



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

**ESTUDIO DEL DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO DE UN  
AGLOMERADO EXPERIMENTAL DE TETRA BRIK<sup>®</sup>  
RECICLADO EXPUESTO A INTEMPERISMO ACELERADO**

Tesis que presenta

**MARÍA DEL CARMEN CHAN KOYOC**

En opción al título de

**MAESTRO EN MATERIALES POLIMÉRICOS**

Mérida, Yucatán, Mayo 2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi familia por estar pendientes de mi y por su apoyo incondicional, en especial a mi madre Teresita por el valor mostrado para salir adelante a pesar de la adversidad y sobre todo, por su amor a lo largo de mi vida, a mi padre Bonifacio que a pesar de no estar presente físicamente siempre será una persona importante en mi vida y un ejemplo de hombre trabajador.

A mis hermanos Antonio y Santiago por su cariño y por el contagio mutuo de las ganas de salir adelante y ser mejores cada día. Así como, a mi hermana Isabel y su esposo Alberto por darme la oportunidad y los recursos para mi educación y por último a mis sobrinos, gracias por su apoyo en los buenos y malos momentos. Asimismo le agradezco a una persona muy importante, Francisco quien ha formado parte importante de mi vida apoyándome en los buenos y malos momentos.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), agradeciendo principalmente a mi director de tesis el Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, así como a mi co-director el Dr. Ricardo Herbé Cruz Estrada por todo el apoyo brindado en el desarrollo del proyecto.

A mi comité de revisión por su valiosa aportación para la mejora del trabajo, integrado por el Dr. Jorge Alonso Uribe Calderón, Dr. Carlos Rolando Ríos Soberanis, Dr. Felipe A. Carrillo Sánchez y al Dr. Ilan J. Adler. En especial al Dr. Jorge Alonso Uribe Calderón por sus enseñanzas y aportaciones en el tema de degradación.

De igual manera le agradezco al CONACYT por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

Finalmente doy gracias al MC. Ricardo Gamboa, al QI. Santiago Duarte Aranda

y a todos mis compañeros por la amistad que me brindaron a lo largo de este tiempo.

Carmen

## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE	iv
LISTADO DE TABLAS	viii
LISTADO DE FIGURAS	ix
RESUMEN	1
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	4
INTRODUCCIÓN	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
JUSTIFICACIÓN	8
HIPÓTESIS	9
OBJETIVOS	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	9
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	11
2.1. Conceptos fundamentales	12
2.2. Envase	12
2.2.1. Multilaminados	13
2.2.1.1. Envases multicapas de Tetra Brik®	14
2.3. Polímeros	15
2.3.1. Poliolefinas	18
2.3.1.1. Polietileno	18
2.3.1.2. Mezclas de polímeros	20

2.4. Residuos	23
2.4.1. Residuos sólidos urbanos	24
2.5. Reciclaje en la actualidad	26
2.5.1. Reciclaje de los polímeros	28
2.5.2. Reciclaje de los envases de Tetra Brik®	29
2.6. Definición de los materiales compuestos	30
2.6.1. Clasificación de los materiales compuestos	30
2.6.1.1. Aglomerados	32
2.6.2. Materiales compuestos comerciales con envases Tetra Brik®	32
2.7. Degradación de los polímeros	34
2.7.1. Tipos de degradación	36
2.7.1.1. Fotodegradación	37
2.7.2. Intemperismo acelerado	40
2.7.3. Intemperismo natural	42
2.7.4. Caracterización para el estudio de la degradación	44
2.7.4.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	44
2.7.4.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)	45
2.7.4.3. Flexión a Tres Puntos	46
2.8. Estudios previos de los envases Tetra Brik®	47
2.8.1. Estudios sobre el uso de los envases de Tetra Brik® para la obtención de materiales compuestos	47
2.8.2. Estudios sobre aglomerados de Tetra Brik® elaborados en la región	49
2.8.3. Estudios sobre la degradación	51

2.8.3.1. Estudios sobre degradación térmica de los envases Tetra Brik®	52
2.8.3.2. Estudios sobre la Fotodegradación	53
2.8.3.2.1. Fotodegradación del LDPE de los envases Tetra Brik®	53
III. MATERIALES Y MÉTODOS	57
3.1. Elaboración y caracterización de los aglomerados particulados obtenidos a partir de envases Tetra Brik®	58
3.2. Obtención de los aglomerados de Tetra Brik® reciclado	59
3.2.1. Separación y limpieza	59
3.2.2. Reducción del tamaño de partícula del material	59
3.2.3. Secado	59
3.2.4. Proceso de laminado	60
3.3. Preparación de las probetas para las pruebas físicas y mecánicas	63
3.3.1. Obtención de las probetas para la prueba de flexión a 3 puntos	64
3.3.2. Obtención de las probetas para la prueba de absorción de agua	65
3.3.3. Preparación de las probetas para los ensayos	66
3.3.3.1. Secado	66
3.3.3.2. Acondicionamiento	66
3.4. Caracterización de los aglomerados	67
3.4.1. Prueba mecánica de flexión a 3 puntos	67
3.4.2. Prueba de absorción de agua	68
3.4.3. Intemperismo acelerado	70
3.4.4. Intemperismo natural	73
3.4.5. Caracterización para el estudio de la degradación	75
3.4.5.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	75

3.4.5.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)	76
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.1. Obtención de los aglomerados de Tetra Brik® reciclado	79
4.2. Caracterización de los aglomerados	79
4.2.1. Prueba mecánica de flexión a 3 puntos	80
4.2.1.1. Estudio sin intemperismo	80
4.2.1.2. Estudios con intemperismo acelerado	82
4.2.1.3. Intemperismo natural	90
4.2.2. Prueba de absorción de agua	99
4.2.2.1. Sin intemperismo	99
4.2.2.2. Intemperismo acelerado	100
4.2.3. Estudio de la degradación	101
4.2.3.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)	101
4.2.3.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)	106
CONCLUSIONES	111
TRABAJOS A FUTURO	113
BIBLIOGRAFÍA	114

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del HDPE y LDPE.

Tabla 2. Principales tipos de degradación de polímeros y los agentes que lo provocan.

Tabla 3. Comparación de los factores que intervienen en las pruebas.

Tabla 4. Resultado de los análisis IR de los PE al ser sometidos a la irradiación.

Tabla 5. Parámetros de procesamiento.

Tabla 6. Distribución de las muestras para las diferentes pruebas.

Tabla 7. Cronograma de intemperismo acelerado.

Tabla 8. Cronograma de intemperismo natural.

Tabla 9. Comparación del módulo de ruptura de los diferentes materiales.

Tabla 10. Registro del porcentaje de absorción de agua.

Tabla 11. Comparación de la temperatura de fusión ( $T_f$ ) de los lotes expuestos a intemperismo acelerado.

Tabla 12. Comparación del índice de carbonilo de los lotes expuestos.

## LISTADO DE FIGURAS

- Figura 1. Comparación de la producción mundial por uso en el 2010.
- Figura 2. Arreglo de los envases Tetra Brik<sup>®</sup>.
- Figura 3. Comparación del consumo por tipo de material.
- Figura 4. Unidad de repetición del Polietileno.
- Figura 5. Micrografías de las morfologías obtenidas para las mezclas 45PS/45HDPE/10LDPE.
- Figura 6. Comparación de los módulos elásticos a flexión.
- Figura 7. Composición de los RSU por tipo de residuo en México.
- Figura 8. Comparación de la generación de RSU en México.
- Figura 9. Composición de los RSU reciclados valorizados en México.
- Figura 10. Mecanismo general de escisión de polímeros.
- Figura 11. Mecanismo general de la fotodegradación de polímeros.
- Figura 12. Esquema general de una prueba de flexión a tres puntos.
- Figura 13. Termograma (TGA) de descomposición de envases asépticos.
- Figura 14. Esquema de procesamiento para obtención de los aglomerados.
- Figura 15. Probetas de flexión.
- Figura 16. Probetas de absorción de agua.
- Figura 17. Prueba de flexión a tres puntos.
- Figura 18. Secado de muestras de absorción de agua.
- Figura 19. Inmersión de muestras para prueba de absorción de agua.
- Figura 20. Disposición de las probetas en los porta muestras de la cámara de intemperismo.
- Figura 21. Estructura elaborada para exposición de las probetas de flexión a intemperismo natural.
- Figura 22. Curva típica de la probeta L<sub>4,2</sub> con 0 h de exposición sometida a la prueba de flexión a tres puntos.
- Figura 23. Falla típica del material con 0 h de exposición después de la prueba de flexión a 3 puntos.

Figura 24. Curva típica del lote con 500 h de envejecimiento acelerado sometido a la prueba de flexión a tres puntos.

Figura 25. Muestras del lote 2 expuesto a 500 h de intemperismo acelerado.

Figura 26. Curva típica de la probeta L<sub>15,2</sub> con 1000 h de exposición sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

Figura 27. Muestras del lote 3 expuesto a 1000 h de intemperismo acelerado.

Figura 28. Curva típica del lote con 2000 h de irradiación sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

Figura 29. Muestras del lote 4 expuesto a 2000 h de intemperismo acelerado.

Figura 30. Comparación de muestras con y sin intemperismo acelerado, de izquierda a derecha a) 0 h, b) 500 h, c) 1000 h, d) 2000 h.

Figura 31. Curva típica de las muestras sometidas a la prueba de flexión a tres puntos con 8 semanas de exposición a intemperismo natural.

Figura 32. Muestras del lote 5 del material expuesto a 8 semanas de intemperismo natural.

Figura 33. Curva típica del lote con 16 semanas de exposición a intemperismo natural sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

Figura 34. Muestras del lote 5 del material expuesto a 8 semanas de intemperismo natural.

Figura 35. Comparación de la carga máxima promedio de las muestras a flexión.

