aluminio, debido a que el 28% del peso le corresponde al aluminio (70 g), y sólo 180 g le corresponde al PE. Por tal motivo se le agrega 100 g de PE con tinta, logrando la configuración de 80% PE y 20% de aluminio en fracción peso para el laminado de PAL.

La conformación de los laminados PAL se realizan por un proceso de termo-compresión en una prensa denominada Cordemex que cuenta con placas de calentamiento/enfriamiento. Se utiliza un molde de aluminio con tapa con dimensiones de 25 x 35 cm con una profundidad de 2.5 cm. El molde es recubierto

con una película de PET (fusión de 260 °C) que funge como desmoldante del núcleo PAL. El apilado de los componentes se puede apreciar en la Figura 32. El proceso consiste en calentar los platos de la prensa a una temperatura de 150 °C, cuando la prensa alcanza la temperatura deseada, se introduce el molde entre los platos de la prensa y se ejerce una presión de 0.12 MPa durante 5 minutos. Posterior a los 5 minutos la prensa se enfría hasta llegar a la temperatura ambiente; la presión se mantiene constante durante todo el proceso.

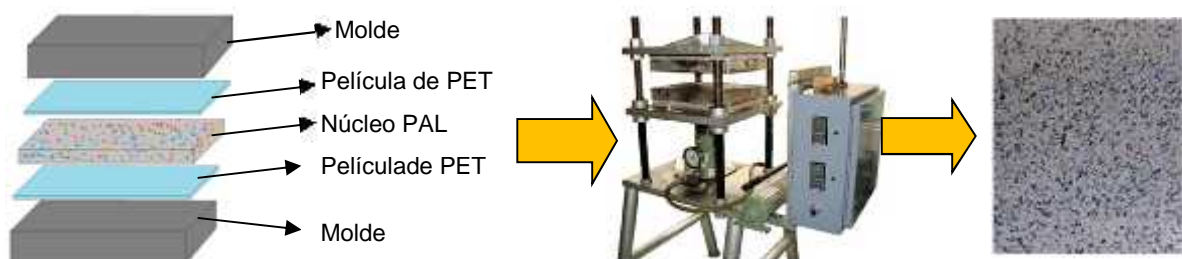


Figura 32. *Proceso de obtención del núcleo PAL.*

3.5. Obtención del núcleo PAR

Para la elaboración del núcleo PAR, se decidió trabajar con la configuración que ha demostrado tener las mejores propiedades mecánicas. Es decir, una configuración de 55% de envases multicapa y 45% de PE de alta densidad, donde este último se obtiene del reciclaje de envases de yogurt^[34]. Cabe mencionar que solo se utilizó envases de yogurt de sin pigmentación alguna (blanco).

Para el proceso de elaboración del núcleo PAR, los envases multicapa y los envases de PE de alta densidad pasan por una etapa de molienda utilizando un molino de la marca Pagani modelo 1520 (como se muestra en la Figura 33) con una criba de 3 mm. Posterior al proceso el material molido es secado en una estufa marca Felisa modelo FE 292 AD a 70 °C por 24 horas para eliminar la humedad que pudo haber absorbido el papel presente en los envases.

Se requiere de 320 g de material para elaborar un núcleo PAR con dimensiones de 25 x 35 cm y con un espesor de 0.32 cm, donde el 55% del peso es de los

envases multicapa (192 g) y el 45% corresponde al PE de alta densidad (128 g). La conformación del núcleo PAR es similar al proceso de conformación de núcleo PAL, el cual se lleva a cabo por un proceso de termo-compresión en la prensa denominada Cordemex que cuenta con placas de calentamiento/enfriamiento. Se utiliza un molde de aluminio con tapa de 25 x 35 cm con una profundidad de 2.5 cm. El molde se recubre con una película de PET para desmoldar el núcleo PAR al final del proceso.

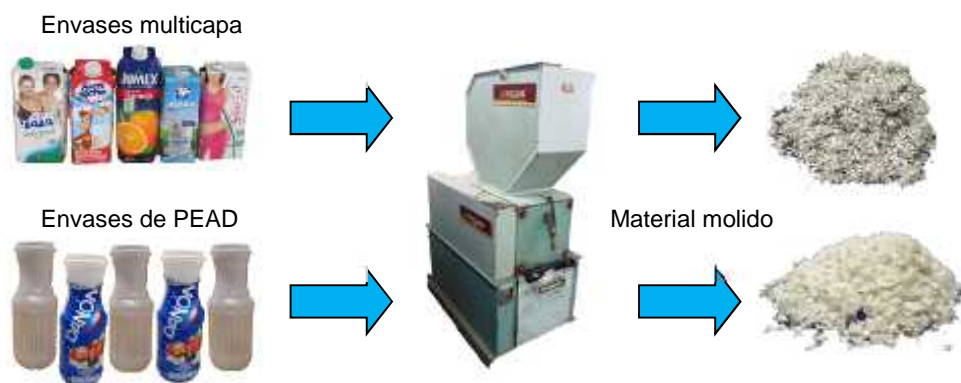


Figura 33. Proceso de molienda del envase multicapa y del PEAD.

El proceso consiste en calentar los platos de la prensa a 150 °C. Cuando la prensa alcanza la temperatura deseada, se introduce el molde entre los platos de la prensa y se ejerce una presión sobre el molde de 1.13 MPa durante 10 minutos. Al final del proceso el molde es enfriado hasta la temperatura ambiente y la presión se mantiene constante durante todo el proceso. En la Figura 34 se presenta el proceso de conformado.

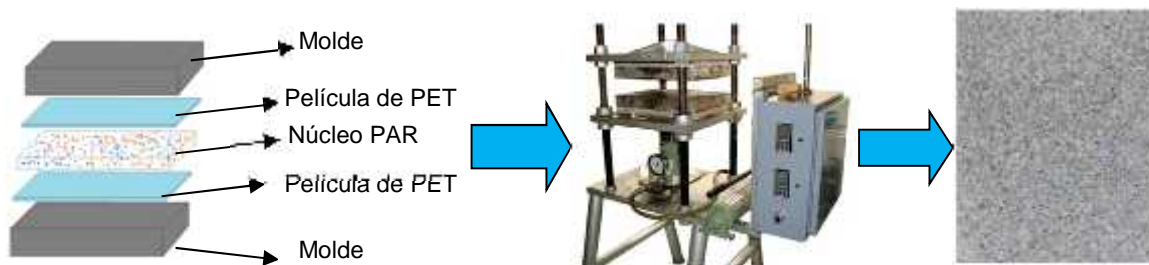


Figura 34. Proceso de obtención del núcleo PAR.

3.6. Consolidación de los paneles

Para las caras del panel sándwich se emplean láminas de aluminio de 0.3 mm de espesor de una aleación 1100 H14. Esta aleación de aluminio es una de las más económicas y se emplea con la finalidad de reducir el costo del producto final. Las láminas de aluminio se adhieren al núcleo PAR y PAL por medio de una película de PE modificado utilizado como adhesivo por medio de termo fusión. Las láminas de aluminio y las películas de adhesivo se cortaron en dimensiones de 25 x 35 cm.

La consolidación de los paneles sándwich se realizó en la misma prensa en la cual se conformaron los núcleos PAR y PAL. Las caras de aluminio, las películas de adhesivo y el núcleo del material requieren de una limpieza con acetona previa a la consolidación del panel, con el fin de eliminar las impurezas presentes en las superficies de los materiales.

En la Figura 35 se observan los materiales limpios y apilados, a los cuales se les adhirió una cinta de aluminio en el borde del material ya apilado, para mantener los componentes en su posición durante el proceso de consolidación debido a que este proceso no requiere de molde.

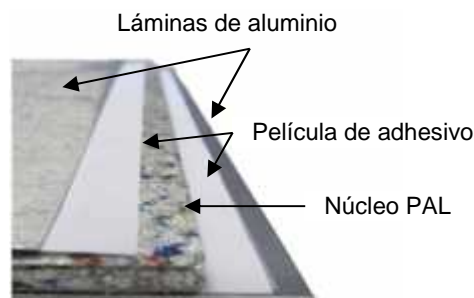


Figura 35. Apilado del panel sándwich.

Para la consolidación de los paneles los platos de la prensa se calientan a una temperatura de 150 °C. Cuando la prensa alcanza la temperatura deseada, los materiales apilados previamente se colocan entre los platos de la presa y se ejerce una presión de 0.12 MPa como se observa en la Figura 36. Durante un minuto se mantiene la temperatura constante para luego ser enfriada hasta la temperatura ambiente. La presión se mantiene constante durante todo el proceso.



Figura 36. *Proceso de consolidación del panel sándwich.*

3.7. Caracterización térmica de los núcleo PAL y PAR

Los materiales caracterizados con el fin de determinar la conductividad térmica fueron los núcleos; PAL y PAR. Para esta caracterización se emplea la norma ASTM C518 "Método de prueba estándar para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario".

Esta norma establece los criterios para la medición en laboratorio de la transferencia de calor bajo el régimen de estado estacionario a través de muestras planas. Las superficies de las muestras están en contacto con las placas del equipo, las cuales controlan los parámetros de temperatura; una placa caliente y la otra fría. El equipo utilizado se muestra en la Figura 37, el cual fue desarrollado en el CICY para este fin.

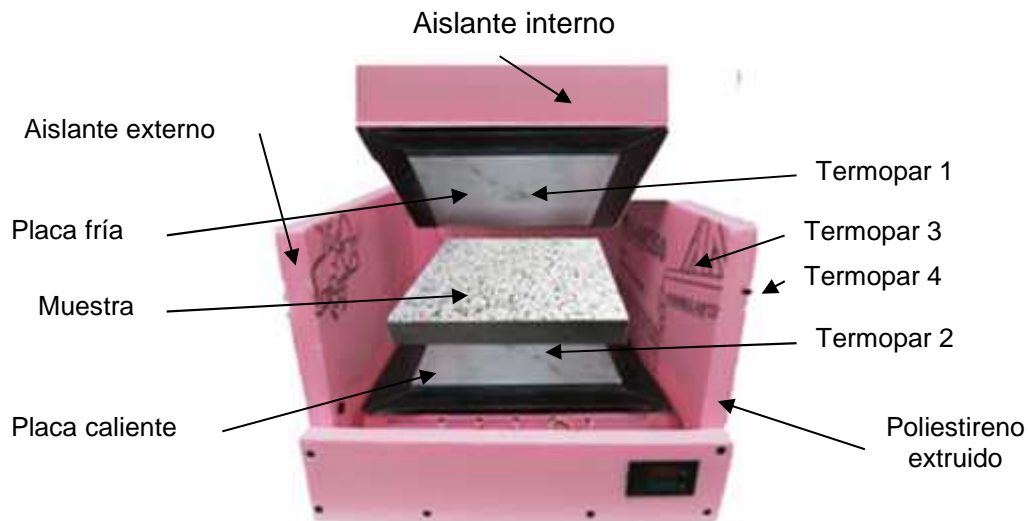


Figura 37. *Componentes del equipo de pruebas térmicas.*

Este método de prueba aplica para la medición de una amplia variedad de especímenes que van desde los sólidos opacos a materiales porosos o transparentes. Este método puede ser utilizado en condiciones ambientales en el rango de 10-40 °C, las muestras pueden tener espesores de hasta 25 cm.

Al inicio del ensayo todo el sistema debe estar a temperatura ambiente; placa caliente, placa fría y muestra a ensayar. La transferencia de calor en un sistema de paredes planas se da en la dirección normal a la superficie de ésta, la transferencia de calor que pueda existir en otras direcciones se considera despreciable.

Las muestras para esta prueba se diseñaron con dimensiones especiales, las cuales tienen dimensiones de 25 x 25 cm con un espesor de 2 cm, como se aprecia en la Figura 38. Las muestras para los ensayos de conductividad térmica tienen un espesor mayor en comparación con núcleos PAL y PAL que tienen un espesor de 0.34 cm con el objetivo de observar una clara diferencia entre gradientes de temperatura durante el desarrollo de la prueba. Este espesor se logró utilizando siete veces más de material necesario para elaborar un núcleo de 0.34 cm, utilizando las mismas condiciones de procesado.

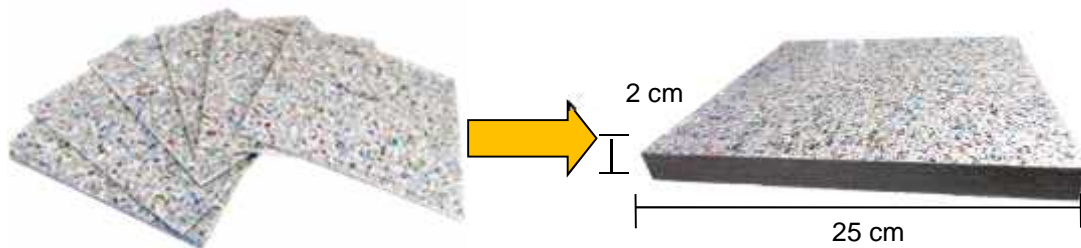


Figura 38. *Equivalencia de la muestra para pruebas de conductividad térmica.*

En la placa inferior del equipo utilizado para determinar el coeficiente de conductividad térmica, se encuentra alojado en el interior un arreglo de 5 resistencias eléctricas, las cuales suministran calor a la placa. En la placa superior del equipo se encuentran una serie de canales a modo de serpentín por el cual circula el líquido refrigerante que extrae el calor suministrado por la placa caliente que se transfiere a través de la muestra.

La muestra se posiciona entre la placa caliente y la placa fría asegurando el mejor contacto posible con las superficies de la muestra. En la Figura 39 se muestra un corte transversal del equipo. El equipo se recubre con un material aislante de poliestireno extruido para evitar las pérdidas de calor y mantener el sistema a una temperatura constante. Las pruebas se realizaron con un ambiente controlado de laboratorio de 25 °C aproximadamente.