Figura 36. Comparación del módulo de ruptura de los lotes sometidos a flexión a tres puntos.

Figura 37. Comparación del módulo elástico a flexión de los lotes sometidos a flexión a tres puntos.

Figura 38. Termograma DSC de las muestras sin intemperismo.

Figura 39. Comparación de termogramas DSC de las muestras sin intemperismo y con intemperismo acelerado.

Figura 40. Comparación de termogramas DSC de las muestras con intemperismo natural.

Figura 41. Comparación de espectros ATR-FTIR de las muestras con

intemperismo acelerado.

Figura 42. Comparación de espectros ATR-FTIR de las muestras con intemperismo natural.

Figura 43. Comparación del incremento del índice de carbonilo de los diferentes lotes.

## RESUMEN

Las tendencias para la obtención de nuevos materiales dependen de las condiciones económicas, sociales y culturales de un país. Una de las principales preocupaciones a nivel mundial es la búsqueda de nuevos materiales con mejores propiedades y menor costo de producción, así como una mayor conciencia ecológica.

El reciclaje a nivel mundial de envases post-consumo va en aumento y son empleados para fabricar papel reciclado de alta calidad, láminas y productos aglomerados. Centrándose en disminuir el deterioro del medio ambiente, se propone la producción de un material tipo aglomerado-particulado a partir de los envases multilaminados de desecho tipo Tetra Brik<sup>®</sup>.

En este proyecto se propone estudiar laminados particulados, elaborados con material de desecho para su aprovechamiento como madera plástica.

Para la obtención del laminado se procede a la recuperación, limpieza, reducción del tamaño de partícula y conformado por termo-moldeo. Las partículas obtenidas de los envases multilaminados se mezclan con partículas de HDPE reciclado, para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del laminado final.

Basándose en los criterios de uso real a los que puede estar expuesto el material, se realizaron pruebas de flexión a 3 puntos y de absorción de agua. De igual manera es importante mencionar que se sometieron a pruebas de intemperismo (acelerado y natural) y posteriormente se evaluó la disminución de sus propiedades mediante pruebas de flexión, así como su resistencia a la absorción de agua.

Los aglomerados obtenidos resultaron con características atractivas como buena resistencia mecánica e impermeabilidad al agua.

Entre las ventajas de estos tableros se tiene que su vida útil se estima superior a la madera natural, es libre de mantenimiento y posee facilidad para el corte y ensamblado. Aunado a lo anterior el material posee el factor del cuidado medioambiental, debido a que mediante el reciclaje se contribuye a la protección

al ambiente reduciendo la tala de árboles.

## **ABSTRACT**

Trends for obtaining new materials depend on the economic, social and cultural conditions of a country. One of the main concerns worldwide is the search for new materials with improved properties, lower production costs and increased environmental awareness.

Worldwide recycling post-consumer packaging is increasing and is used to manufacture high-quality recycled paper and particleboard products. Focusing on reducing the deterioration of the environment, the production of an agglomerate-type particulate material from the waste containers multilaminates Tetra Brik type is proposed.

In this project it is proposed to study particulate laminates made with waste material for use as a wood plastic.

In order obtain the laminates it was implemented the recovery, cleaning, reduction of particle size and consolidation by thermo-molding. The particles obtained from the packaging multilaminates were mixed with recycled HDPE particles to improve the physical and mechanical properties of the final laminate.

Based on the criteria of use to which the material may be exposed, three points bending tests and water absorption were performed. Additionally they were aged (accelerated and natural) and subsequently evaluated at flexure to observe any decrease in properties, as well as water absorption response.

The agglomerates obtained resulted with attractive features such as good mechanical strength and impermeability to water.

Among the advantages of these agglomerates it is the estimated useful life superior that natural wood, its maintenance free and the facility to cutting and assembly it. In addition to this we mention that the material has an environmental factor, because related to recycling and creating new material that contributes to environmental protection by reducing deforestation.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

El cuidado del medio ambiente se enfoca en torno a la reutilización y reciclaje de los materiales, lo cual se traduce en un incremento en el ahorro de energía debido a que se requiere una menor cantidad de tiempo para el procesamiento de los materiales, así como de una menor cantidad de agua y otros recursos naturales; lo anterior se podría ver reflejado en la disminución del costo en el producto final. Actualmente, ha tomado mayor importancia la necesidad de reciclar los diferentes materiales, por lo tanto, las tendencias actuales se enfocan en el desarrollo de nuevos materiales que sean económicos y ecológicos, tratando de aprovechar los recursos y la mano de obra local.

De acuerdo con la empresa Tetra Pak<sup>®</sup>, se recolectaron aproximadamente 43000 millones de envases a nivel mundial en 2013, observándose un incremento del 24.5% en la recolección de envases en comparación con el 2012 <sup>[1]</sup>.

En torno a las cifras anteriores, la principal problemática que se presenta para la recuperación de los envases, en países en vías de desarrollo es la falta de adopción por completo de la cultura del reciclado, por lo que la cantidad de material que se recolecta en estos países es bajo en comparación con países desarrollados.

Debido al poco aprovechamiento de los materiales de desecho, se propone la caracterización de un aglomerado de envases multilaminados, conocidos como Tetra Brik<sup>®</sup> para su posible uso para obtener un material alternativo sustituto de los aglomerados de madera.

Con la elaboración de un material a base de Tetra Brik<sup>®</sup>, se presenta la oportunidad de aportar una mejor opción para el reciclaje de éstos envases. El uso de estos envases como materia prima representa una alternativa al problema ecológico que ocasionan las alrededor de 112 mil toneladas de desecho, que de acuerdo a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en su informe anual 2012 se producen diariamente en el país <sup>[2]</sup>. Asimismo, con esta propuesta de reciclaje se puede contribuir a evitar la saturación de los depósitos de residuos sólidos existentes <sup>[3]</sup>.

De acuerdo con información obtenida de estudios previos realizados en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), así como de las fichas técnicas de materiales comerciales existentes como el Tectán<sup>®</sup> y Ecoplak<sup>®</sup>, los aglomerados que se producen a partir de los desechos de Tetra Brik<sup>®</sup> pueden cortarse, pegarse y armarse como la madera, por lo tanto los aglomerados hechos a partir de dichos envases pueden emplearse como sustitutos de la madera en paredes falsas, techos, andamios y muebles, entre otros usos.

Actualmente, en la industria mueblera y de la construcción el material más empleado es la madera, la cual tiene como principal desventaja que con la presencia de humedad normalmente conduce a problemas de hinchamiento, proliferación de hongos e insectos, debido a que la madera por su naturaleza es propensa a la absorción de agua y al ataque de microorganismos. Considerando lo anterior, el principal atractivo para el empleo de estos envases es la presencia del polietileno en los envases Tetra Pak<sup>®</sup>, debido a que contribuye a evitar la absorción de humedad presente en el ambiente, por lo tanto al usar dichos envases para la elaboración de los aglomerados se disminuiría el ataque de ciertos microorganismos. De acuerdo con Schnabel la humedad es uno de los principales factores que propicia el crecimiento de microorganismos <sup>[4]</sup>.

En consideración a los problemas medio ambientales actuales, la importancia de este trabajo radica en la propuesta de la elaboración de un material compuesto utilizando como materia prima desechos domésticos contribuyendo a la conservación del medio ambiente.

Como parte de los estudios propuestos, el material aglomerado se sometió a una degradación mediante la exposición a intemperismo acelerado, para observar cambios físicos y sus propiedades mecánicas. Se optó por el intemperismo acelerado debido a que, al evaluarse de manera natural requeriría demasiado tiempo de exposición para que se presenten dichos cambios. Aunque, cabe mencionar que se conto con dos lotes expuestos a intemperismo natural, pero solamente para poder hacer un comparativo inicial ya que el tiempo de exposición de estas muestras fue corto. Se realizó un análisis de la estabilidad térmica del

material, así como pruebas de flexión y de absorción de agua para establecer tanto similitudes como diferencias entre este material propuesto y los conocidos como los aglomerados de madera.

Los resultados de la caracterización de las muestras sometidas a los ensayos de envejecimiento acelerado y natural mostraron un incremento en el porcentaje de cristalinidad y una disminución de en la temperatura de fusión a medida que aumentaba el tiempo de exposición.

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio el tiempo y el tipo de irradiación afecta en gran medida la degradación del material, debido a que las muestras con intemperismo acelerado presentaron una disminución mayor de sus propiedades mecánicas a flexión en comparación con las muestras sometidas a intemperismo natural.

En el caso de las pruebas de absorción de agua, a medida que incrementó el tiempo de exposición las muestras presentaron un incremento en el porcentaje de absorción de agua. La región expuesta a intemperismo natural presentó una disminución de color menor en comparación con las sometidas a intemperismo acelerado.

En ambos casos (intemperismo natural y acelerado), durante las primeras horas de exposición, el índice de carbonilo tiene los valores más bajos y posteriormente empieza a incrementar a medida que aumenta el tiempo de exposición, lo cual concuerda con la disminución de las propiedades mecánicas a flexión con períodos prolongados de exposición.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A pesar de la capacidad hidrofílica que presenta la madera y que generalmente conduce a problemas con hongos e insectos, así como una disminución en las propiedades mecánicas, actualmente la industria mueblera y de construcción basa su producción en el uso de la misma como materia prima en la elaboración de paredes falsas, techos, andamios y muebles en general.

Actualmente, entre las principales preocupaciones a nivel mundial está la

búsqueda de nuevos materiales con mejores propiedades, menor costo de producción y que se reduzca de igual manera la excesiva tala de árboles.

De acuerdo con todo lo anterior, con el desarrollo del presente proyecto se obtienen datos sobre las propiedades mecánicas a flexión del aglomerado y se establecen similitudes entre el material propuesto y los aglomerados que ya se encuentran de manera comercial. En este sentido es importante mencionar que, dicha comparación se realiza entre aglomerados elaborados a partir de envases multilaminados, así como de madera. De igual manera se evalúa la influencia de factores ambientales sobre las propiedades de los materiales propuestos y el de referencia. Es decir, el aglomerado se expone a un proceso de intemperismo acelerado para evaluar el proceso de fotodegradación de sus constituyentes y su repercusión sobre las propiedades mecánicas del mismo.

Otro factor de interés es la capacidad de absorción de agua, donde se requiere evaluar el efecto de la presencia de cada constituyente (papel, polietileno y aluminio) sobre la capacidad hidrofílica del aglomerado. En este sentido se espera que tanto el polietileno como el aluminio reduzcan la absorción de agua y en consecuencia, también disminuya el ataque de hongos e insectos.

Con el establecimiento de las similitudes y diferencias entre el material propuesto y los aglomerados comerciales, será posible sugerir la alternativa de uso del presente aglomerado, en sustitución de la madera, de esta manera se podría disminuir el índice de deforestación y reducir la acumulación de algunos desechos sólidos.

## **JUSTIFICACIÓN**

El crecimiento acelerado de la población se manifiesta en el mayor consumo de productos y por lo consiguiente un incremento en la generación de residuos, el proyecto se centra en el cuidado del medio ambiente en torno al reciclaje de materiales.

Las tendencias para la obtención de nuevos materiales dependen de las condiciones económicas, sociales y culturales. Una de las principales

preocupaciones a nivel mundial es la búsqueda de nuevos materiales con mejores propiedades y menor costo de producción.

Los aglomerados que se obtienen a partir de dichos envases tienen como características principales su impermeabilidad y su calidad comparable a la de los aglomerados de madera comunes.

Un factor importante para la realización de este estudio fue que actualmente no se cuentan con estudios del comportamiento de los aglomerados elaborados con envases multicapa al ser sometidos a agentes abióticos que pudieran cambiar sus propiedades mecánicas. En estudios realizados en el CICY solamente se ha reportado los parámetros para la elaboración de los aglomerados y la evaluación de sus propiedades mecánicas, mediante pruebas de tensión y flexión.

## **HIPÓTESIS**

Los materiales elaborados a partir de envases tipo Tetra Brik<sup>®</sup> poseen propiedades comparables a las de los aglomerados que se encuentran de manera comercial, con un buen desempeño mecánico y baja absorción de agua.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar los cambios en la resistencia a la flexión de aglomerados elaborados con envases multicapa de desecho, así como la absorción de agua al ser expuestos a intemperismo acelerado.

### **Objetivos específicos**

- ♦ Elaborar aglomerados a partir de envases multicapa de desecho para su caracterización físico-mecánica.
- ♦ Someter las muestras de aglomerado a procesos de intemperismo acelerado.
- ♦ Evaluar mecánicamente la resistencia a flexión de los aglomerados antes y después de ser sometidos a intemperismo acelerado y natural.
- ♦ Determinar la absorción de agua de las muestras de aglomerados antes y

después de ser expuestas a intemperismo acelerado.

- ♦ Analizar el cambio de morfología superficial debido al intemperismo acelerado y natural.

## **CAPÍTULO II. ANTECEDENTES**

## 2.1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

### 2.2. Envase

La industria del envase y embalaje es una pieza fundamental en la economía mexicana; este sector representa el 1.5% del Producto Interno Bruto (PIB), 5.5% del industrial y 8.7% del manufacturero.

De acuerdo con la Asociación Mexicana de Envase y Embalaje (AMEE) existen 220 productos de botellas y otros contenedores de plástico <sup>[5]</sup>.

De manera general, se puede decir que un envase, es cualquier recipiente que tiene contacto directo con un producto. Cabe mencionar que un envase tiene la función de ofrecer una adecuada presentación, facilitando su manejo, conservación, transporte, almacenaje, manipulación y distribución.

Actualmente, existe una gran diversidad de materiales que son empleados para la producción de envases. Entre los materiales que se emplean para la producción de envases se encuentran:

- ♦ Madera
- ♦ Metal
- ♦ Vidrio
- ♦ Plástico
- ♦ Papel

En función de la evolución que han tenido los envases, hoy en día se han combinado los materiales mencionados anteriormente para la producción de un sólo envase. Estos envases están formados por dos o más materiales que aportan alguna cualidad al producto y son conocidos como empaques compuestos <sup>[6,7]</sup>.

Cada año en México se consumen hasta 8 millones de toneladas de plástico, de las cuales 5 millones se transforman en procesos diversos para la industria de empaque y embalaje, automotriz, eléctrica, electrónica y agricultura entre otros <sup>[8,9]</sup>.

En este sentido, en cuanto a los usos de los polímeros en el mundo, la aplicación más común es la de empaques y embalajes, que representa un 37% del total. Después, se encuentra la industria de la construcción con 21% del total, en

tercer lugar se ubica la automotriz con el 8%, seguido de la electrónica con 6%.

En México de igual manera en primer lugar se tiene a la industria del embalaje con un 48%, seguido de la industria de la construcción con un 12% y eléctrica con 6% como se puede observar en la Figura 1<sup>[10]</sup>.

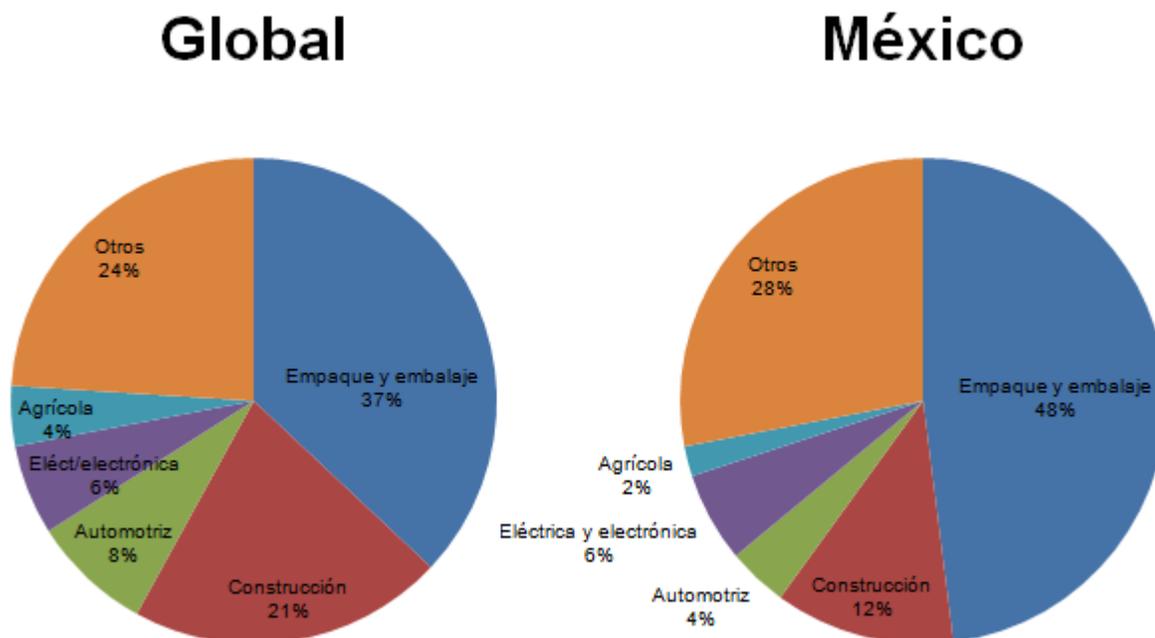


Figura 1. Comparación de la producción mundial por uso en el 2010.

### 2.2.1. Multilaminados

En esta categoría se encuentran los envases compuestos que son fabricados por la combinación de dos o más elementos. Son caracterizados principalmente por su elevada resistencia en todas las direcciones (isotrópicos), siendo además ligeros y de bajo costo<sup>[11,12]</sup>.

Este tipo de envases adquiere las características combinadas de los elementos que lo conforman y puede en función de esto ser flexible o tener cierto grado de rigidez. Entre los multilaminados con cierto grado de rigidez se encuentran los envases tipo Tetra Brik<sup>®</sup>, también denominados envases multicapas<sup>[12]</sup>.

En este sentido, en la producción de papel y cartón existe una producción destinada para alimentos pasteurizados y ultra pasteurizados, dichos envases son

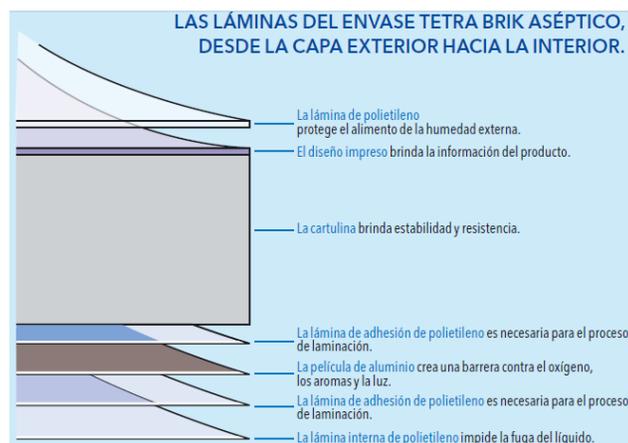
fabricados principalmente por Sig Combibloc y Tetra Pak <sup>[13]</sup>.

#### 2.2.1.1. Envases multicapas de Tetra Brik<sup>®</sup>

Los envases de la marca Tetra Pak<sup>®</sup> son ampliamente utilizados en todo el mundo como un material de envasado aséptico, actualmente se utiliza para el embalaje seguro de los productos alimenticios sin necesidad de refrigeración o conservación.