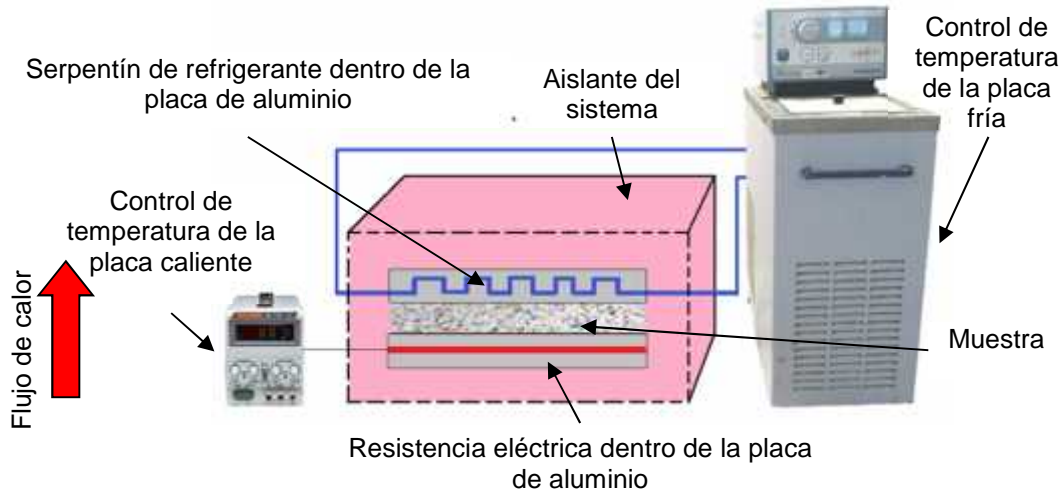


Figura 39. Esquema de la sección transversal del equipo de pruebas térmicas.

Cuando el sistema alcanza el estado estacionario, se calcula el flujo de calor que atraviesa la muestra en dirección perpendicular a su superficie. El flujo de calor es igual a la potencia eléctrica que disipan las resistencias. La potencia eléctrica (P) se calcula multiplicado el voltaje (V) que ofrece la fuente por la corriente (I) que las resistencias consumen:

$$P = (V)(I) \quad (10)$$

Para determinar la conductividad térmica del material se utiliza la ecuación de la ley de Fourier para la conducción del calor:

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (11)$$

Al realizar el ensayo la fuente de voltaje suministra 25 Volts constantes al sistema. Las resistencias eléctricas tienen un consumo de 0.83 A para ese voltaje y se tiene una potencia de 20.75 W. La temperatura de la placa caliente se elevó

de la temperatura ambiente de 25 °C hasta 39.5 °C, la cual fue la temperatura de estabilización. La temperatura de la placa de fría se programó a 20 °C y la temperatura descendió de la temperatura ambiente hasta los 20.1 °C. El tiempo requerido para que el sistema se estabilice encontrando el estado estacionario fue de 3 horas. Posterior a este periodo de tiempo los valores de temperatura se mantuvieron constantes.

3.8. Impacto por caída de masa

Las pruebas fueron realizadas utilizando una torre de impacto que se muestra en la Figura 40 (equipo construido en el CICY). Las dimensiones de las muestras fueron de 12.5 x 12.5 cm y se utilizó un impactor semiesférico de 16 mm de diámetro. Los parámetros utilizados fueron de acuerdo a la norma ASTM D7766M-11, la cual es un método estándar para probar la resistencia al daño de las construcciones tipo sándwich. La masa del impactor usado es de 8.15 kg, por lo que para obtener las diferentes energías de impacto incidentes en las muestras se varió la altura de caída.

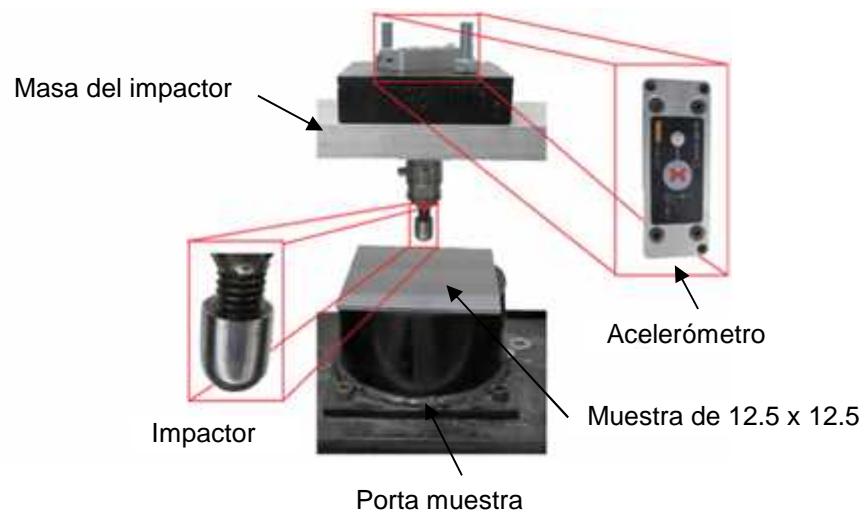


Figura 40. Componentes de la torre de impacto.

Durante cada prueba se eleva la masa con el impactor a una altura determinada y se deja caer para impactar el centro de la muestra. El registro de los datos se realiza por medio de un acelerómetro de la marca SlamStick® con la capacidad de

registrar aceleraciones y desaceleraciones de hasta 600 gravedades (g) y 20,000 datos por segundo. El acelerómetro está montado en la masa del impactador. Los valores registrados por el acelerómetro sirven para calcular la fuerza de contacto utilizando la segunda ley de movimiento de Newton^[36]. A medida en que una muestra se somete a un impacto con la con la punta semiesférica del impactor, la indentación que se produce en el punto de contacto está dada por la diferencia entre el desplazamiento del impactor y la indentación del material. El acelerómetro se configuró para registrar los datos cuando el operador presione un interruptor. Después se esperaran tres segundos y se dejar caer la masa con el impactor. El registro de datos se detiene cuando el operador presiona el interruptor nuevamente posterior al impacto.

Para el análisis de los datos se pueden emplear las ecuaciones de caída libre^[49]. Para el cálculo de la altura que se requiere para obtener 25 J de energía del impacto se utiliza la ecuación para el cálculo de energía potencial, despejando la altura:

$$E_{potencial} = m * g * h \quad (12)$$

$$h = \frac{E_p}{m * g} = \frac{25J}{(8.155kg)(9.81m / s^2)} = 0.31m \quad (13)$$

Para calcular cuánto tiempo tarda en caer la masa con el impactor desde una altura determinada hasta un instante antes de que ocurra el impacto se utiliza la ecuación de caída libre; estos datos servirán para calcular la velocidad con la cual se impacta la muestra. La

Tabla 5 muestra las alturas, tiempos y velocidades para las diferentes energías de impacto seleccionadas para esta prueba.

$$t = \sqrt{\frac{h * 2}{g}} = \sqrt{\frac{0.74m * 2}{9.81m / s^2}} = 0.25s \quad (14)$$

$$v = g * t = 9.81m / s^2 * 0.388 = 2.46 m/s \quad (15)$$

Tabla 5. Altura, tiempo y velocidad correspondiente a cada nivel de energía para el ensayo de impacto.

Parámetros para la valuación del panel con núcleo reciclado			
Energía (J)	Altura (m)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
5	0.06	0.110	1.07
10	0.12	0.156	1.53
15	0.18	0.191	1.87
20	0.24	0.210	2.06
25	0.31	0.251	2.46

3.9. Flexión a tres puntos

Los materiales utilizados para las prueba de flexión a tres puntos son muestras de los paneles PAR y PAL. Las dimensiones de las muestras fueron de 20 x 7.5 cm con un espesor de 0.38 mm, como se puede observar en la Figura 41. La distancia entre los puntos de apoyo es de 15 cm (distancia conocida como span). La prueba de flexión se realizó de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM C393-00, la cual es un método de prueba estándar para flexión de arreglos sándwich.

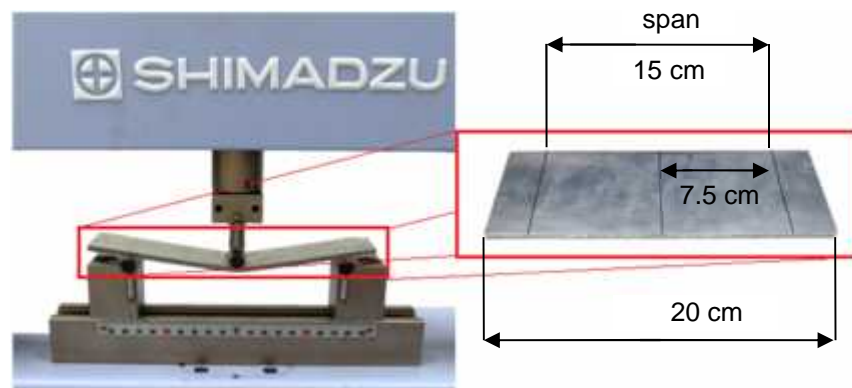


Figura 41. Probeta sometida a flexión de tres puntos.

Las pruebas se realizaron utilizando una máquina de pruebas universales Shimadzu modelo AG-X con una celda de carga de 1 kN. Estas pruebas se

realizaron con la finalidad de determinar la resistencia a la flexión y el módulo de flexión de los paneles PAR y PAL, así como observar y comparar sus propiedades mecánicas cuando el papel se encuentra presente en el núcleo del panel. La resistencia a la flexión se calcula con la ecuación (6) y el módulo de flexión se calcula con la ecuación (7).

3.10. Rolado del material compuesto

Para las pruebas de rolado se utilizaron tres diferentes radios de curvatura. Con el fin de incrementar la deformación plástica en el panel al disminuir el radio. Para cada radio de curvatura se utilizaron 5 muestras del panel PAR y 5 muestras del panel PAL. Se determinó un radio mínimo de acuerdo a la ficha técnica de un fabricante de paneles sándwich con núcleo de polietileno de baja densidad y caras de aluminio, el cual recomienda que el radio mínimo de curvatura no debe ser menor a 15 veces el espesor del material^[41]. Por lo tanto para los paneles PAR y PAL que tienen un espesor promedio de 3.8 mm el radio mínimo es de 5.7 cm y no se utilizó un radio menor a éste. Los dos radios de curvatura además del radio mínimo fueron de 9 cm y 12 cm (múltiplos de tres).

El equipo utilizado para rolar los paneles es una roladora manual de la marca JET modelo SBR-30N. El diámetro de sus rodillos es de 6.35 cm. Este equipo cuenta con tres rodillos. Dos rodillos ejercen la presión suficiente para introducir y extraer el material y permanecen en la misma posición durante todo el proceso. El tercer rodillo puede desplazarse axialmente para determinar el radio de curvatura; este movimiento se realiza por medio de unos pernos que ajustan su altura. El proceso se puede apreciar en la Figura 42.

El proceso de rolado se realizó de forma gradual. El rodillo que determina el radio de curvatura fue levantado aproximadamente 3 mm cada vez que el material era introducido y extraído del equipo hasta alcanzar la curvatura deseada.



Figura 42. *Proceso de rolado del Panel sándwich.*

3.10.1. Caracterización del material rolado

Con el fin de determinar el comportamiento de los paneles y el daño causado por la deformación plástica, se procedió a caracterizar las muestras de los paneles sin rolar y de los paneles rolados a un proceso de desprendimiento de la cara (pelado) externa^[64]. Esta prueba se efectuó con el propósito de realizar una comparación entre la resistencia al pelado de los paneles con y sin rolado.

Las dimensiones de las muestras fueron de 2.54 cm ancho por 24 cm de longitud. Los radios de curvatura de los paneles fueron de 12, 9, y 6 cm (siendo este último el radio mínimo de curvatura). Las muestras se observan en la Figura 43a. Los radios de curvatura se fueron reduciendo con el fin de incrementar la deformación plástica al reducir los radios y observar si la resistencia al pelado disminuye.

Para las pruebas de pelado se empleó una máquina de pruebas universales de la marca Shimadzu modelo AG-X con una celda de carga de 1 kN y una velocidad de desplazamiento del cabezal constante de 254 mm/min como se puede apreciar en la Figura 43b. Los parámetros de la prueba son de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM D1876, la cual es un método de prueba para determinar la resistencia al pelado de los adhesivos.

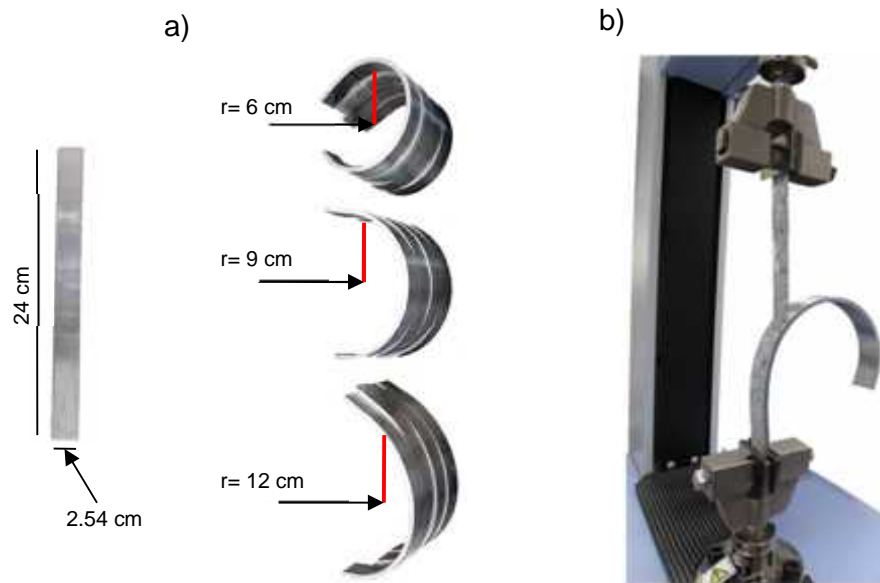


Figura 43. *Ensayo de Pelado; a) muestras a ensayar, b) probeta sometida al ensayo de pelado.*

3.10.2. Exposición de intemperismo natural

Los paneles PAR y PAL con dimensiones de 25 x 35 cm rolados con un radio de curvatura de 22.2 cm, se sometieron a una exposición de 10 meses de intemperismo natural. Esto con la finalidad de observar los efectos que generan las deformaciones plásticas (esfuerzos residuales), las cuales se presenta durante el proceso de rolado (las muestras se presentan en la Figura 44).