Estos envases, generalmente utilizados para leche, jugos y otros productos alimenticios, son los más vendidos 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 leche y jugos sin necesidad de refrigeración ni conservadores, y manteniendo todas sus propiedades nutritivas <sup>[14,15]</sup>.

Los envases Tetra Brik<sup>®</sup> reciben este nombre por estar formados por 7 capas de tres materiales: papel Kraft, polietileno de baja densidad (LPDE) y aluminio. Las capas se disponen en el siguiente orden: dos capas de polietileno, aluminio, polietileno, cartón y dos capas más de polietileno (ver Figura 2) <sup>[3,15]</sup>.



**Figura 2.** Arreglo de los envases Tetra Brik<sup>®</sup> <sup>[16]</sup>.

Los envases están constituidos aproximadamente por 75% de cartón el cual proporciona rigidez y resistencia, el polietileno de baja densidad representa un 20% del peso del envase que funciona como adhesivo e impermeabilizante y por último el aluminio representa el 5% del peso que actúa como barrera de la luz y

oxígeno. En 2007, más de 137 mil millones de envases fueron producidos y enviados en todo el mundo, mientras que en 2008 esta cifra aumentó a 141 mil millones <sup>[15,16,17]</sup>.

### **2.3. Polímeros**

Desde que se inventaron los primeros polímeros o también conocidos como plásticos, su uso ha aumentado de forma gradual, hasta convertirse en materiales insustituibles en la sociedad actual. La mayoría de los plásticos utilizados hoy en día se fabrican a partir del procesamiento de combustibles fósiles, como el petróleo o el gas natural, que son considerados como recursos naturales no renovables <sup>[18,19]</sup>.

Los polímeros son productos orgánicos, con moléculas de cadenas largas. Dichas cadenas son denominadas macromoléculas, las cuales están constituidas por la unión repetida de moléculas pequeñas, conocidas como monómeros, dichas uniones dan como resultado un alto peso molecular. De acuerdo al tamaño, a partir del orden de  $10^4$  de unidades repetitivas un material puede ser considerado como un polímero <sup>[20]</sup>.

Dependiendo de su origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos. Los polímeros sintéticos contienen normalmente entre uno y tres tipos diferentes de unidades que se repiten, mientras que los polímeros naturales presentan estructuras mucho más complejas. Actualmente, los polímeros sintéticos son de mayor interés desde el punto de vista comercial <sup>[10,20]</sup>.

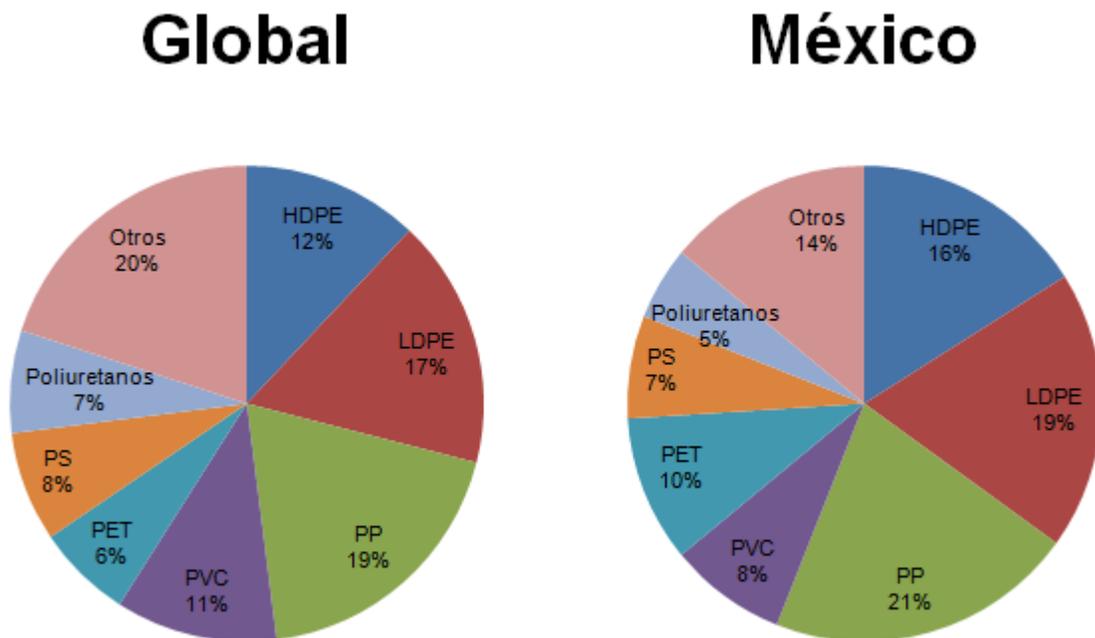
Durante los últimos cincuenta años la industria de los polímeros sintéticos ha tenido un gran desarrollo. A grandes rasgos entre los polímeros comerciales se encuentran las Poliolefinas, Estírenos y Acrílicos <sup>[21]</sup>.

En este sentido de acuerdo con la asociación empresarial europea Plastic Europe, en la producción por tipo de material se puede distinguir <sup>[19]</sup>:

- ♦ Polietileno (LDPE, LLDPE y HDPE)
- ♦ Polipropileno (PP)
- ♦ Policloruro de vinilo (PVC)

- ♦ Poliestireno sólido y expandido (PS y PS-E)
- ♦ Polietileno tereftalato (PET)
- ♦ Poliuretano (PUR)

De acuerdo con cifras del 2011 estos seis tipos de polímeros representan alrededor del 80% de la producción total de plástico en el mundo. A nivel mundial cabe resaltar que el PE, PP y PVC son los tres tipos de plásticos con mayor presencia, mientras que en México son el PE, PP y PET con un 35%, 21% y 10% respectivamente como se puede ver en la Figura 3 <sup>[10,19, 22]</sup>.



**Figura 3.** Comparación del consumo por tipo de material.

En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases.

El comportamiento mecánico de los polímeros es más complicado, la respuesta ante un esfuerzo mecánico depende de <sup>[21]</sup>:

- ♦ Temperatura a la que se encuentra el material

- ♦ Tiempo de aplicación de la carga
- ♦ Velocidad de aplicación de la carga

El comportamiento de un polímero cambia mucho con la temperatura de ensayo, desde un comportamiento frágil y puramente elástico a un comportamiento dúctil, con mucha deformación plástica. La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de cada polímero marca la frontera entre uno y otro comportamiento <sup>[23, 24,25]</sup>.

Los polímeros se pueden clasificar de varias formas, es decir se pueden clasificar en función de su estructura molecular, de su comportamiento mecánico y térmico, así como de acuerdo a la familia química o la manera en que las moléculas son sintetizadas <sup>[11]</sup>.

De acuerdo a su comportamiento los polímeros se pueden clasificar en:

- ♦ Termoplásticos: Polímeros que, bajo condiciones apropiadas de presión y temperatura pueden ser moldeados. Los termoplásticos se ablandan con el calor y se endurecen enfriándolos, es decir son sólidos a temperatura ambiente y líquidos viscosos cuando se calientan.
- ♦ Elastómeros: Ante una deformación, estos polímeros son capaces de volver a la forma original cuando cesa la fuerza que la provoca. Tienen una estructura entrecruzada débil, este tipo de estructura es la razón de la memoria del elastómero.
- ♦ Termoestables: También conocidos como termofijos, los cuales no toleran el calentamiento y enfriamiento en ciclos repetidos, cuando se calientan inicialmente se ablandan y pueden moldearse. Posteriormente se produce una reacción química de entrecruzamiento que los endurece <sup>[11,20, 26]</sup>.

Según la estructura molecular los polímeros se pueden clasificar en lineales, ramificados y entrecruzados.

- ♦ Lineales: Los polímeros lineales son aquellos en las que los monómeros se alinean formando cadenas largas sin ramificaciones. Estas moléculas pueden enroscarse, torcerse o plegarse sobre sí mismas generando estructuras complejas las moléculas lineales son capaces de empaquetarse

más densamente y deslizarse unos sobre otros con más facilidad que las moléculas ramificadas debido a la ausencia de impedimentos estéricos.

- ♦ Ramificados: Bajo ciertas condiciones de polimerización se pueden obtener ramificaciones que pueden ser cortas o largas. La ramificación reduce la tendencia a la cristalización y a la compactación de las cadenas, reduciendo por lo tanto, su densidad, rigidez y resistencia.
- ♦ Entrecruzados: Cuando unas cadenas se unen con otras cadenas a través de otras cadenas de igual o diferente naturaleza se llega a obtener una red tridimensional y el polímero se vuelve insoluble y no funde <sup>[11,20]</sup>.

### 2.3.1. Poliolefinas

#### 2.3.1.1. Polietileno

El polietileno es un polímero termoplástico que está constituido por largas cadenas de hidrocarburos <sup>[27]</sup>.

La molécula de polietileno (PE) es una molécula sencilla no polar (ver Figura 4), las cadenas diferentes se atraen entre sí por fuerzas intermoleculares débiles de tipo London (dipolo inducido-dipolo inducido). En consecuencia, el polietileno es un material blando y tiene una temperatura de fusión relativamente baja <sup>[11, 19,20]</sup>.

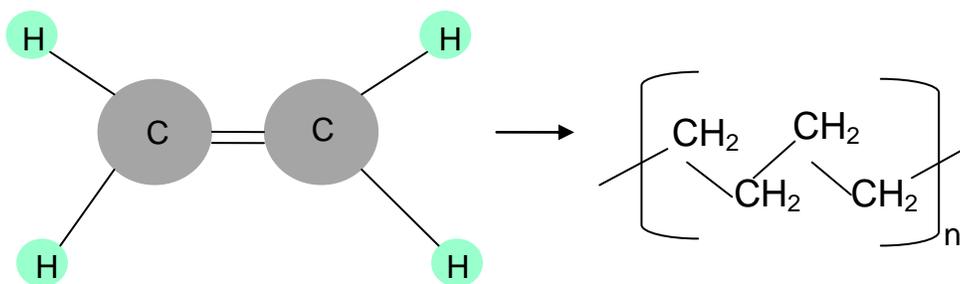


Figura 4. Unidad de repetición del Polietileno.