De esta forma se pretende observar si los efectos de los esfuerzos residuales al que está expuesto el material se ven reflejados en un incremento de su radio de curvatura. Esta exposición se llevó a cabo sobre el techo de un edificio en el CICY, que tiene una estructura de dos pisos con una altura aproximada de 20 metros con un techo amplio y se encuentra sin obstrucciones de sombras por objetos.

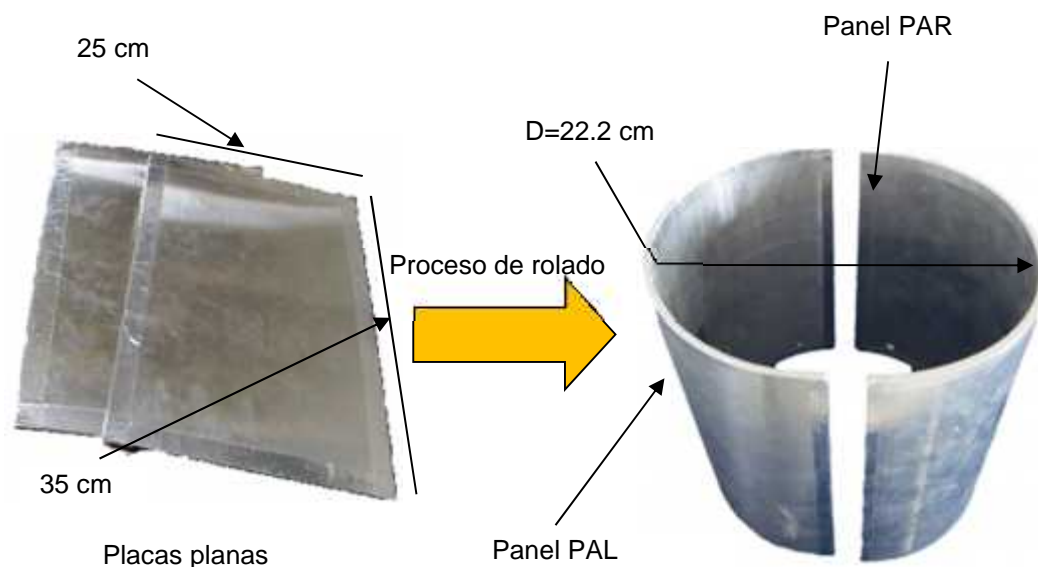


Figura 44. *Muestras para intemperismo natural.*

Las muestras se colocaron de forma vertical con el lado convexo hacia el sur, es decir, en dirección hacia los rayos del sol en su recorrido diario (movimiento rotacional)^[70, 71]. Esta zona experimenta la mayor radiación de rayos solares simulando las aplicaciones potenciales del material como recubrimiento de edificios. Las muestras se colocaron sobre unos bloques de concreto y se sujetaron por medio de unos cables tensores para mantenerlos en la misma posición durante el desarrollo de la prueba como se puede apreciar en la Figura 45.

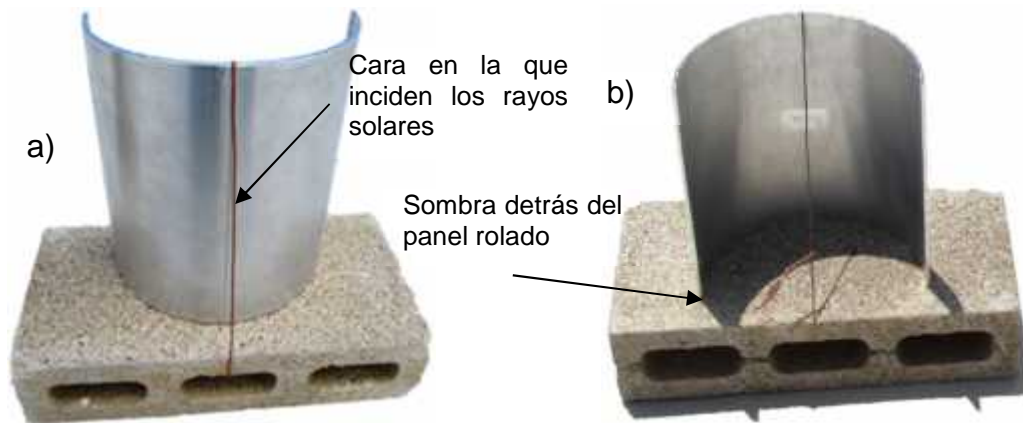


Figura 45. Muestras de intemperismo durante el periodo de exposición: a) cara convexa con dirección hacia el sur (hacia el sol), b) cara cóncava con dirección hacia el norte.

Mérida está ubicada a una latitud $20^{\circ}58'12''$ y a longitud de $89^{\circ}37'12''$. El 85.5% de la superficie del estado presenta climas cálido subhúmedo y el restante 14.5% presenta clima seco y semiseco, que se localiza en la parte norte del estado.

La temperatura media anual es de 26°C y la temperatura máxima promedio es de alrededor de 36°C y se presenta en el mes de mayo. La temperatura mínima promedio es de 16°C , la cual se presenta en el mes de enero.

La precipitación media estatal es de 1 100 mm anuales y las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre^[72]. Los diámetros de los materiales rolados son monitoreados en la noche cuando el sol se está ocultando aproximadamente a las 19:00 horas y cuando se presenta la mayor temperatura aproximadamente a las 14:00 horas, esto en busca de observar efectos de variación del radio de curvatura por efecto de la expansión térmica, así como cualquier efecto de relajación que permita al material retornar a su estado original (plano).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la cantidad de polietileno adherida al aluminio

Tanto para el método experimental como en el analítico, se pudo observar que la fracción peso del aluminio que se encuentra en la sección de PE con aluminio es aproximadamente del 28%. Al retirar el papel de 10 kg de envases, se obtuvo como resultado 2.56 kg de material sin papel, siendo 1.92 kg de la sección de PE con aluminio y 0.641 kg de la sección de PE con tinta. El 28% de 1.92 kg corresponde al peso del aluminio (0.382 kg), que representa el 16% en fracción peso del material sin papel. La suma del peso de la sección de PE con tinta (0.641 kg) más el peso del PE que se encuentra en la sección de PE con aluminio (1.52 kg) es de 2.16 kg, que representa el 84% en fracción peso del material sin papel, como se pudo observar en la descripción del envase^[28]. En la Tabla 6 se observa que de los 10 kg de envases multicapa que pasan por el proceso de hidropulpeo solamente se recuperó 9.64 kg por lo que existe una pequeña pérdida de material que solamente representa el 3.6% (0.36 kg). El proceso de hidropulpeo por el cual pasan los envases es artesanal y se toman todos los cuidados posibles para recuperar y aprovechar en su totalidad los materiales.

El peso de la sección PE de baja densidad se esperaba que fuera de 2 kg, sin embargo se obtuvo 2.16 kg. Esto se puede atribuir a que una pequeña cantidad de fibras de papel quedan adheridas en el PE con un peso de aproximado de 0.16 kg y que representa un 6.25% del total de material que se recuperó. Durante el proceso de hidropulpeo se procesa una gran cantidad de envases por lo que existen pérdidas en la mayoría de los componentes al igual que cierta incertidumbre de los equipos de medición.

Tabla 6. Peso de los componentes recuperados del proceso de hidropulpeo de 10 kg de envases.

Componentes del envase	Fracción peso de los materiales en el envase %	Peso ideal kg	Peso del material recuperado g	Porcentaje de pérdida %
Papel	75	7.5	7.1	9.2
PEBD	20	2.0	2.16	-8
Al	5	0.5	0.38	23
Total	100	10	9.64	3.6

4.2. Determinación del punto de fusión de los polímeros que conforman al panel sándwich

De acuerdo a los datos obtenidos en los análisis térmicos que se presenta en la Figura 46, se observó que la temperatura de flujo del polietileno presente en el envase multicapa es de 108 °C y el punto de fusión de la película del adhesivo del PE modificado es de 130 °C. De acuerdo a la literatura el polietileno de alta densidad funde aproximadamente a 130 °C y se degrada sobre los 420 °C^[15, 16]. Por lo que se decidió trabajar con la temperatura de 150 °C para el conformado de los núcleos PAL y PAR así como para la consolidación de los paneles, obteniendo buenos resultados.

Parte de la decisión en la selección de la temperatura de 150 °C es debido a que el material pierde viscosidad y fluye fuera del molde durante el proceso de termocompresión si se utiliza una temperatura más elevada.

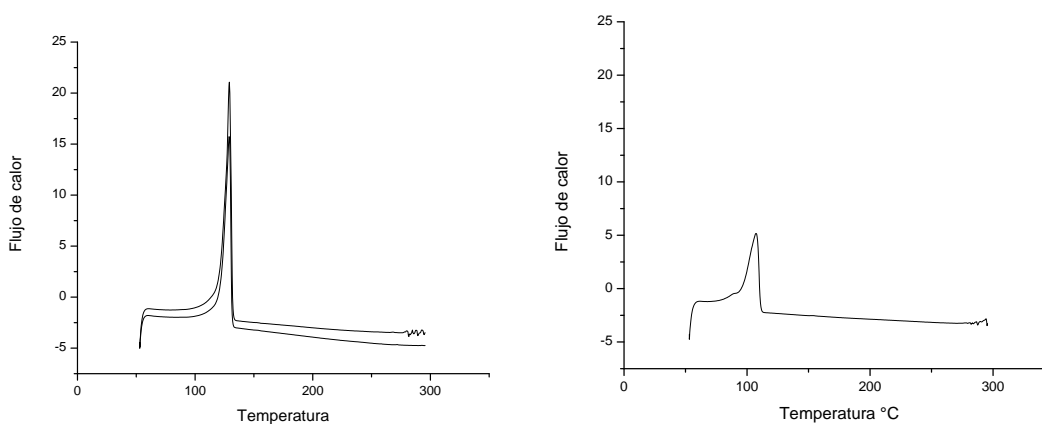


Figura 46. Termograma DSC a) PE modificado y b) polietileno con tinta.

4.2 Obtención de los núcleos PAR y PAL

Al concluir el proceso de conformado se obtienen los núcleos PAR y PAL con un espesor promedio de 3.4 mm. Ambos núcleos presentaron un acabado liso, observando que la matriz polimérica aglutinó a los demás componentes presentes en los núcleos como se esperaba, por lo que se considera que la temperatura de 150 °C es la adecuada para la conformación de los núcleos PAR y PAL. El núcleo

PAL se distingue al tener mayor cantidad de aluminio en comparación con el núcleo PAR, el cual le proporciona un brillo característico del metal. En la Figura 47 se puede observar la superficie del núcleo PAL, observando claramente las partículas de aluminio aglutinadas en la matriz polimérica, mientras que en la superficie del núcleo PAR se distingue la mezcla del papel, aluminio, PE de baja densidad y PE de alta densidad, todos aglutinados en fases discontinuas por los PE. La fase discontinúa de ambos PE se debe a que el único movimiento que tienen las cadenas macromoleculares es la interdifusión cuando se encuentran en estado líquido viscoso (fundido)^[69, 73].

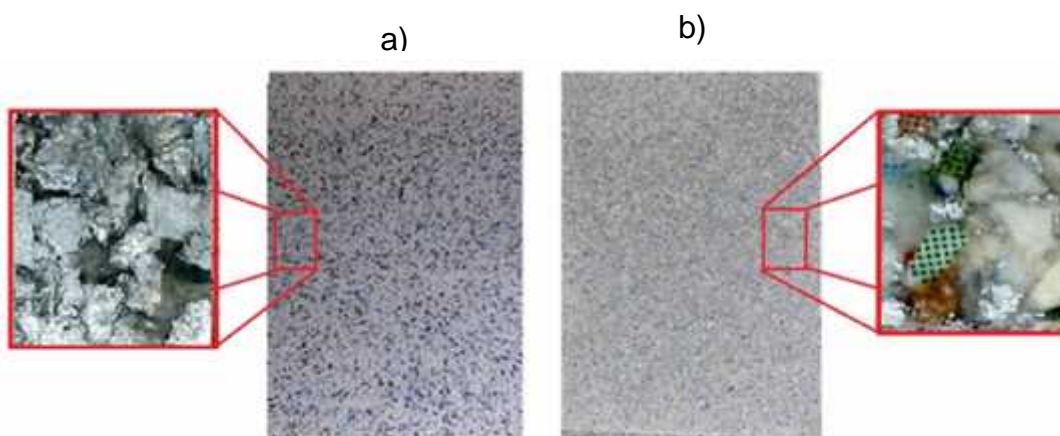


Figura 47. Núcleos a) PAL y b) PAR.

Los dos núcleos estudiados aquí PAR y PAL, se diferencian no solo en el aspecto visual sino también en que variaron su fracción volumen de sus respectivos constituyentes, quedando como se plasma en la Tabla 7. Se puede observar que el aluminio y el PE de baja densidad se encuentran en mayor cantidad en el núcleo PAL, el cual resulta con una densidad de 1.17 g/cm^3 , mientras que el núcleo PAR resulta con una densidad de 1.07 g/cm^3 . Cabe mencionar que el PE de baja densidad y el PE de alta densidad son parcialmente miscibles y obtiene buenas propiedades cuando las fases dentro del compuesto son continuas y se logra utilizando una cámara de mezclado^[74]. Sin embargo, aunque las fases sean continuas en los termogramas de DSC reportados en

mezcla de polímeros se observan claramente dos picos de fusión bien localizados^[74, 75]. Adicionalmente el núcleo PAR se encuentra presente en una mayor cantidad las fibras de celulosa (material polar) y los polímeros presentes en dicho núcleo no poseen compatibilizante alguno, por lo que el único mecanismo de adhesión es por anclaje mecánico^{[14][29]}.

Tabla 7. Fracción en volumen porcentual de los componentes de los núcleos PAR y PAL.