El polietileno se pueden clasificar dependiendo de la cristalinidad y el peso molecular, de acuerdo con lo anterior se encuentra que la temperatura de fusión y transición vítrea varía con el tipo de polietileno <sup>[25]</sup>.

De manera general se puede distinguir entre polietileno de alta densidad

(HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE). El HDPE posee una estructura altamente cristalina con monómeros simétricos y muy poca ramificación. En contraste el LDPE es altamente ramificado y estructura amorfa con monómeros simétricos. De acuerdo con lo anterior se tiene que a medida que aumenta la cristalinidad, en un polímero aumenta: <sup>[11, 19,20]</sup>

- ♦ La densidad
- ♦ La rigidez, resistencia y dureza
- ♦ La resistencia al calor

En el polietileno de alta densidad, la temperatura de fusión se encuentra en el rango de 120 a 130 °C. Mientras que la temperatura de fusión del polietileno de baja densidad se encuentra entre 105-115 °C.

Este polímero es transparente en estado amorfo, se convierte en un sólido opaco cuando cristaliza <sup>[10, 19,26]</sup>.

El LDPE es una poliolefina producto de la polimerización de hidrocarburos alifáticos insaturados; el LDPE tiene una estructura desordenada con grupos pendants (ramificaciones), es un material suave y transparente, y es empleado principalmente para la fabricación de películas para empaques. En la Tabla 1 se pueden observar las principales características del HDPE y el LDPE <sup>[11]</sup>.

**Tabla 1.** Propiedades del HDPE y LDPE.

Propiedad	Tipo de polietileno	
	Baja densidad (LDPE)	Alta densidad (HDPE)
Grado de cristalinidad	55%	92%
Densidad	0.92 g/cm <sup>3</sup>	0.96 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	140 MPa	700 MPa
Temperatura de fusión	115 °C	135 °C

Las tendencias actuales del consumo apuntan al desarrollo de nuevos productos. El polietileno es uno de los productos más consumidos en el mercado, especialmente en el mercado doméstico.

De manera general en torno al consumo del PE en México; se tiene que del 2010 al 2015 se tiene un incremento en el consumo aparente. Lo anterior debido a que en el 2010 se reportó un consumo de 1.631 millones de toneladas, mientras que en 2014 se reportó un consumo de 1.840 millones de toneladas y para el 2015

se estima que el consumo aparente fue de 1.924 millones de toneladas <sup>[22,28]</sup>.

De acuerdo con datos de Pemex y Grupo Texne en 2012 se importaron 314 mil toneladas de PE, que equivalen a un 18% del consumo aparente <sup>[28]</sup>.

Por otro lado en torno a este material, cabe mencionar que entre el 2008 al 2013 se presentaron 49 iniciativas de ley para prohibir las bolsas de polietileno <sup>[22,28]</sup>.

#### 2.3.1.2. Mezclas de polímeros

En torno a los polímeros también se habla de mezclas de polímeros, el cual es un material compuesto por dos o más polímeros o copolímeros, donde uno de ellos constituye al menos un 2% de la mezcla total. Aunque el desarrollo de materiales a partir del mezclado de polímeros es una práctica empleada desde hace varios años; en los últimos años surgió un mayor interés por ser un método más rápido, económico y efectivo <sup>[29]</sup>.

A simple vista parece sencillo, pero se debe tener en cuenta las altas viscosidades y los bajos coeficientes de difusión que tienen los polímeros en estado fundido, que hacen difícil el mezclado a nivel molecular y por consiguiente las propiedades mecánicas finales pueden resultar siendo más bajas <sup>[30]</sup>.

En general entre las razones para el desarrollo de las mezclas de polímeros se encuentra <sup>[31,32]</sup>:

- a) Materiales para nuevas aplicaciones, mediante la combinación de propiedades específicas de sus diferentes componentes
- b) Productos con comportamiento térmico y mecánico mejorado
- c) Reciclaje de residuos de post-consumo

En el caso del reciclaje, debido al alto consumo de las poliolefinas, principalmente en el sector de envases y empaques, con la fabricación de productos a partir de mezclas de residuos plásticos se contribuye a la disminución la cantidad de residuos sólidos <sup>[22]</sup>.

En este caso el desarrollo y uso de mezclas poliméricas implica la posibilidad de desarrollar mezclas sustentables y productos con buenas propiedades

mecánicas a partir de los residuos plásticos domésticos como las poliolefinas.

#### 2.3.1.2.1. Mezclas de Poliolefinas

Para el 2015, en México el PE representó aproximadamente 1.924 millones de toneladas del consumo aparente de los plásticos y debido su bajo costo, las mezclas presentan claras ventajas en cuanto a costos, propiedades y abundancia [22,28].

Su clasificación se divide principalmente en dos grupos: las mezclas que sólo contienen poliolefinas, formuladas con el propósito de ampliar el rango de propiedades y aplicaciones; en el segundo grupo se encuentran las mezclas que contienen poliolefinas y no poliolefinas, creadas con el propósito de compensar y combinar propiedades de ambos materiales. En las mezclas poliméricas entre las propiedades que aportan las poliolefinas incluyen elasticidad, tenacidad, baja viscosidad para mejorar el procesamiento, baja polaridad, resistencia química y resistencia a la absorción de humedad [29,30].

Una de las particularidades en las mezclas de polímeros, es la inmiscibilidad parcial o total de la mayoría de sistemas. Las mezclas de polímeros miscibles sólo son completamente miscibles bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y de lo contrario, la mezcla se convierte en un sistema de fases segregadas por una interfase que se comporta como una fase adicional con dimensiones y estructura definidas [33].

La termodinámica rige las interacciones fisicoquímicas entre los componentes, generando situaciones de miscibilidad e inmiscibilidad. Una mezcla es inmisible cuando no existe mezcla a nivel molecular, es decir, los segmentos moleculares de cada componente se disponen en fases distintas. En contraste, cuando existe miscibilidad se tiene una mezcla entre las cadenas poliméricas. Como resultado no se presentan zonas distintas, ni distinguibles entre sí, y se constituye lo que se conoce como una mezcla homogénea de una sola fase, donde las mismas propiedades se exhiben a través de todo el volumen [20,21].

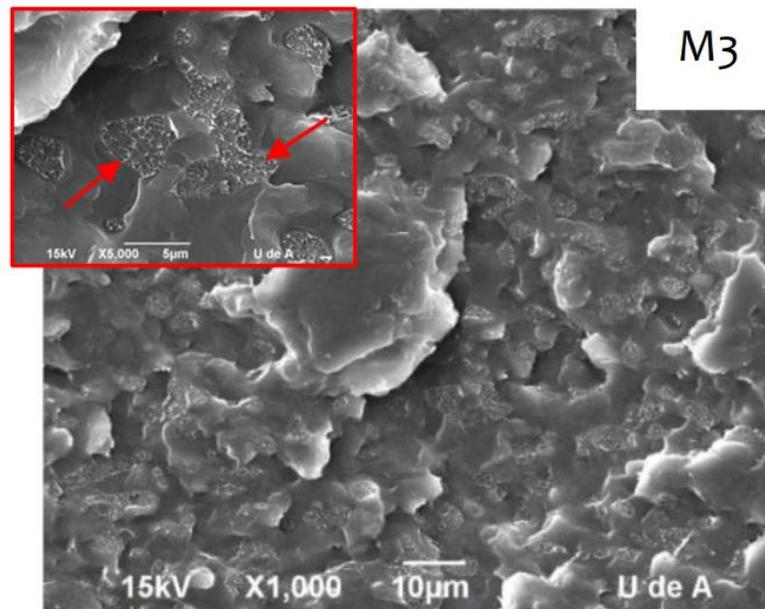
En general, en las mezclas de polímeros miscibles, la miscibilidad resulta

siendo parcial, por lo tanto, la mayoría de las mezclas son inmiscibles; incluso para las mezclas entre poliolefinas a pesar de su estructura química similar <sup>[33]</sup>.

Para sistemas inmiscibles, cuando las mezclas poliméricas presentan propiedades intermedias a las de los polímeros puros, se habla de compatibilidad entre los componentes y cuando la mezcla presenta propiedades superiores a las de los componentes puros, se habla de un efecto de sinergismo <sup>[20]</sup>.

La morfología se refiere a la forma en que se organizan las moléculas poliméricas en las regiones amorfas y cristalinas. Sin embargo, la morfología en mezclas de polímeros indica el tamaño, la forma, y la distribución espacial de una de las fases con respecto a la otra <sup>[29]</sup>.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, la morfología de mezclas inmiscibles como las mezclas entre poliolefinas, afecta fuertemente las propiedades finales del material. En este sentido de acuerdo con González cuyo estudio se centro en mezclas de PP/HDPE/LDPE en diferentes concentraciones, la afinidad química podría ser la responsable del encapsulamiento entre los PE, dando como resultado un comportamiento intermedio, en cuanto a sus propiedades mecánicas (Ver Figura 5 y 6) <sup>[33]</sup>.



**Figura 5.** Micrografías de las morfologías obtenidas para las mezclas 45PS/45HDPE/10LDPE <sup>[33]</sup>.

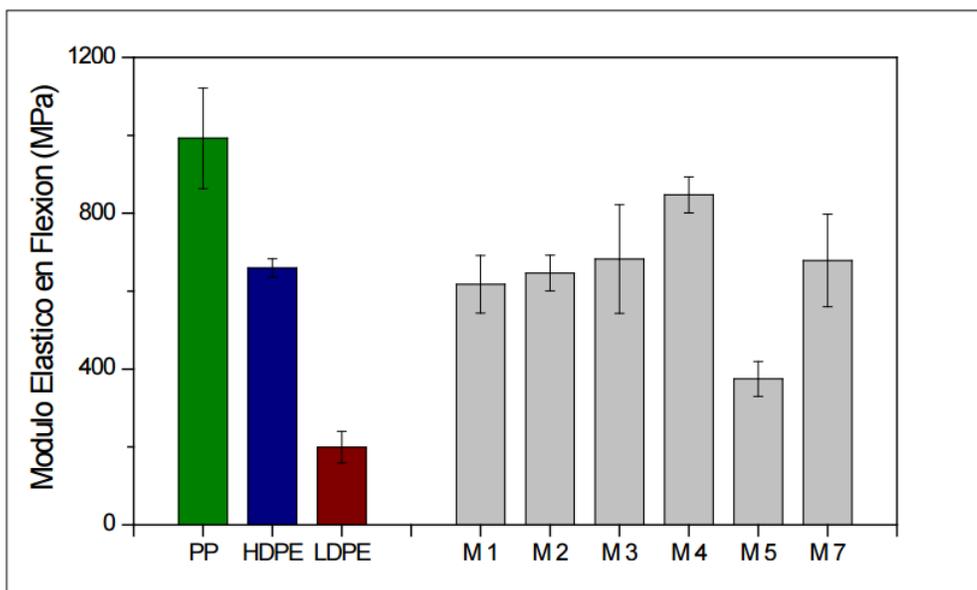


Figura 6. Comparación de los módulos elásticos a flexión <sup>[33]</sup>.

## 2.4. Residuos

Es importante resaltar que el crecimiento de las industrias, trae consigo una mayor demanda de materias primas. De manera general este crecimiento se presenta con el fin de satisfacer el consumo de la población.

En este sentido a la par se presenta un aumento en la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada <sup>[2,3]</sup>.

Los residuos se definen en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como aquellos materiales o productos cuyo propietario desecha, y dichos productos pueden estar en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso. De igual manera estos residuos pueden ser susceptibles de ser valorizados.

En función de sus características y orígenes se les clasifica en tres grandes grupos <sup>[2]</sup>:

- ♦ Residuos sólidos urbanos (RSU)
- ♦ Residuos de manejo especial (RME)
- ♦ Residuos peligrosos (RP)

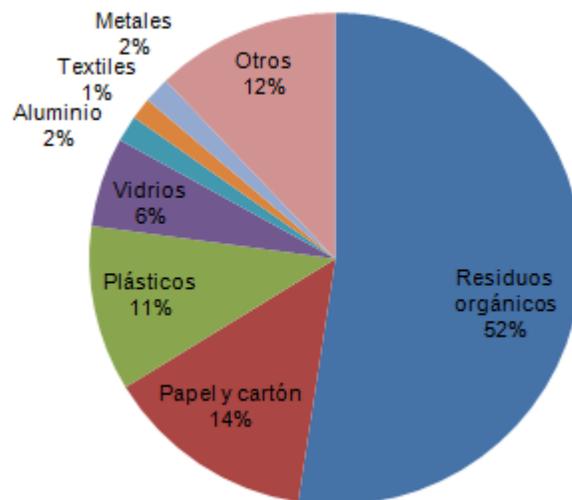
### **2.4.1. Residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos de consumo y de sus envases, embalajes o empaques.

Dentro de esta categoría también se incluyen los que provienen de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias <sup>[2,3, 34]</sup>.

La composición de los RSU depende, principalmente de los patrones de consumo de la población. Por lo general, los países con menores ingresos producen menores residuos y éstos son principalmente residuos orgánicos, mientras que en los países con mayores ingresos los residuos son mayormente inorgánicos. En México en la década de los 50 el porcentaje de residuos orgánicos oscilaba entre el 65% y el 70%, mientras que para el 2012 esta cifra se redujo al 52.4%.

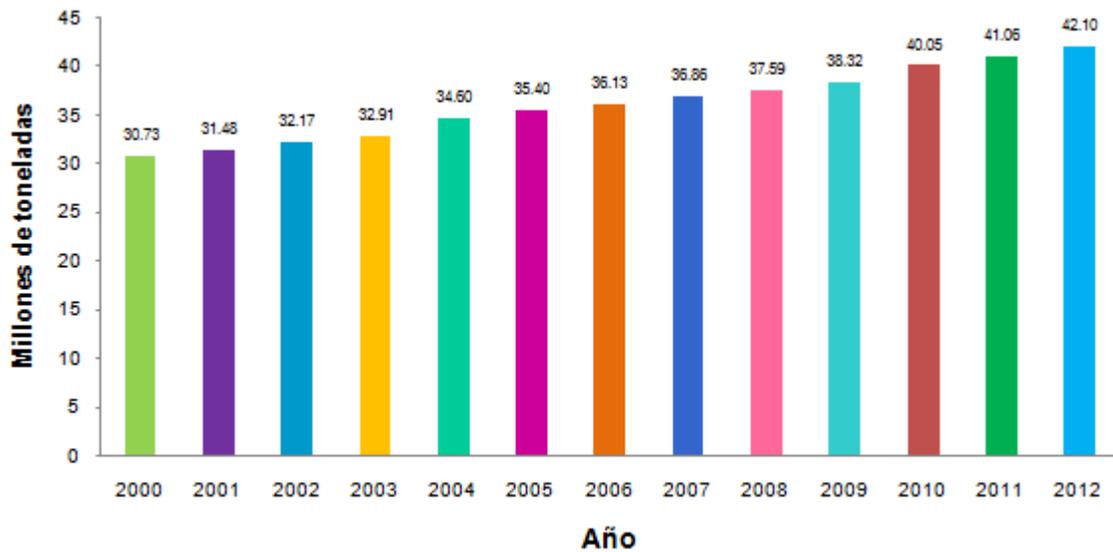
En este sentido de acuerdo con cifras del 2012, en México la composición de los RSU estuvo representada con un 52% por los residuos orgánicos, en segundo lugar se encontró el papel y cartón con el 14%, seguido de los plásticos con un 11%, mientras que los aluminios y otros metales en conjunto representaron un 4% y por último los textiles con un 1% (Ver Figura 7) <sup>[2,34, 35]</sup>.



**Figura 7.** *Composición de los RSU por tipo de residuo en México.*

La generación de RSU ha ido incrementando en los últimos años (Ver Figura 8), de acuerdo con datos de la OCDE en el 2003 se reportó una recolección de aproximadamente 33 millones de toneladas, mientras que para el 2011 la generación fue de aproximadamente 41 millones de toneladas, que equivalen a 112.5 mil toneladas diariamente y para el 2012 incrementó a 42 millones de toneladas que corresponde a un incremento del 28% con respecto al 2003. En este sentido la generación diaria de RSU para el 2012 se estimó en cerca de 115.35 mil toneladas.

El incremento en la generación de RSU se debe principalmente al crecimiento urbano, el desarrollo industrial, las modificaciones tecnológicas, el gasto de la población y el cambio en los patrones de consumo <sup>[34,35, 36, 37]</sup>.



**Figura 8.** Comparación de la generación de RSU en México.

De acuerdo con los datos anteriores las entidades federativas que generaron los mayores volúmenes fueron el Estado de México con un 16% del total nacional que equivale a 6.789 millones de toneladas, Distrito Federal un 12% que corresponde a 4.949 millones de toneladas, Jalisco 7%, Veracruz y Nuevo León con aproximadamente un 5% equivalente a 2.301 y 2.153 millones de toneladas respectivamente.

En contraste, las entidades que registraron los menores volúmenes fueron Nayarit y Tlaxcala cada una con menos del 1% con 346 mil toneladas y 339 mil toneladas cada una respectivamente, seguidas por Baja California Sur y Campeche cada una con 259 mil y 271 mil toneladas, por último se encuentra Colima con un 0.5% que equivale a 228 mil toneladas.

En este contexto de las 42 millones de toneladas generadas en el 2012; en torno a estas cifras es importante mencionar que Yucatán reportó una generación de 620.50 mil toneladas [2,34, 35, 38].

## **2.5. Reciclaje en la actualidad**

Debido al incremento en el consumo de los productos la generación de residuos y su manejo adecuado son dos de los grandes retos que enfrentan las sociedades.

Existen diferentes estrategias para manejarlos, en general lo que se busca es disminuir la cantidad y los impactos que estos desechos generan en el ambiente. El reciclaje es un proceso mediante el cual se transforma un material de desecho en otro material de utilidad, es decir, darle un uso a lo que ha sido catalogado como inservible <sup>[2,39]</sup>.

Los objetivos principales del reciclaje son:

- ♦ Conservación o ahorro de los recursos naturales y energía.
- ♦ Disminución del volumen de residuos que hay que eliminar.
- ♦ Protección del medio ambiente.
- ♦ Mejoramiento de la economía.

La recolección de los residuos y su disposición final tienen como finalidad, además de proteger la salud de la población, evitar los impactos negativos que podrían ocasionar en el medio ambiente, como la contaminación del agua y los suelos, entre otros <sup>[2,40]</sup>.