Núcleo	Papel	PE de baja densidad	Aluminio	PE de alta densidad	TOTAL
PAL	***	92	8	***	100
PAR	52.4	1.63	0.8	45	99.9

4.4. Consolidación del panel sándwich

Los paneles PAR y PAL que se obtienen por medio del proceso de consolidación poseen un espesor promedio de 3.9 mm y un peso de 476.3 g para el panel PAL y 464.3 g para el panel PAR. El peso ideal del material sería de 496 g y 466 g respectivamente; esto no se logra debido a las pérdidas del material al rectificar los bordes posterior al proceso de termo compresión y consolidado del panel sándwich. La Tabla 8 enlista los valores promedio de la composición que presentan los paneles PAR y PAL.

Tabla 8. Valores promedio de las propiedad de los paneles sándwich con núcleo PAR y PAL.

Sección	Panel PAR				Panel PAL			
	Masa g	Espesor mm	Peso %	Volumen %	Masa g	Espesor mm	Peso %	Volumen %
Núcleo	318.1	3.3	68.5	81.8	330.9	3.5	69.4	81.1
Aluminio	139.6	0.3	30.0	14.2	139.8	0.3	29.3	14.7
PE	6.6	0.1	1.4	3.9	6.6	0.1	1.3	4.1
Modificado								
Total	464.3				476.3			

De la Tabla 8 se observa que al utilizar los envases multicapa como núcleo en un material compuesto tipo sándwich, se obtiene un producto final que contiene en fracción volumen un 80% de material proveniente del reciclaje.

Aplicando la regla de las mezclas para calcular de forma teórica la densidad de los paneles, se obtiene; 2.7 g/cm^3 (Al), 1.075 g/cm^3 (Núcleo PAR), 1.17 g/cm^3 (Núcleo

PAL) y 0.91 g/cm^3 (PE modificado), para las láminas de aluminio, núcleo PAR, núcleo PAL y el adhesivo de PE modificado, respectivamente.

Para el panel PAL se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho_{Panel-PAL} &= \rho_{Al} V_{AL} + \rho_{Núcleo-PAL} V_{Núcleo-PAL} + \rho_{PE-modificado} V_{PE-modificado} \\ \rho_{Panel-PAL} &= (2.7)(.139) + (1.17)(0.81) + (0.95)(0.046) \\ \rho_{Panel-PAL} &= 1.36 \text{ gr} / \text{cm}^3 \end{aligned} \tag{16}$$

Para el panel PAR se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho_{Panel-PAR} &= \rho_{Al} V_{AL} + \rho_{Núcleo-PAR} V_{Núcleo-PAR} + \rho_{PE-modificado} V_{PE-modificado} \\ \rho_{Panel-PAR} &= (2.7)(.146) + (1.75)(0.849) + (0.91)(0.047) \\ \rho_{Panel-PAR} &= 1.30 \text{ gr} / \text{cm}^3 \end{aligned} \tag{17}$$

Los valores teóricos son muy similares a los valores que presentaron los paneles que fueron elaborados de manera experimental; el panel PAR presentó una densidad de 1.28 g/cm^3 y el panel PAL presentó una densidad de 1.35 g/cm^3 .

Los paneles PAR y PAL tienen densidades similares aunque su composición es muy diferente, el panel PAL tiene una concentración mayor de PE de baja densidad (con una pequeña fracción de polietileno adhesivo que une las láminas en el envase multicapa por medio de anclajes mecánicos^[28]), por lo que se espera que este polímero otorgue ductilidad al panel, en comparación con el panel PAR.

4.5. Caracterización térmica del núcleo de material reciclado

El registro de los datos de la prueba de transferencia térmica, empieza de manera inmediata al poner en funcionamiento el equipo. Posterior a un período de tiempo de aproximadamente tres horas, el equipo llega a la estabilización térmica y los valores de las temperaturas registradas permanecen constantes. En la Figura 48 se aprecia el diferencial de temperaturas que presentaron los núcleos PAR y PAL durante las pruebas de conductividad térmica. Se observa que en el núcleo PAR existe una mayor diferencia de temperaturas, lo que nos indica que este material tiene una menor conductividad térmica.

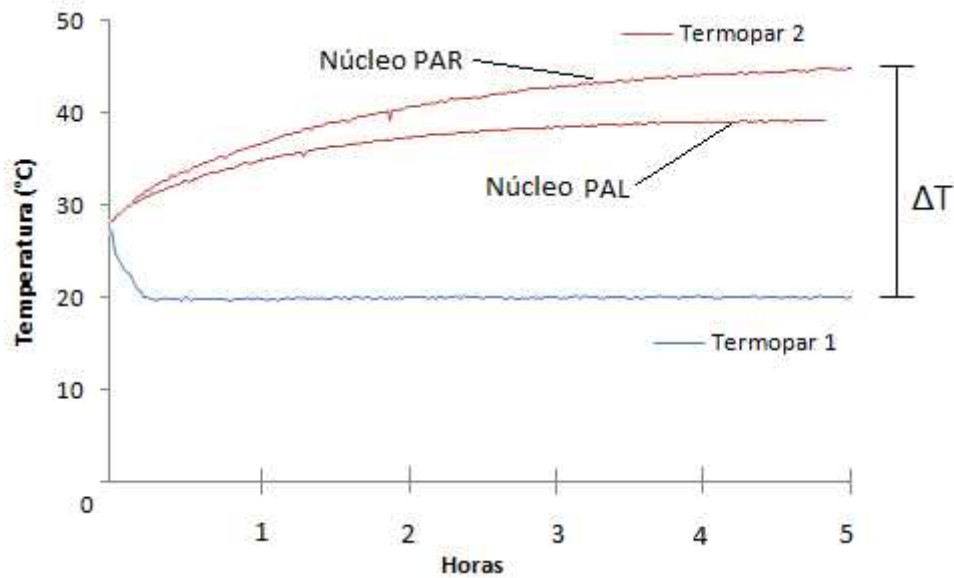


Figura 48. Gráfica del comportamiento térmico de los núcleos PAR y PAL.

La adquisición de datos se realizó cada minuto y se determinó que el sistema se encontraba en equilibrio térmico al tomar cuatro datos en intervalos de media hora, donde se presentó una variación térmica de menos del 1%. La Tabla 9 muestra los valores registrados en los intervalos de 30 minutos cuando el sistema se encuentra estable.

Tabla 9. Temperaturas registradas durante el estado estacionario del equipo.

Núcleo	Tiempo	V	A	T1	T2	T3	T4
PAR	Inicio	25	0.83	20.0	45.6	25.4	23.2
PAR	30min	25	0.83	20.0	45.7	25.1	23.0
PAR	60min	25	0.83	20.1	45.7	25.2	23.1
PAR	90	25	0.83	20.1	45.7	25.2	23.1
PAL	Inicio	25	0.83	20.0	39.5	26.4	23.0
PAL	30min	25	0.83	20.1	39.5	26.6	23.9
PAL	60min	25	0.83	20.3	39.5	26.4	23.3
PAL	90	25	0.83	20.0	39.4	26.5	23.6

Los voltajes (V) y las corrientes (A) registrados son los utilizados por la unidad de calentamiento. Estos datos son necesarios para poder calcular la potencia disipada por las resistencias. La T1 corresponde a la temperatura de la placa fría, la T2 es la temperatura de la placa caliente, la T3 corresponde al monitoreo de la temperatura del ambiente entre el equipo y el aislante externo y la T4 corresponde a la temperatura ambiente del laboratorio. Empleando la ecuación de la ley de

Fourier de calor con los datos de la Tabla 8, se obtienen las conductividades térmicas de los materiales. Para el núcleo de PAL fue de siguiente forma:

$$P = V * I$$

$$P = (25V)(0.83A) = 20.75WATTS \quad (18)$$

$$\Delta T = 19.4$$

$$\Delta T = 19.4$$

$$k = \frac{Ax * Q}{A * (T_1 - T_2)} = \frac{0.02m * 20.75W}{0.0625m^2 * (39.5^\circ C - 20.1^\circ C)} = 0.34 \frac{W}{m * k} \quad (19)$$

Para el cálculo de la conductividad térmica del núcleo PAR fue de la siguiente manera:

$$\Delta T = 25.5$$

$$k = \frac{Ax * Q}{A * (T_1 - T_2)} = \frac{0.02m * 20.75W}{0.0625m^2 * (45.6^\circ C - 20.1^\circ C)} = 0.26 \frac{W}{m * k} \quad (20)$$

Si la muestra es un compuesto, el cual pudiese contener porosidades o celdas vacías en la que el calor se pueda transferir en radiación y convección, además de conducción entonces se dice que la conductividad térmica ("k") es aparente^[76] La experiencia ha demostrado que los diferentes materiales almacenan calor de forma diferente y se ha definido que la conductividad térmica de un material como la capacidad que tiene para conducir calor. El aluminio posee una conductividad térmica elevada de 230 W/m K, mientras que en la conductividad térmica de PE de baja y alta densidad es de 0.45 y 0.52 W/m. k respectivamente. Sin embargo, la celulosa posee la menor conductividad térmica del material compuesto, la cual es de 0.13 W/m k (conductividad térmica para el cartón Kraft)^[15, 16, 77]. En los resultados de las pruebas de conductividad térmica, el núcleo PAR presentó una conductividad térmica aparente de 0.26 W/m k y la conductividad térmica aparente del núcleo PAL es de 0.34 W/m k. Los valores de la conductividad térmica nos indican que el núcleo de PAL transfiere el calor con mayor facilidad. Esto es congruente ya que el núcleo PAL se compone de un 92% en fracción volumen de PE y de un 8% en fracción volumen de aluminio, siendo éste material un buen conductor de calor. Por otro lado en el núcleo de PAR el aluminio solamente

representa el 0.9% del volumen total y está compuesto por un 52.4% en fracción volumen de celulosa (papel).

4.6. Impacto por caída de masa

La Figura 49 presenta las diferentes curvas obtenidas durante los ensayos de impacto a los paneles, impactados a energías de 5, 15 y 25 J. La muestra impactada con una energía de 5 J solo presentó indentación sin grietas en las caras de aluminio, obteniendo una curva sin aparente perturbación por alguna falla. En la curva del impacto con energía de 15 J, se presentaron dos picos (A y B); el punto A puede indicar el momento de la falla de la cara inferior de aluminio de la muestra. El punto B indica la falla del núcleo junto con la cara superior de aluminio, quedando así libre el camino para la penetración del impactor, congruente con la caída abrupta de la resistencia a del panel, donde la máxima carga alcanzada fue de 1.9 kN.

En la curva del impacto con una energía de 25 J el punto señalado con la letra C en la curva indica la máxima resistencia a la penetración equivalente a una fuerza de 1.95 kN. Esta energía es ya superior a la que la muestra puede soportar, reflejado en la disminución en el tiempo de residencia del impactor, y en consecuencia menor energía absorbida por el panel. Se puede observar cómo tanto para las energías de impacto de 15 J como para 25 J, la energía absorbida ya no incrementa, quedando en un valor máximo de alrededor de 1.9 kN.

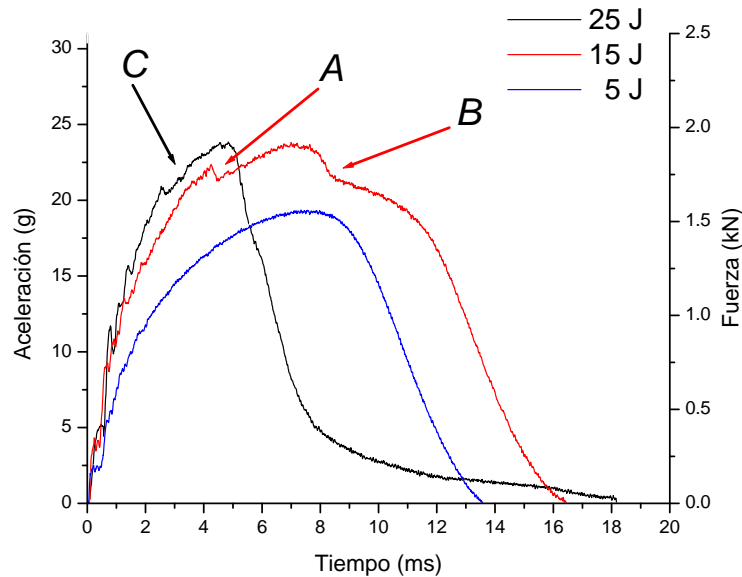


Figura 49. Gráficas de impacto en el panel PAR con energías de 5, 15 y 25 J.

La Figura 50 muestra un comparativo del comportamiento de impacto de los paneles PAR y PAL con una energía de 15 J. En la curva que presentó el panel PAL se muestra una curva sin ninguna perturbación aparente, a diferencia de la curva que presentó el panel PAR. Este último muestra evidencia de estar alcanzando la máxima resistencia a impacto, ya que se observan dos eventos en la curva, relacionados a las fallas, primero de la cara de aluminio y luego del núcleo, donde el panel presenta un daño en toda su estructura (Figura 53c).

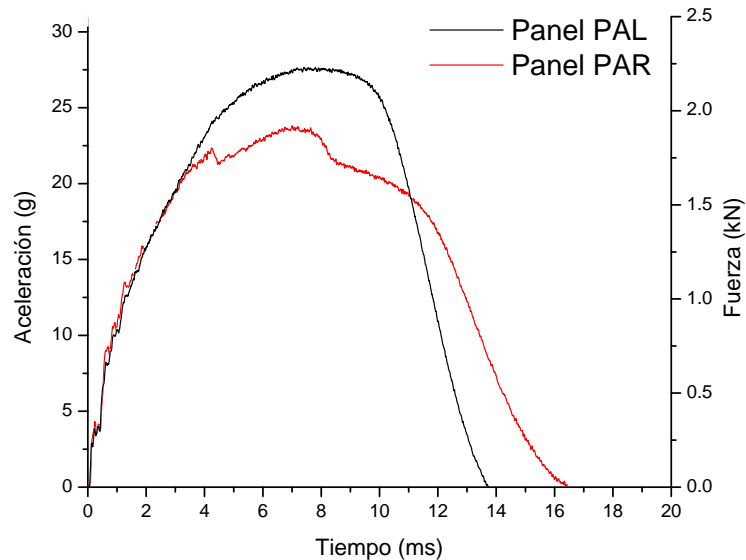


Figura 50. Impacto con una energía de 15 J.