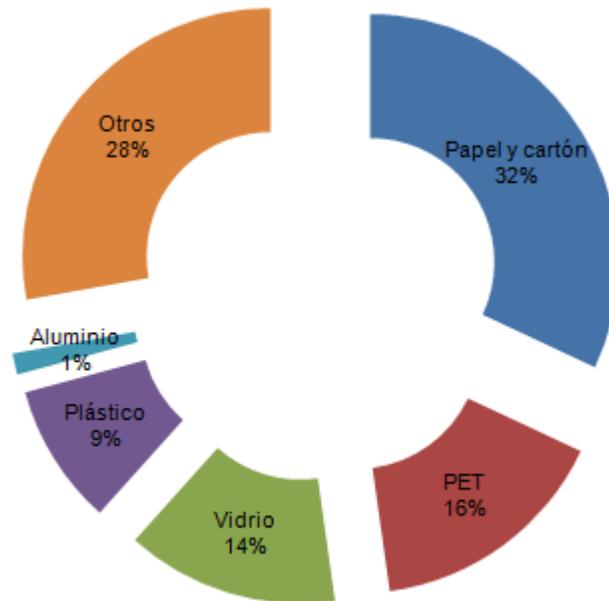
El problema de los RSU en nuestro país es que a la mayor parte se les trata como basura. Por ello es necesario plantear una estrategia que se centre en facilitar el reciclado y promover que los bienes puedan ser reutilizados <sup>[38]</sup>.

Según datos del Censo Nacional de Gobiernos Municipales y delegacionales (CNGMD), del volumen total de RSU, diversos materiales son susceptibles de ser valorizados. A pesar de que el volumen de RSU que se recicla en el país se ha incrementado en los últimos años, aún resulta bajo <sup>[38,40]</sup>.

De acuerdo con las cifras obtenidas en los sitios de disposición final, en 2011 se recicló 4.8% que corresponde a 1.97 millones de toneladas del volumen de RSU generados. Del volumen total de RSU reciclados en 2011, el mayor porcentaje correspondió a papel, cartón y productos de papel con el 42.2%, en segundo lugar el vidrio con el 28.6%, seguido de los metales con 27.8% y por último los plásticos con 1.2%.

En este sentido en 2012 (Ver Figura 9), el mayor porcentaje corresponde al papel y cartón con un 32%, seguido por el PET con el 15.8%, en tercer lugar se encuentra el vidrio con 13.8%, en cuarto el plástico con 9.2%, seguido del aluminio

con un 1.4% [2, 40].



**Figura 9.** Composición de los RSU reciclados valorizados en México.

### **2.5.1. Reciclaje de los polímeros**

La presencia de plásticos en los residuos se ha incrementado de forma continua en las últimas décadas. En este contexto los plásticos con mayor presencia en los residuos son el PE y el PET, debido a que representan la mayor proporción en los envases y embalajes [2,34, 38,40].

En México de acuerdo con cifras del 2012 los plásticos constituyen el 25% de los residuos sólidos urbanos, de los cuales el 15.8%, corresponde a PET y el 9.2% a otros plásticos [2,40 ,41].

El reciclaje de los polímeros ha llegado a ser una parte necesaria del desarrollo de una sociedad sostenible, por lo que se han realizado varias evaluaciones del ciclo de vida de las poliolefinas [42].

Cabe mencionar que la separación es un paso básico en cualquier proceso de reciclaje, y de ella depende en gran medida la calidad de los nuevos productos que se fabricarán [43].

En diversos estudios de reciclaje de poliolefinas, principalmente se centran en los cambios de sus propiedades al ser reprocesadas para ver si pueden competir con los materiales vírgenes. En particular, tres parámetros son importantes para las mediciones de calidad <sup>[42]</sup>:

- ♦ El grado de degradación
- ♦ La composición de polímero
- ♦ La presencia de compuestos de bajo peso molecular

De acuerdo con lo anterior se tiene que los termoplásticos son reciclables, debido a que se funden al ser sometidos al calor y en este sentido pueden adoptar nuevas formas.

Cabe mencionar que esta propiedad es fundamental para el reciclaje, pues permite recuperar los materiales y volver a utilizarlos mediante procesos físicos simples, como el calentamiento mencionado anteriormente <sup>[41,42, 43]</sup>.

### ***2.5.2. Reciclaje de los envases de Tetra Brik®***

Los envases de Tetra Brik® usados son 100% reciclables, por lo que el reciclaje a nivel global de envases post-consumo va en aumento, ya que en 2012 se recolectaron 581,000 toneladas, un 10% más en comparación con el 2011. En 2013 se recolectaron aproximadamente 43,000 millones de envases equivalentes a 723,345 toneladas aproximadamente, observándose un incremento del 24.5% en comparación con el 2012. Los envases reciclados principalmente son empleados para fabricar papel reciclado de alta calidad, láminas y productos aglomerados. Por ejemplo, 1400 toneladas de material equivalentes a 49 millones de envases post-consumo han servido para fabricar más de 150 millones de hojas de papel <sup>[14,44]</sup>.

Los envases Tetra Brik® al igual que todos los envases reciclables deben pasar por las siguientes etapas:

- ♦ Segregación o separación de acuerdo al tipo de envase: en origen, es decir, separación domiciliaria, por recuperadores urbanos y en centros de selección.

- ♦ Acopio: se acumulan de acuerdo a su composición y se enfardan.
- ♦ Reciclado: se realizan transformaciones físicas y/o químicas para obtener nuevos productos iguales o diferentes al original.

## **2.6. Definición de los materiales compuestos**

Un material compuesto es aquel que está formado por dos o más componentes distintos. En general, el término de material compuesto se reserva para aquellos materiales bifásicos o multifásicos fabricados expresamente para mejorar las propiedades de los materiales constituyentes <sup>[45,46]</sup>.

En todo material compuesto se distinguen dos componentes, la fase continua y la fase dispersa.

La fase continua, también denominada matriz, actúa principalmente como adhesivo o ligante. En general entre las funciones que debe cumplir la matriz son: <sup>[39,46]</sup>

- ♦ Dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo.
- ♦ Proteger al refuerzo del deterioro mecánico y químico.
- ♦ Evitar la propagación de grietas.

La fase dispersa o discontinua puede actuar como refuerzo en el material compuesto; en este caso es el elemento resistente y se clasifica en función de su microestructura o geometría <sup>[45]</sup>.

### **2.6.1. Clasificación de los materiales compuestos**

Existe una clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

- ♦ Compuestos de matriz polimérica: también conocida como PMC (*Polymeric Matrix Composites*) son los materiales compuestos más comunes, se los conoce como polímeros o plásticos reforzados con fibras. La matriz es un polímero y una variedad de fibras, como las de vidrio, las de carbono o de aramida, se utilizan como refuerzo.
- ♦ Compuestos de matriz metálica o MMC (*Metal Matrix Composites*): se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están

formados por metales “livianos” como el aluminio como matriz y fibras de refuerzo como las de carburo de silicio.

- ♦ Compuestos de matriz cerámica o CMC (*Ceramic Matrix Composites*): son empleados en aplicaciones de alta temperatura; están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers <sup>[47]</sup>.

De igual manera los materiales compuestos se pueden clasificar en función de la microestructura o geometría de la fase dispersa, tomando en cuenta la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. De acuerdo a la geometría de los materiales de refuerzo se tienen: <sup>[26,45]</sup>

- ♦ Materiales reforzados por partículas: la adición de partículas es un recurso habitualmente utilizado para obtener materiales más resistentes, las partículas son normalmente más duras y resistentes que la matriz, se cohesionan fuertemente y mejoran sus propiedades mecánicas. Según el tamaño de las partículas, pueden distinguirse los compuestos particulados reforzados por dispersión (partículas pequeñas) y con partículas grandes también conocidos como aglomerados.
- ♦ Materiales reforzados por fibras: empleados con el objetivo de obtener materiales con una elevada resistencia y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad. Entre los factores que se deben de tener en cuenta al diseñar estos materiales se encuentran la longitud, diámetro, orientación, concentración, propiedades de las fibras, propiedades de la matriz y la conexión entre las fibras y la matriz.
- ♦ Materiales laminares: se caracterizan por su elevada resistencia en todas las direcciones, siendo además ligeros y de bajo costo. Pueden tener también propiedades térmicas interesantes, y generalmente se diseñan para que su resistencia a la abrasión y la corrosión sea buena.
- ♦ Materiales estructurales: las estructuras tipo sándwich más comunes constan de dos láminas externas resistentes, llamadas caras, separadas por una capa de material menos denso y resistente, llamado núcleo. La función de las caras es resistir las fuerzas sobre el plano y los esfuerzos de

flexión transversal. Para el núcleo proporciona flexibilidad y de igual manera aumentar la resistencia a la cizalladura <sup>[11,26, 47]</sup>.

#### 2.6.1.1. Aglomerados

Los materiales compuestos reforzados por partículas grandes también son conocidos como aglomerados. En este tipo de materiales compuestos dado su tamaño, la interacción de las partículas con la matriz no tiene lugar a nivel atómico o molecular, y sus efectos se producen a nivel macroscópico. Las partículas restringen los movimientos de la matriz que les rodea y soportan una parte importante de las fuerzas que se ejercen sobre ella.

Las partículas pueden tener geometrías y tamaños diferentes, pero se debe tratar de que presenten la misma dimensión en todas las direcciones, para evitar orientaciones con mayor fragilidad. Además, hay que tener en cuenta que la interacción con la matriz será mejor cuanto menor sea su tamaño y más homogénea sea su distribución. Por otra parte, se pueden modular las propiedades mecánicas del compuesto teniendo en cuenta que, de acuerdo a la regla de las mezclas, las propiedades finales dependen del volumen relativo de ambas fases. Cabe mencionar que los compuestos con partículas grandes se emplean especialmente con matrices metálicas y poliméricas <sup>[11,26]</sup>.

#### **2.6.2. Materiales compuestos comerciales con envases Tetra Brik®**

En el mercado existen empresas dedicadas a la elaboración de los aglomerados a base de los envases de Tetra Brik®. En Europa, Brasil, Argentina y Chile actualmente se emplean paneles hechos con los envases de Tetra Brik® para la fabricación de muebles, artículos para oficina y casas habitación; estas alternativas son el resultado de los volúmenes de residuos sólidos que se generan y la preocupación por minimizar la disposición de los envases.