En la Figura 51 se puede observar que con la energía de impacto de 25 J, en la cual los paneles PAR y PAL, existen diferentes valores de máxima resistencia a la penetración, así como de la deformación generada. El panel PAR soporta una carga máxima de 1.9 kN y el panel PAL soporta una carga máxima de 2.3 kN, es decir, un 21% más de carga. Posterior al punto donde el panel presenta su máxima resistencia, las muestras son penetradas en su totalidad. Se observa que el máximo desplazamiento registrado del panel PAR es de 4.95 mm y el máximo desplazamiento registrado del panel PAL es de 19.9 mm. Este último se desplaza un 300% más, lo que nos indica que en conjunto el panel PAL es más tenaz que el panel PAR.

En los resultados de la prueba de tensión reportados por Moo^[34] (panel PAR) y Farfán^[35] (panel PAL); el panel PAR reporta un esfuerzo máximo de 30.4 ± 1 MPa y una deformación de 2.78 ± 0.4 . El esfuerzo máximo correspondiente para el panel PAL es de 31.1 ± 1.2 MPa con una deformación de $4.72 \pm 0.7\%$. La diferencia entre los máximos esfuerzos en tensión es de tan solo el 3.1%; sin embargo, se puede apreciar que el panel PAL se deforma en mayor proporción en

comparación con el panel PAR, siendo esta diferencia en cantidad porcentual del 74%, el comportamiento es similar en la prueba de impacto en la cual se observó que el panel PAL tuvo un desplazamiento mayor.

En la Figura 51 también se observa el área bajo la curva de las gráficas de fuerza-desplazamiento que nos indica la energía que absorbe el panel al momento del impacto. El panel PAR impactado con una energía de 25 J solamente logra absorber 4.5 J de la energía de impacto antes de ser penetrada. El área bajo la curva de fuerza-desplazamiento del panel PAL impactada con la misma energía es mayor; el panel absorbe 17.4 J de energía es decir, un 286% más en comparación con el panel PAR antes de ser penetrada.

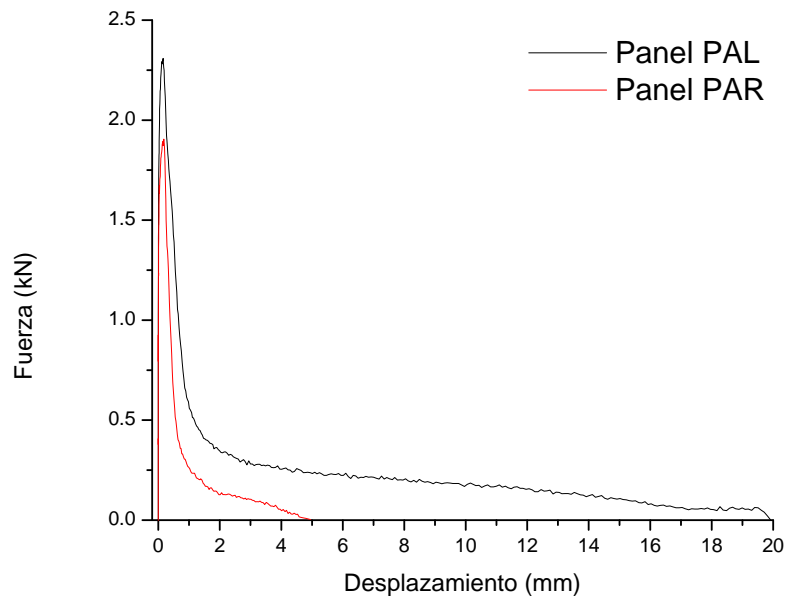


Figura 51. Gráfica Fuerza-Desplazamiento con una energía de impacto de 25 J de los paneles PAR y PAL.

La Figura 52 presenta los datos obtenidos de fuerza y desplazamiento durante los ensayos de impacto de los paneles PAR y PAL. Se puede observar una concordancia en relación a que el panel PAL es capaz de absorber mayor fuerza a cada nivel de energía empleado en los impactos (Figura 52a), en comparación al panel PAR, congruente con lo observado previamente. En la gráfica de la Figura

52b, se aprecia que el PAR es el que se deforma más, hasta el punto correspondiente a 20 J (se presenta la falla en gran parte de la estructura), desplomándose posteriormente para el valor de 25 J. Este último comportamiento está relacionado a la penetración del impactor, ya que el PAR no es capaz de soportar este nivel de energía, dejando pasar con mayor facilidad al impactor.

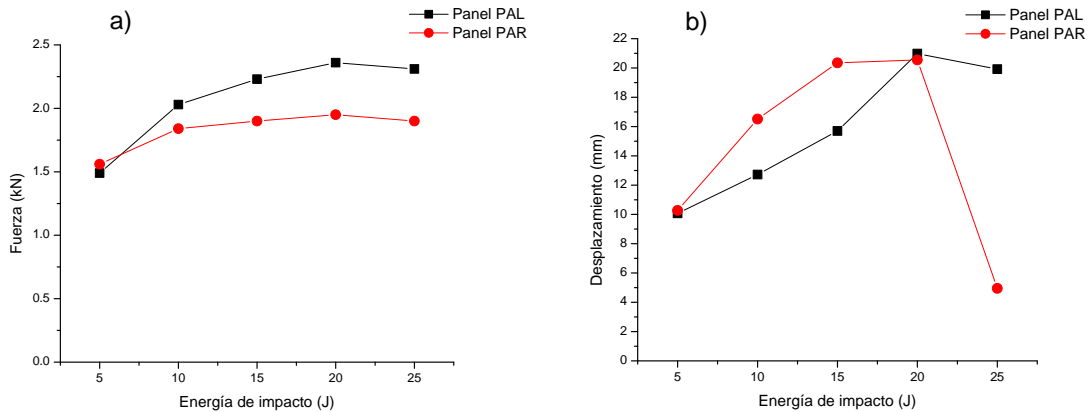


Figura 52. Fuerza y desplazamiento de los paneles PAR y PAL bajo diferentes energías de impacto.

En la Figura 53 se observa la sección transversal de los paneles ensayados a impacto por caída de masa con energías de 5, 10, 15, 20 y 25 J. Se observó que el panel presentó una ligera indentación sin presentar fractura alguna cuando se impactó con una energía de 5 J. El panel que se impactó con una energía de 10 J presentó fracturas en ambas caras de aluminio, aunque sin observar fractura o grietas en el núcleo del panel. Al incrementar la energía de impacto a 15 J, el panel presenta fractura en ambas caras de aluminio y se aprecia la formación de grietas en el núcleo, las cuales atraviesan la muestra de la cara inferior a la cara superior; el daño es mayor en el panel PAR. Al impactar el panel con una energía de 20 J se observa un daño significativo en la estructura del panel; el núcleo presentó fracturas debido al estiramiento que induce la formación de la indentación y fracturas en la cara de aluminio superior e inferior, observando un daño mayor en el panel PAR. Al impactar el panel con una energía de 25 J, se perfora el panel completamente, identificando así la máxima energía que la

estructura puede soportar previo a su perforación.

Las deformaciones generadas por efecto de los impactos en los paneles PAR y PAL resultaron ser muy parecidas. Sin embargo, el daño interno es diferente; el panel PAR sufre un daño interno mayor, lo cual se puede apreciar en la Figura 53. Sin embargo, ambos son penetrados cuando se impactan con energías superiores a 25 J.

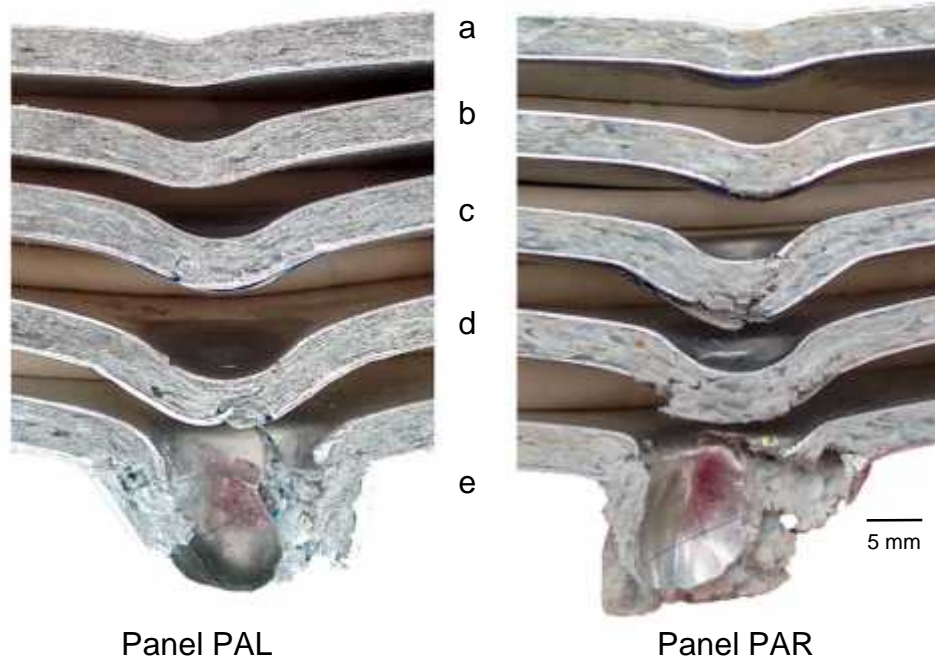


Figura 53. Sección transversal de los paneles impactados: a) 5 J, b) 10 J, c) 15 J, d) 20 J, e) 25 J.

En la Figura 54 se puede observar que la adhesión interfacial que existe entre las caras de aluminio y los núcleos PAR y PAL es buena debido a que el núcleo se queda adherido a la lámina de aluminio. Esto se debe a que el adhesivo de PE modificado, tienen una adherencia al aluminio tan alta que supera la cohesión del núcleo de los paneles^[19]. La falla que presentan los paneles PAR y PAL es cohesiva entre los constituyentes del núcleo, por donde se genera la propagación de las grietas en el panel.

a) Falla cohesiva en el núcleo



b) Falla cohesiva en el núcleo



Figura 54. Falla en los paneles, a) panel PAL, b) panel PAR.

Los resultados de las pruebas de impacto a los paneles PAL y PAR son similares a los reportados en trabajos de poliolefinas de desecho reforzadas con celulosa, en los cuales los autores concluyen que las poliolefinas reforzadas no son capaces de resistir una fuerza mayor o igual a las poliolefinas sin refuerzo. Esta disminución en la fuerza de impacto es común, debido a que las pequeñas fibras de celulosa impiden la disipación de la fuerza en la matriz polimérica. Con tan solo un 10% de celulosa presente en el compuesto, la resistencia al impacto se ve reducida hasta un 75%^[78]. Las fibras de celulosa poseen un micro estructura compleja como consecuencia de la longitud de la fibra, la cual si es demasiado corta (menor a una longitud crítica) las fibras serán arrancadas de la matriz ("pull out") más que fracturadas. Al igual que una adhesión pobre entre la matriz y las fibras podría ser la responsable de la pobre transferencia de carga entre la matriz y el refuerzo^[75, 79, 80]. Cabe mencionar que en el panel PAR no se encuentra presente un compatibilizante entre los polímeros y la fibra de papel, además de que las fases entre el PE alta y baja densidad es discontinua debido a que el proceso de conformado carece de cámara de mezclado con el fin de obtener una fase continua entre los polímeros. Esta morfología de separación de fases, afecta ampliamente las propiedades físicas y mecánicas del compuesto y compromete en gran medida la calidad de los productos obtenidos al existir una pobre interacción entre los componentes^[75, 81].

4.7. Flexión a tres puntos

El ensayo a flexión a tres puntos se realizó con una velocidad de

desplazamiento de cabezal de 3 mm/min y se detuvo el ensayo al presentarse la falla en el panel (Figura 55). La falla en el panel solamente se presenta en la cara inferior. Esta cara está sometida a tensión y la deformación del material es la que determina las propiedades mecánicas a flexión^[7, 60]. Al retirar las muestras de los soportes de la máquina de pruebas universales, estas presentaron deformación permanente, debido a que se rebasó la deformación elástica durante la prueba.

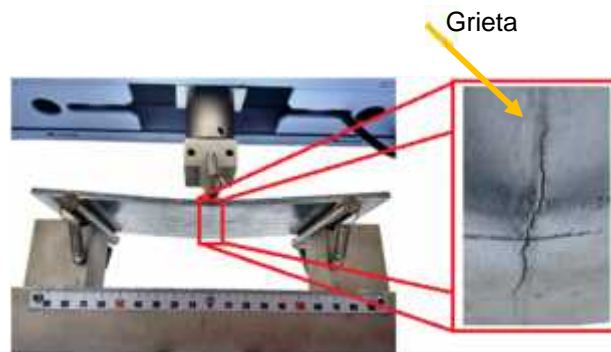


Figura 55. Falla que se presenta en la cara expuesta a tensión.

En la caracterización mecánica a flexión, se obtuvieron las curvas típicas de esfuerzo-deflexión. En la Figura 56 se aprecia que el comportamiento de los paneles PAL y PAR son muy similares, La zona elástica para ambos paneles se extiende hasta aproximadamente los 50 MPa (Zona en la cual se calcula el módulo de flexión), posterior a la zona elástica del material se presenta la zona plástica hasta alcanzar los 70 MPa (resistencia a la flexión) aproximadamente, para luego presentar la fractura en la cara inferior del material.

La resistencia a la flexión que presentó el panel PAL fue de 66.76 ± 1.6 MPa y el panel PAR presentó una resistencia a la flexión de 70.18 ± 1.5 MPa, es decir, una diferencia entre estos materiales de 5.12%. La máxima deflexión que presentó el panel PAL fue del 8.46 ± 0.94 mm y la máxima deflexión que presentó el panel PAR fue de 8.40 ± 0.94 mm. El panel PAL se deforma un 0.7% más que el panel PAR lo cual es una diferencia considerada no significativa.

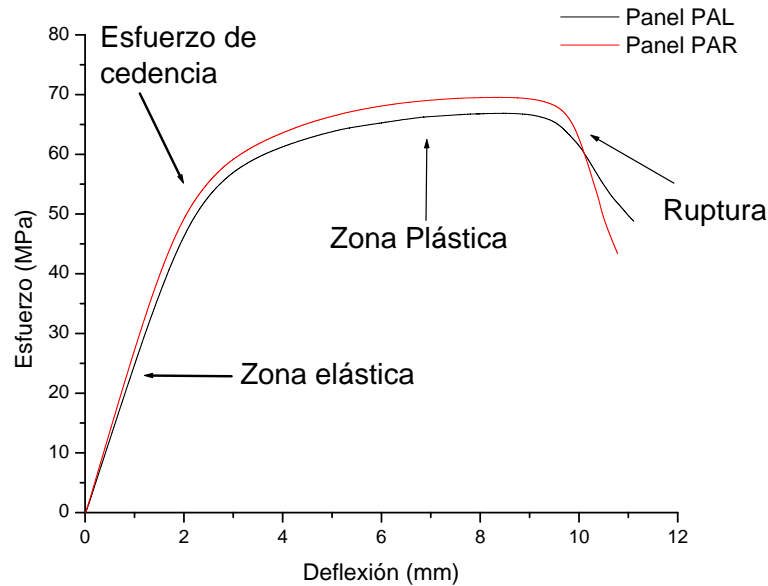


Figura 56. Curva esfuerzo de flexión para los paneles sándwich.

En la Figura 57 se observa una pequeña diferencia entre los módulos de flexión de los paneles PAL y PAR. El panel PAL presentó un módulo de flexión de 2.15 ± 0.3 GPa mientras que el panel PAR presenta un módulo de flexión de 2.42 ± 0.8 GPa, que equivale a una diferencia entre módulos de 13% aproximadamente, lo cual indica que el panel PAR es un poco más rígido.

El comportamiento de los módulos de flexión que presentaron los paneles PAR y PAL en flexión son similares a los resultados reportados por Moo^[34] y Farfán^[35] en módulos elásticos en las pruebas de tensión para los paneles PAR Y PAL, los cuales fueron de 4.6 ± 0.3 GPa (PAR) y 4.2 ± 0.2 GPa (PAL) respectivamente. Se observa que el panel PAR presenta un mayor módulo elástico, sin embargo, la diferencia es de 9.52% y las desviaciones estándar se traslapan.

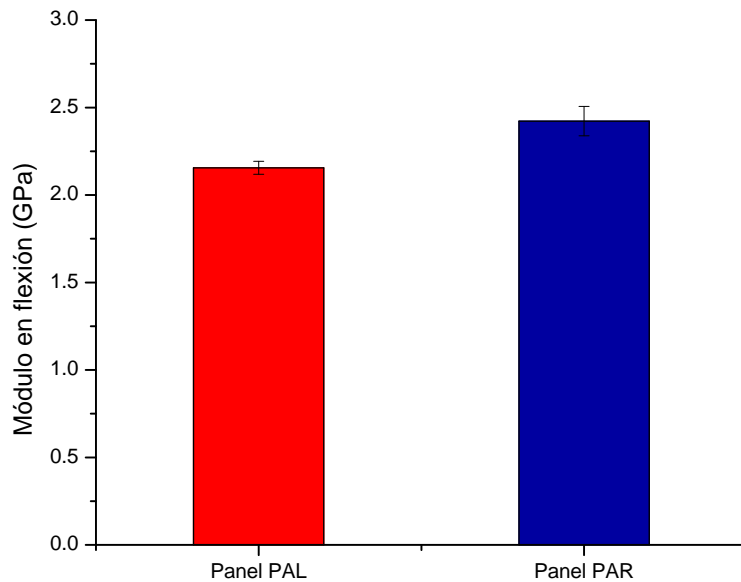


Figura 57. Módulos de flexión de los paneles.

Cruz^[62] reporta una resistencia a la flexión de 58 ± 2.8 MPa para su material tipo sándwich con caras de aluminio (aleación 1100 H14) y núcleo de Polialuminio con una configuración de 96% de polietileno de baja densidad y 4% de aluminio (configuración similar al núcleo PAL) usando materiales que se obtienen del reciclaje de envases multicapa para su elaboración^[62].

La resistencia a la flexión que presentó el panel PAL es mayor si se compara con la resistencia a la flexión reportado por Cruz^[62]. Esto se debe a que el panel PAL se constituye con una cantidad mayor de aluminio (20% en fracción peso), lo que hace más rígido al panel PAL. La resistencia a la flexión es un 15% mayor, como se puede observar en la Figura 58.

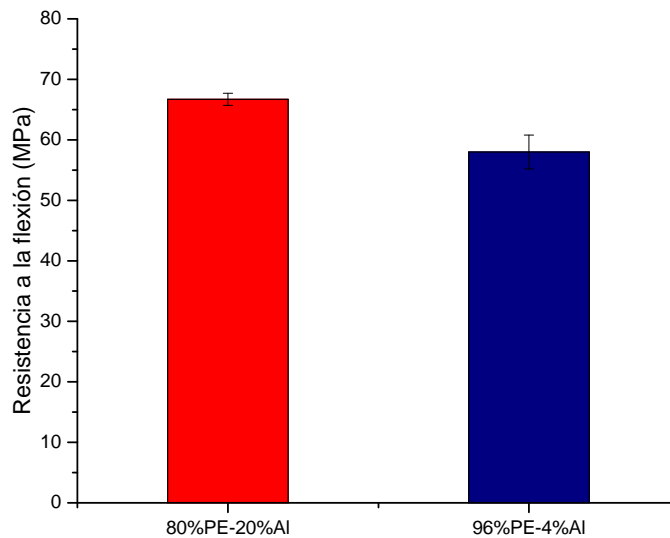


Figura 58. Resistencia a la flexión de las dos configuraciones de polialuminio.

La configuración del panel PAL que se presenta en este proyecto resultó ser la más adecuada debido a que esta configuración utiliza en su totalidad la cantidad de material que se recupera de los envases, posterior al proceso de hidropulpeo, a diferencia de la configuración que emplea Cruz^[62], en el cual el núcleo emplea 96% de polietileno y se genera un sobrante del material denominado polietileno con aluminio, al utilizar una mayor cantidad de polietileno con tinta.

A diferencia de las pruebas de impacto al ser esta prueba considerada cuasia estática la resistencia incrementa con el agregado de fibras en el material compuesto. Esto podría deberse a la aparición de mecanismos de absorción de energía, debido a la interacción matriz-fibra y fibra fractura^[79].

4.8. Caracterización del material rolando

La prueba de pelado se utiliza para determinar la resistencia en uniones adhesivas. Este método tiene dos ventajas que la diferencian con los demás métodos de prueba; la falla de la unión adhesiva se produce en un rango específico y la fuerza de pelado es una medida directa del trabajo de desprendimiento.

La prueba de pelado requiere que el adherente sea flexible, es decir que se puedan doblar. La prueba se realizó con una velocidad de separación constante de 254 mm/min. De la prueba de pelado se obtuvo la fuerza máxima que presenta la muestra con los diferentes radios de curvatura. La Figura 59 presenta la fuerza requerida para separar la cara metálica externa del núcleo del panel PAL. Se puede observar que la carga máxima que se requiere para separar la cara del panel sin rolado, fue de 151 ± 37 N, mientras que el panel con un radio de curvatura de 12 cm presentó una fuerza máxima de 87.2 ± 9.6 N; una disminución en la fuerza máxima del 42% aproximadamente. En panel con un radio de curvatura de 9 cm presentó una fuerza máxima de 116.4 ± 12 N, observándose un incremento (33%) con respecto a la muestra con un radio de 12 cm. Este incremento en la fuerza se puede atribuir en la reorientación de las cadenas macromoleculares debido al esfuerzo de tensión que se presenta en la cara convexa durante el proceso de rolado. El panel con un radio de curvatura de 6 cm considerado el mínimo radio de curvatura permisible, presentó una fuerza máxima de 107.2 ± 7.6 N, es decir, la fuerza disminuyó un 30 % aproximadamente en comparación con la fuerza que presentó la muestra sin rolar. Sin embargo, las diferencias en las fuerzas máximas que presentaron las muestras con diferentes radios de curvatura no son significativas debido a que las desviaciones que presentan las muestras se traslapan sin importar el radio de curvatura que presente el panel.

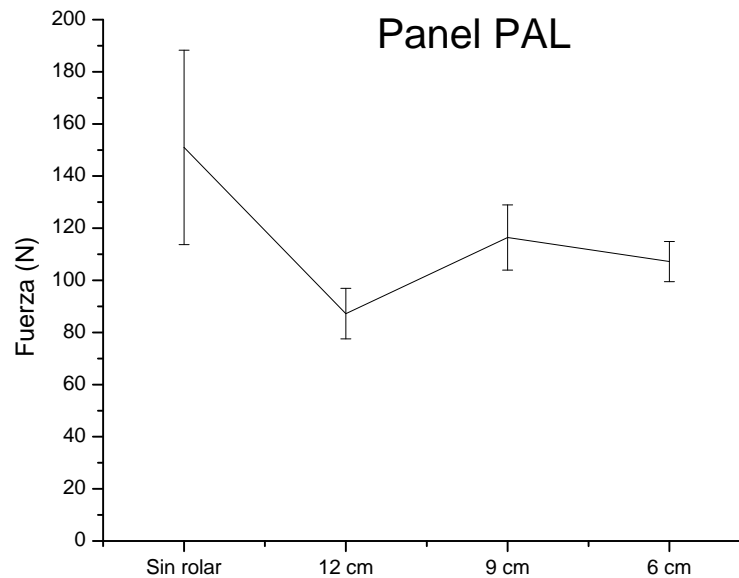


Figura 59. Máximas fuerzas generadas en los diferentes radios de curvatura en panel PAL.

La Figura 60 presenta la fuerza requerida para separar la cara metálica del panel PAR. Se puede observar que la máxima fuerza requerida para separar la cara del panel sin rolar es de 124.7 ± 45.1 N, mientras que el panel con un radio de curvatura de 12 cm presentó una fuerza máxima de 106.4 ± 19.2 N, es decir, una disminución del 14% aproximadamente en comparación con panel sin rolar. El panel con un radio de curvatura de 9 cm presentó una máxima fuerza de 99 ± 14 N una disminución del 20% aproximadamente con respecto al panel sin rolar. El panel con un radio de 6 cm considerado como el mínimo radio de curvatura permisible presentó una máxima fuerza de 90.4 ± 15.4 N, es decir, una disminución del 27% en comparación con la referencia sin rolar.

Se puede apreciar que el comportamiento del panel PAR presenta una tendencia a disminuir conforme disminuye el radio de curvatura. Sin embargo, al igual que en las muestras del panel PAL las desviaciones estándar se traslapan sin importar el radio de curvatura que presente el panel. Debido a este comportamiento la diferencia entre las máximas fuerzas que presentaron los paneles con los diferentes radios de curvatura no son significativas.

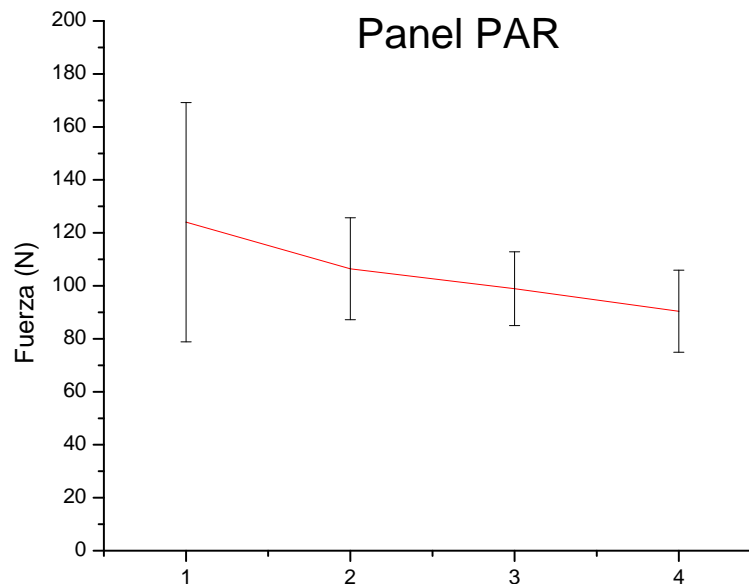


Figura 60. *Máximas fuerzas generadas en los diferentes radios de curvatura en panel PAR.*

La Figura 61 presenta un comparativo entre las máximas fuerzas que presentaron los paneles sin rolar y para los tres diferentes radios de curvatura estudiados en los paneles PAL y PAR. Los paneles PAL presentaron una fuerza mayor de aproximadamente un 20% en comparación con los paneles PAR, sin embargo, las desviaciones estándar que presentaron los paneles de PAR y PAL se traslapan por lo que las diferencias entre las máximas fuerzas promedio que existe no puede considerarse significativas. El incremento en la fuerza de adhesión del panel PAL en con un radio de curvatura de 9 y 6 cm con respecto al radio de curvatura de 12 cm, puede atribuirse al esfuerzo de tensión que se ejerce en la cara exterior del panel, el cual puede orientar las cadenas macromoleculares en dirección a la fuerza aplicada hasta el punto en que entren en juego los enlaces covalentes. Esta orientación incrementa considerablemente la resistencia pero desde luego solo en la orientación de las cadenas[7, 74].

En el panel PAR se constituye por una gran cantidad de PE de alta densidad (45%) y en particular da lugar a materiales más rígidos. Al aplicarle una fuerza de tensión el PE de alta densidad presenta una deformación menor. Las cadenas de

la sección amorfa se orienta con dirección a la fuerza aplicada y si la deformación prosigue se destruye el patrón esferulítico o la micela cristalina existente en el polímero Sin embargo, la resistencia que presenta el panel PAR al pelado es menor que la resistencia que presento el panel PAL. Esto se debe a que el núcleo PAR presenta fases discontinuas en la matriz polimérica (mezcla de PE de alta y baja densidad) con un contenido alto de fibras de celulosa. En la interfase de las fases discontinuas puede existir una separación (escala micro) de los mismos y existe una pobre interacción entre los componentes del sistema aunado a la presencia de fibras de celulosa, las cuales afectan las propiedades mecánicas [75, 82].

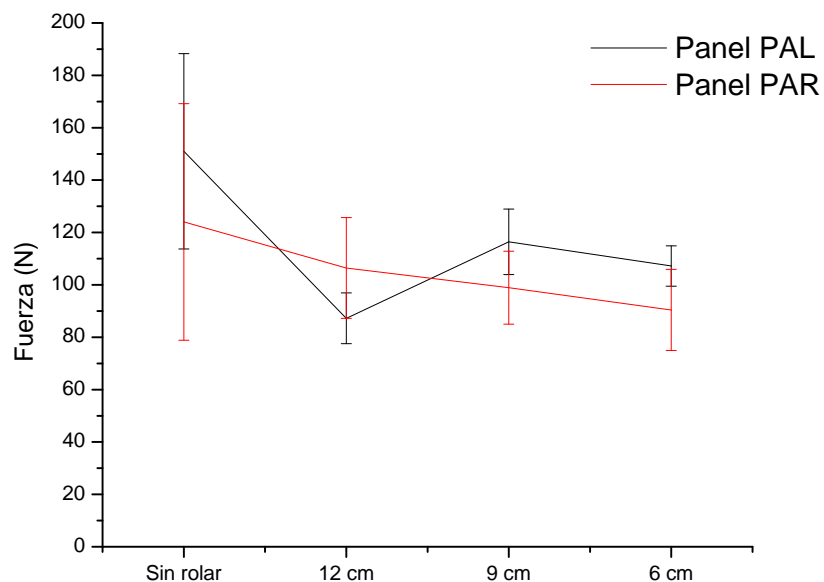


Figura 61. Comparativa entre las muestras de los paneles PAL y PAR.

La Figura 62 presenta una muestra del panel PAL sometidas a la prueba de pelado, en la cual se puede observar que el núcleo del panel presenta una falla cohesiva, este tipo de falla se presentó de igual forma en los paneles PAR. Este tipo de falla se debe a que los materiales que constituyen el núcleo de PAL y PAR únicamente presentan anclaje mecánico y en la adhesión de las caras se utiliza PE modificado lo que proporciona una mejor adhesión al núcleo^{[29][19]}. La falla

cohesiva del núcleo Este mecanismo de falla que se pudo observar en la prueba de impacto.

Observando las superficies de las muestras sometidas a la prueba de pelado, se puede decir que el adhesivo utilizado para unir las caras de aluminio al núcleo PAL y PAR no se ve afectado por la deformación plástica que se genera en el proceso de rolado para obtener los diferentes radios de curvatura.

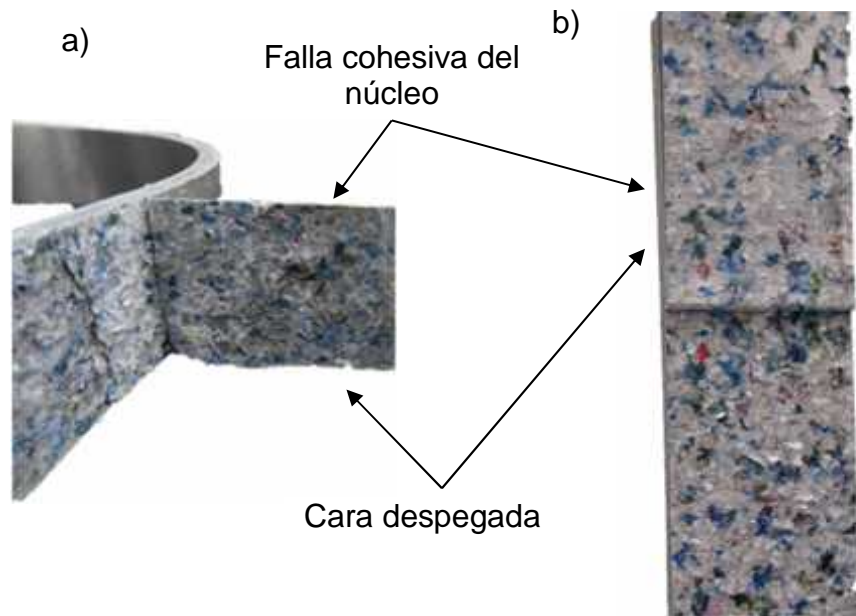


Figura 62. Modo de fallo en las muestras de pelado a) muestra con radio de curvatura de 6 cm, b) muestra sin rolar.

4.9. Resultado de exposición de intemperismo natural

Para este estudio las muestras estuvieron expuestas al ambiente durante 10 meses con la finalidad de poder observar algún cambio debido a los esfuerzos residuales que genera la deformación plástica que sufre el material durante el proceso de rolado, deformación por la cual el material conserva su curvatura. Al inicio de la exposición, los paneles PAL y PAR presentaban un diámetro de 22.2 cm en una temperatura de laboratorio de 23 °C.

Los paneles fueron monitoreados de forma visual periódicamente midiendo los radios de curvatura por medio de un vernier con el fin de observar un incremento

significativo en el mismo.

Posterior a los 10 meses los paneles rolados de PAL y PAR fueron retiradas del techo del edificio, lugar donde se realizó la exposición natural. Las muestras se colocaron sobre hojas con divisiones milimétricas para obtener una medición más precisa con una temperatura de laboratorio de 23 °C.

En la Figura 63 se puede observar que el panel PAL presentó un incremento de 0.2 cm en la parte que tenía contacto con el techo del edificio (base) y en la parte superior tuvo un incremento de 0.1 cm al finalizar el período de exposición externa. El panel PAR presentó un incremento en su radio de curvatura de 0.3 cm.

Durante el montaje de las muestras para el experimento de exposición natural, las muestras solamente se sujetaron con el fin de evitar que se movieran con el viento pero no se restringió su movimiento completamente. Por ese motivo se observa un pequeño incremento en su radio de curvatura.

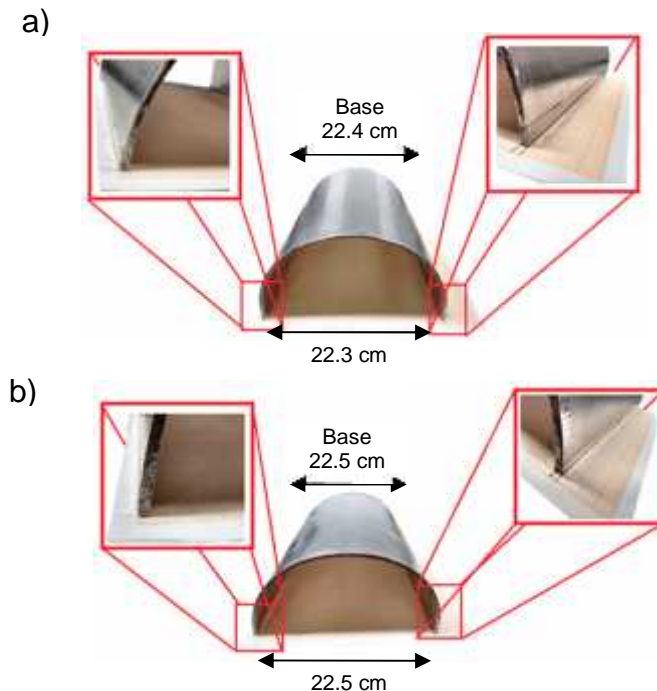


Figura 63. Medición de las muestras roladas posterior al periodo de exposición externa a) panel PAL, b) panel PAR.

El incremento en el radio de curvatura que presentaron las muestras puede ser

atribuido a los cambios de temperatura y/o consecuencias de los esfuerzos residuales debido a la deformación plástica que implica el proceso de rolado. Sin embargo, el incremento en el radio de curvatura solamente representa una diferencia del 1.35% en el panel PAR y un 0.9% en el panel PAL, siendo posible restringir el incremento en los radios de los paneles rolados por medio de sujeciones como tornillos, pijas y remaches^[41]. En conclusión, el cambio de radio otorgado originalmente para este estudio mostró ser mínimo por lo que se considera que el material mantuvo su posición original.

CONCLUSIONES

Este trabajo estudia un material compuesto tipo sándwich con la innovación de emplear un núcleo de material que se obtiene del reciclaje de envases multicapa de desecho y caracteriza sus propiedades de transferencia térmica, impacto, flexión y adhesión interfacial en el material previamente rolando.

Se identificaron las condiciones de procesamiento para el reciclaje de los envases multicapa y envases de PE de alta densidad apoyado de análisis térmicos (DSC), siendo la temperatura seleccionada óptima para el conformado de los paneles PAR y PAL de 150 °C, temperatura, en la cual tanto el PE de alta densidad, PE de baja densidad, el adhesivo de PE modificado alcanzan la temperatura de fusión y se observó en los núcleos PAL y PAR, que los polímeros presentes se aglutinaron adecuadamente con los demás componentes del envase multicapa.

En las pruebas de conductividad térmica se observó un menor coeficiente de conductividad térmica en el núcleo PAR, comparado con el núcleo PAL, esto debido a los componentes que lo conforman, donde la celulosa es un material aislante y se encuentra presente en una fracción volumen de 52.4% mientras que el aluminio solamente representa el 0.8%. Por otro lado en el núcleo PAL la celulosa no se encuentra presente, ya que fue separada para este arreglo; el aluminio representa el 8% en fracción volumen del núcleo teniendo en mayor cantidad un material conductor de calor, reflejado en las pruebas de conductividad térmica.

Los paneles PAL y PAR fueron evaluados ante impacto con un rango de energía de impacto de 5 - 25 J, donde interesantemente el comportamiento durante las pruebas de impacto fue similar para ambos paneles, los cuales fueron penetrados con energías superiores a los 20 J. El tipo de falla para ambos paneles resultó ser del tipo cohesiva entre los constituyentes del núcleo. Se observó que el área bajo la curva en el impacto de 25 J fue mayor en el panel PAL donde se aprecia una ligera diferencia al absorber más energía, atribuido a que panel PAL con tiene una mayor cantidad de polietileno de baja densidad.

En las pruebas de flexión a tres puntos, el panel PAR presentó una resistencia a la flexión de 5.12% mayor en comparación con el panel PAL y solamente una diferencia del 0.7% en la deformación, deformación que no puede ser considerada significativa debido a que las desviaciones estándar se traslapan por lo que se puede decir que ambos arreglos presentan niveles de deformación similares. Sin embargo, se observó que el módulo de flexión del panel PAR es mayor con una diferencia del 13% lo que nos indica que el panel es más rígido debido a los componentes que constituyen el núcleo: polímero semicristalino (PE de alta densidad) y papel (el papel le ofrece resistencia al envase multicapa).

Durante las pruebas de flexión a tres puntos se observó que todas las muestras del panel PAL y del panel PAR sometidas a esta prueba presentaron fractura en la cara que se encuentra sometida a un esfuerzo de tensión. Esta cara en particular es la que define las propiedades del material compuesto en flexión debido a que al presentarse la fractura en la cara la resistencia del material cae abruptamente. Cabe resaltar que se utilizó un aluminio comercial de baja deformación el cual limitó al material a mayores deformaciones, sin embargo, sería factible reemplazar el material por otro más dúctil si así lo requiriera su aplicación.

En las pruebas de rolado se pudo observar que estos presentaron una tendencia a disminuir su resistencia conforme reducía su radio de curvatura. También se observó que mientras más pequeño era el radio de curvatura se apreciaban más unas pequeñas estrías en la cara convexa del material rolado. Esto se debe a la deformación que sufre el material por el esfuerzo a tensión durante el proceso de rolado y está relacionado a la baja deformación del aluminio utilizado para este estudio.

Los valores de fuerza por adhesión que presentaron los paneles PAR y PAL sometidas a un radio de curvatura de 6 cm en el proceso de rolado, disminuyeron alrededor de un 30% en comparación con las muestras del panel sin rolar. Se observó que el modo de falla es cohesivo entre los constituyentes del núcleo, por lo que se puede concluir que la deformación plástica del material durante la prueba de rolado afecta en mayor grado al núcleo que al adhesivo.

Las muestras del panel PAL presentaron una mayor fuerza adhesiva, es decir, aproximadamente un 20% más en comparación con el panel PAR. Esto se atribuye a que el núcleo de PAR contiene fibras de papel y una fase discontinúa en los polímeros que conforman al núcleo, las cuales no presentan una buena adherencia con los polímeros presentes en el núcleo lo que redujo su resistencia interfacial.

Al finalizar la prueba de exposición a intemperismo natural, las muestras presentaron un incremento de un 1.3% aproximadamente en su diámetro de curvatura. El diámetro inicial pudo ser afectado por los cambios de temperatura y por efecto de los esfuerzos residuales generados por la deformación plástica producida durante el proceso de rolado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. El sol de México 2013: Científicos mexicano crean madera plástica, [on line], disponible en: <http://campusmexico.mx/2013/10/02/cientificos-mexicanos-crean-madera-con-propiedades-plasticas/> [acceso 7 de septiembre 2014].
- [2]. A. Hernández, Manejo de basura es preocupante [Online], disponible en: <http://sipse.com/milenio/manejo-de-basura-espreocupante-25711.html> [acceso 7 de septiembre 2014]
- [3]. Ecoescuela: reciclado de briks [Online], disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/nuevaandalucia/reciclad/recibriks.htm> [acceso 24 de abril 2014]
- [4]. H. Betancur, Plan de negocios para la creación de una planta de procesamiento de envases usados y desechos postindustriales de Tetra Pak, para la producción de láminas aglomeradas Tektan, Tesis de Licenciatura, Facultad de ciencias economías y administrativas, carrera de administración de empresas, Bogotá, 2009.
- [5]. F. García, Análisis de la generación de residuos sólidos urbanos de la ciudad de Xalapa, Veracruz, tesina de trabajo de experiencia recepcional, universidad Veracruzana, Facultad de biología-xalapa, Veracruz, 2008.
- [6]. Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales, Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales, [Online], disponibles en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/07_residuos/cap7_1.html [acceso 1 de octubre 2015].
- [7]. D. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 3 ed., USA, 1998.
- [8]. F. Carrasquero, Fundamentos de polímeros, escuela venezolana, para la enseñanza de la química, Mérida, 2004.
- [9]. L. Miler, R. Arriaga, L. García, Síntesis de Polímeros, Pesos moleculares, Conformación y configuración, Universidad de Coruña, pp. 10, 2005.
- [10]. J. William D. Callister, Ciencia e ingeniería de los materiales Barcelona, 1 Ed., Editorial Reverté, S. A. Utah, 2007.

- [11]. A. Besednjak, Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones: Universidad Politécnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politécnica, España, 2005.
- [12]. C. Hall, The MacMillan Press: Polymer Materials, London and Basingstoke, London, 1981.
- [13]. S. Kurtz, "The UHMWPE Handbook," Elsevier Academic Press, pp. 15, San Diego California, 2004.
- [14]. D. Landete, Mejora de la adhesión de poliolefinas mediante tratamiento superficial con radiación ultra violeta, Tesis de Doctorado, Departamento de química inorgánica, Universidad de Alicante, España, 2004.
- [15]. S. Paz, P. Arigada, Polietileno de alta y baja densidad, Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas Universidad de Chile, Chile, 2013.
- [16]. I. Roca, Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad, Tesis de licenciatura, Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2005.
- [17]. M. Guzman, E. Murillo, Funcionalización de polietileno de baja densidad con anhídrido maleico, Polímeros ciencia y tecnología, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia, 2014.
- [18]. P. Mutjé, F. Vilaseca, L. Granda, M. Delgado, PP, HDPE reforzado con fibras de cartón, [Online], Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/17641/TFMaster.pdf?sequence=1> [acceso 5 de octubre 2015].
- [19]. L. Tabor A. James, Mezclas de resinas de injertos de anhídrido maleico a base de polímeros de olefina mediante revestimiento por extrusión sobre sustratos de hojas metálicas, Patente, [Online] Disponible en: http://www.espatentes.com/pdf/2112276_t3.pdf [acceso 4 de abril de 2016].
- [20]. D. Briassoulis, M. Hiskakis, E. Babou, Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste, Waste Manag, vol. 33, pp. 6, 2013.
- [21]. S. Al-Salem, P. Lettieri, J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic

- solid waste (PSW): A review,” *Waste Manag*, vol. 29, pp. 10, 2009.
- [22]. C. Barlow D. Morgan, Polymer film packaging for food: An environmental assessment, *Resour. Conserv. Recycl*, vol. 78, 2013.
- [23]. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior “Plastics recycling: challenges and opportunities,” vol. 364, 2009.
- [24]. C. Barlow D. Morgan, ““Polymer film packaging for food: An environmental assessment,” *Resour. Conserv. Recycl*, vol. 78, 2013.
- [25]. G. Gallego, A. Georgantzis, Dominance in the Tetra Pak Case: An Empirical Approach, *European Journal of Law and Economics*, vol. 7, no. 2, pp. 137-161, 1999.
- [26]. Tetra Pak International S.A, Tetra Pak planea ampliar planta en Querétaro, 2014 [Online], disponible en: http://www.milenio.com/negocios/Tetra-Pak-planea-ampliacion-Queretaro-inversion-crecimiento-mexico-2013-2014_0_284371661.html, [Acceso 16 de septiembre 2015].
- [27]. Tetra Pak, Declaración ambiental, [Online] disponible en: http://ec.europa.eu/environment/emas/pdf/es_library/17.21_es_tetra_%20pak%20envases_04.pdf. [Acceso 25 de octubre 2015].
- [28]. Tetra Pak, Composición del envase, [Online] disponible en: <http://www.tetrapak.com/ar/envases/elsistemetetabrik/composici%C3%B3n-del-envase>, [Acceso 24 de abril 2015].
- [29]. D. Sanchez, Desarrollo de una tecnología de separación sustentable del envase multilaminado así como la separación de sus componentes y sus posibilidades de subproductos comerciales, Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional Mexico, 2013.
- [30]. A. Chug, Tectan reciclado de Tetra Pak, *Notas Científicas* 2003, [Online] disponible en: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/Vol6_n1/pdf/tectan.pdf, [Acceso 16 de octubre 2015].
- [31]. Verdek, Lámina Verdek para techo [Online] disponible en:

- http://www.verdek.com.mx/FichaTecnica_Verdek.pdf. [Acceso 3 de septiembre 2015]
- [32]. A. Sánchez, Transforman envases en casas, [Online] disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/transforman-envases-laminados-en-material-para-construir-casas.html>, [Acceso 3 septiembre 2015].
- [33]. M. Wired, Verdek reciclador de Tetra Pak® obtiene certificación de SCS Global Services para paneles de polialuminio reciclado para la construcción y celulosa kraft FSC®, [Online], disponible en: <http://www.marketwired.com/press-release/verdek-reciclador-de-tetra-pakr-obtiene-certificaci%C3%B3n-de-scs-global-services-para-paneles-1937976.htm>, [Acceso 3 septiembre 2015].
- [34]. J. Tec, Elaboración y caracterización mecánica de un material compuesto tipo sándwich con núcleo particulado Tetra Pak y caras de aluminio, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Motul, México, 2013.
- [35]. Á. Pérez, Obtención de laminados PEBD/Al a partir de desechos Tetra Brik, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico superior de Calkiní, Calkiní, Campeche 2013.
- [36]. M. Fayçal , Effect of the Impact Velocity on the Dynamic Response of E-Glass/Epoxy Laminated Composites, Arabian Journal for Science and Engineering, vol. 37, no. 2, pp. 413-419, 2012/03/01, 2012.
- [37]. D. Hull, Materiales compuestos, 1° ed., España, 1987.
- [38]. M. Han, S. Bang, J. Cho, S. Lee, Cho, C. The impact characteristics of a sandwich composite with an aluminum foam core," International Journal of Automotive Technology, vol. 14, no. 1, pp. 61-66, 2013/02/01, 2013.
- [39]. D. Lastres, Modelización analítica de paneles sándwich sometidos a impactos de baja velocidad, Escuela Politécnica de la Universidad Carlos III de Madrid, Madrid España, 2012.
- [40]. L. Castejon, M. Jimenez, A. Miravete, Characteristics of sandwich-type structural elements built of advanced composite materials from three dimensional fabrics, Universidad de Zaragoza, Dpto de Ingeniería Mecánica,

España, 1997.

- [41].Inor Soluciones Mecánicas, Fachadas ventiladas, [Online] disponible en: <http://www.inor.pt/?co=1736&tp=19&cop=1794&LG=2&mop=1797&it=pagina>, [acceso 24 de abril 2015]
- [42]. S. Soni, R. Gibson, and E. Ayorinde, "Characterization of Fatigue Behavior of Composite Sandwich Structures at Sub-Zero Temperatures," Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures, I. M. Daniel, E. E. Gdoutos and Y. D. S. Rajapakse, eds., pp. 605-624: Springer Netherlands, 2010.
- [43]. A. Nosier, R. K. Kapania, and J. N. Reddy, "Low-velocity impact of laminated composites using a layerwise theory," Computational Mechanics, vol. 13, no. 5, pp. 360-379, 1994/09/01, 1994.
- [44]. I. Daniel, J. Abot, P. Schubel et al., "Response and Damage Tolerance of Composite Sandwich Structures under Low Velocity Impact," Experimental Mechanics, vol. 52, no. 1, pp. 37-47, 2012/01/01, 2012.
- [45]. J. Lee, and C. Soutis, "Experimental Investigation on the Behaviour of CFRP Laminated Composites under Impact and Compression After Impact (CAI)," EKC2008 Proceedings of the EU-Korea Conference on Science and Technology, Springer Proceedings in Physics S.-D. Yoo, ed., pp. 275-286: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [46]. N. Mathivanan, J. Jerald, and P. Behera, "Analysis of factors influencing deflection in sandwich panels subjected to low-velocity impact," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 52, no. 5-8, pp. 433-441, 2011/02/01, 2011.
- [47].S. Ercilla, E. García, C. Muñoz,, Física general: Estática, cinemática y dinámica V2, Tébar, 2006.
- [48].S. Ercilla, E. García, C. Muñoz,, Física general: Estática, cinemática y dinámica V2, Tébar, 2003.
- [49].P. Hewitt, *Física conceptual*, 9ª ed., Mexico, 2004.

- [50].A. De Paula, and J. De Paula, *Química Física: Médica Panamericana*, 2007.
- [51].J. Ibañez., E Martin, J Zamarro, *Física*, Univerisad de Murcia, Madrid, 1989.
- [52].P. Tipler, G. Mosca, *Física para la ciencia y la tecnología*, Reverté, 2005.
- [53]. ASTM, Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event, 2012.
- [54]. ASTM, Standard Practice for Damage Resistance Testing of Sandwich Constructions, 2011.
- [55] J. Wilson, J. Buffa, *Física: Pearson Educación*, 2003.
- [56]. P. Compston, M. Styles, and S. Kalyanasundaram, A Comparison of Low Energy Impact Behaviour in Aluminium Foam and Polymer Foam Sandwich Structures, *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, O. T. Thomsen, E. Bozhevolnaya and A. Lyckegaard, eds., pp. 643-652: Springer Netherlands, 2005.
- [57].A. Schneider, J.Belis, E. Orué, S. Flores, Determinación de la conductividad térmica de un aislante, [Online], disponible en: http://fich.unl.edu.ar/CISDAV/upload/Ponencias_y_Posters/Eje03/Schneider_Retamar_Belis_Orue_Flores/DETERMINACION%20DE%20CONDUCTIVIDAD%20TERMICA%20EN%20AGLOMERADO%20AISLANTE.pdf, [Acceso 29 de abril 2015].
- [58]. T. Kawasaki, and S. Kawai, "Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors," *Journal of Wood Science*, vol. 52, no. 1, pp. 75-83, 2006/02/01, 2006.
- [59]. S. Srivaro, N. Matan, P. Chaowana et al., "Investigation of physical and mechanical properties of oil palm wood core sandwich panels overlaid with a rubberwood veneer face," *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 72, no. 5, pp. 571-581, 2014/09/01, 2014.
- [60] R. Ferdinand, P. Beer, J.DeWolf, *Mecánica de materiales 4° ed.*, China, 2007.
- [61].D. Pool, Caracterización físico-mecánica de aglomerados a base de TetraBrik con matriz de polietileno, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico superior

Progreso, México 20013.

- [62]. I. Cruz, Caracterización Mecánica de un Material Compuesto Tipo Sándwich Reciclado del Tetra Brik®, Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Motul, México, 2015.
- [63]. M. Hidalgo, M. Muñoz, K. Quintana, Análisis Mecánico del Compuesto Polietileno Aluminio Reforzado con Fibras Cortas de Fique en disposición Bidimensional, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Colombia, 2011.
- [64]. L. Castro, Condiciones técnicas para un correcto doblado, [Online] disponible en: <http://www.metalactual.com/revista/15/doblado.pdf>. [Acceso 8 de diciembre 2012].
- [65]. B. Calcagno, K. Hart, J. Springmann et al., Deformation and fracture of polymer/metal composites subjected to cold rolling, Composites Science and Technology, vol. 72, no. 12, pp. 1344-1351, 2012.
- [66]. J. Qiu, T. Murata, X. Wu et al., "Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials during the rolling process," Journal of Materials Science, vol. 48, no. 5, pp. 1920-1931, 2013/03/01, 2013.
- [67]. TetraPak. Cuadernillo de contenidos y sugerencias para el docente, [Online] disponible en: http://www.tetrapak.com/cl/DocumentBank/Cuaderno_docente_Tetra_Pak_C_hile.pdf, [Acceso 5 de mayo 2015].
- [68]. Almexa. "Ficha técnica del aluminio [online] disponible en: <http://www.almexa.com.mx/assets/downloads/Triptico-A4-Almexa3.pdf>. [Acceso noviembre 2016]
- [69]. A. Zubiaga, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Macromoléculas: Vol. 1: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 1982.
- [70]. W. Wang, F. Bu, Z. Zhang et al., "Performance of rice-hull-PE composite exposed to natural weathering," Journal of Forestry Research, vol. 21, no. 2, pp. 219-224, 2010/06/01, 2010.
- [71]. J. Fabiyi, A. McDonald, and D. McIlroy, "Wood Modification Effects on

- Weathering of HDPE-Based Wood Plastic Composites," Journal of Polymers and the Environment, vol. 17, no. 1, pp. 34-48, 2009/03/01, 2009.
- [72]. INEGI, Información por entidad [Online] disponible en: <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/territorio/clima>
- [73]. A. Zubiaga, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Macromoléculas: Vol. 2: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2000.
- [74]. J. Anderson, Ciencia de los materiales: Limusa, 1998.
- [75]. L. Gómez, Mezclas multicomponentes de poliolefinas/PS sin compatibilizar: reología, procesamiento y caracterización morfológica y mecánica, Tesis de Maestría, Universidad EAFIT, Medellín, 2012.
- [76]. J. Holman, P. Martínez, T. Leo Mena et al., Transferencia de calor: McGraw-Hill, 1998.
- [77]. J. Mark, Polymer Data Hand Book, p1012, 1998.
- [78]. A. Cepeda, D. Victoria, M. Ponce, T. Lozano, Materiales Reforzados de Poliolefinas Recicladas y nano fibras de Celulosa de Henequén, [Online] disponible en: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/OCT11/morales.pdf>, [Acceso Noviembre 2016].
- [79]. Á. Vera, B. Cetina, V. Analia. Comportamiento mecánico de compuestos de celulosa modificada/almidón reforzada con fibras sisal cortas," Jornadas Sam, [Online] disponible en: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/bariloche/Trabajos/A11/1104.PDF>, [Acceso Noviembre 2016].
- [80]. M. Solís, J. Lisperguer. Compuestos mixtos a base de plásticos y madera, [Online] disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/299/29901106.pdf>, [Acceso noviembre 2016].
- [81]. K. Šolc, Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices : Papers Presented at the Tenth Midland Macromolecular Meeting, Held August 18-22, 1980 in Midland, Michigan: MMI Press, 1982.
- [82]. A. Garcia, "Procesamiento y caracterización de mezclas tricomponentes de

polietileno de baja densidad, baja densidad lineal y etileno propileno dieno,”
Doctorado, División de Ciencias Básicas e Ingeniería Universidad Autónoma
Metropolitana, México, 1994.