Entre los aglomerados que se encuentran en el mercado tenemos al Yepék® en Turquía, en Pakistán y China Chiptec®, en Alemania Tectán®, en España Maplar®, en América latina encontramos en Argentina el T-Plak®, en México Ecoplak® y Placove® <sup>[48,49]</sup>. Es importante mencionar que estos materiales poseen

características similares, debido a que se trata de materiales que están hechos a base de los envases Tetra Brik® [45,50,51].

El Tectán® es un material aglomerado el cual utiliza como materia prima para su fabricación los envases de Tetra Pak®, este material es fabricado por la empresa EVD de Holanda. Para este material en específico existen dos variables, es decir emplear por completo los envases triturados o bien realizar la extracción de la celulosa y emplear el LDPE y aluminio [52,53].

La Agencia China de Protección Ambiental actualmente conocida como *Ministry of Environmental Protection* (MEP) en 1997 incluyó al Chiptec® como una de las tecnologías recomendables a escala nacional para la protección al ambiente y en 1998 paso con éxito el examen realizado por la oficina estatal de materiales de construcción y la agencia estatal de protección ambiental [52,48,49].

Para el Ecoplak® se utiliza principalmente como materias primas los envases Tetra Brik® para fabricar láminas aglomeradas. Este material es elaborado en Colombia por la empresa Riorion S.A. y en México por la empresa Placove, de acuerdo con las cuales su producto es una madera sintética de excelentes propiedades físicas y mecánicas [52,48,49].

Por otra parte, entre los materiales hechos a base de los envases de post-consumo también se encuentra el Maplar® y es elaborado por la empresa Reciclado de Tetra Brik de Baleares S.A. en España [52,54].

De igual manera se tiene a T-Plak® en Argentina que es comercializado por la empresa Rezagos Industriales [52,55].

Debido a que los productos que se encuentran de manera comercial reportan tener la misma calidad y resistencia que los productos fabricados con madera, se incorporó en la comparación el Tablex®. Estos aglomerados son elaborados en Colombia por la empresa Pizano S.A. y están formados por partículas de madera aglomeradas mediante la adición de resinas.

Entre las ventajas del uso de los tableros aglomerados hechos a base de los envases asépticos se encuentran [51,52,56,57].

- ♦ Vida útil superior a la madera natural aglomerada

- ♦ Fácil mantenimiento
- ♦ Bajo costo
- ♦ Aislante térmico y acústico
- ♦ Protección al ambiente
- ♦ Reducción de la tala de arboles

## **2.7. Degradación de los polímeros**

La degradación implica cualquier cambio físico o químico, en estructura o morfología y se produce dependiendo del entorno o ataque físico. A menudo es causada por una combinación de agentes, y puede involucrar a varios mecanismos químicos y mecánicos <sup>[58,59]</sup>.

La degradación de los polímeros se refiere al cambio en las propiedades físicas causada por las reacciones que escinden los enlaces. En este sentido, la degradación en los polímeros involucra la cadena principal o los grupos laterales y se produce en una amplia variedad de ambientes y condiciones de servicio.

Los mecanismos de degradación están directamente relacionados con los factores o agentes ambientales. Entre los factores que pueden causar la degradación de los polímeros son la luz, la humedad, la temperatura, el pH, el viento, la lluvia, el oxígeno, el ozono o los microorganismos <sup>[4,20, 58]</sup>.

El deterioro fisicoquímico en un material puede ser iniciado por un proceso de oxidación. De acuerdo con lo anterior, cuando el material se expone a ambientes con oxígeno, normalmente se desencadenan reacciones de degradación por oxidación, que son aceleradas por la luz y el calor, conduciendo a la pérdida de propiedades <sup>[58,59, 60]</sup>.

Existe un gran número de factores estructurales y morfológicos que inciden fuertemente en el proceso de oxidación, como el grado de ramificación de la cadena, el tipo de grupos y enlaces presentes, entrecruzamientos, estructura cristalina, peso molecular y distribución de pesos moleculares, propiedades químicas, así como el espesor de la película <sup>[4,59]</sup>.

Los cambios producidos por la degradación de un polímero pueden dividirse en

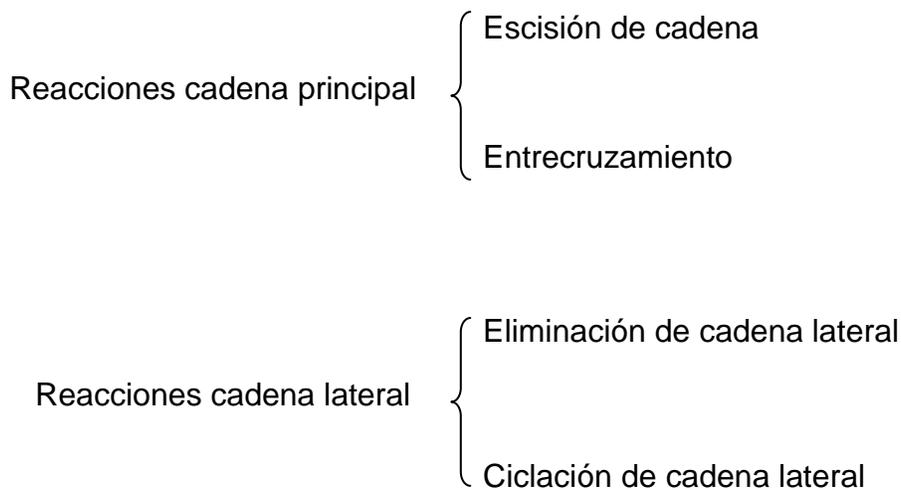
cambios físicos o químicos, entre los cuales podemos encontrar la disminución del peso molecular, y de sus propiedades mecánicas, erosión superficial, cristalinidad y flexibilidad de la cadena.

Mientras que los cambios químicos se manifiestan por cambios en la estructura química, como la formación de grupos funcionales (insaturaciones, grupos hidroxilo, carbonilo e hidroperóxidos), ruptura de cadenas, ramificación, etcétera. De manera general entre los mecanismos de las reacciones de escisión se encuentran los que se presentan en la cadena principal y los que involucran escisiones en grupos laterales. En este sentido, a grandes rasgos la descomposición de polímeros posee cuatro mecanismos de escisión molecular (Ver Figura 10) <sup>[4,20, 58,60]</sup>.

Por otra parte los principales tipos de reacciones de escisión que se presentan en las cadenas o grupos laterales son las reacciones de eliminación y ciclación.

En las reacciones de eliminación se produce un rompimiento de los enlaces que conectan a los grupos laterales con la cadena principal. Mientras que en las reacciones de ciclación dos grupos laterales adyacentes reaccionan para formar un enlace entre ellos, resultando en la producción de una estructura cíclica <sup>[5,63, 65]</sup>.

En este contexto cabe mencionar que para las poliolefinas el mecanismo de escisión más común se presenta en la cadena principal. Dichas escisiones pueden ocurrir al final de la cadena, o en lugares aleatorios de la cadena <sup>[4]</sup>.



**Figura 10.** Mecanismo general de escisión de polímeros.

### **2.7.1. Tipos de degradación**

Los tipos de procesos de degradación varían dependiendo de las condiciones a las que el material se encuentra expuesto, de su proceso de fabricación y de su estructura <sup>[60,61]</sup>.

De acuerdo con el modo de iniciación, se distinguen los siguientes:

- ♦ Degradación térmica ocurre cuando a temperaturas elevadas el material empieza a experimentar cambios químicos. Cabe mencionar que las reacciones de ruptura de cadena se pueden dar por acciones mecánicas durante el procesado o el servicio del material.
- ♦ Degradación fotoquímica es producida principalmente debido a las radiaciones de luz visible y ultravioleta. Dentro de las radiaciones UV se ha comprobado que las de longitud de onda larga son las responsables de las reacciones de foto-oxidación, mientras que las de onda más corta producen la escisión directa de las cadenas poliméricas.
- ♦ Degradación mecánica tiene que ver con los efectos macroscópicos que llevan a la fractura y a la deformación, así como cambios químicos inducidos por los esfuerzos mecánicos.
- ♦ Degradación química en este sentido se refiere exclusivamente a los

procesos que son inducidos por el influjo de reactivos químicos que entran en contacto con los materiales. De manera general entre los agentes químicos que producen este tipo de degradación se encuentra el oxígeno, el ozono, los ácidos y el agua

- ♦ Biodegradación se refiere a la degradación y asimilación por los organismos vivos, principalmente microorganismos tales como hongos, bacterias y actinomicetos <sup>[20,60, 61,62]</sup>.

Existen varias clasificaciones del tipo de degradación de un polímero, entre los factores que ocasionan la degradación se encuentran el efecto combinado y acumulado de la luz, el calor, el oxígeno, el agua, la contaminación química los microorganismos, el viento, la lluvia, etcétera <sup>[61,62]</sup>.

En la Tabla 2 se muestran algunos de los tipos de degradación más comunes en los polímeros, así como el agente que lo provoca <sup>[4,58, 59]</sup>.

**Tabla 2.** Principales tipos de degradación de polímeros y los agentes que lo provocan <sup>[4,58]</sup>.

Agente que provoca la degradación	Tipo de degradación
Luz (ultravioleta, visible)	Fotoquímica
Luz y oxígeno	Fotooxidativa (fotooxidación)
Rayos X, rayos $\gamma$ y rayos $\beta$	Por radiación de alta energía
Microorganismos	Biológica o biodegradación
Enzimas in vivo; hidrólisis en solución	Bioerosión
Químicos (ácidos, álcalis, solventes)	Química, solvólisis, hidrólisis
Calor	Térmica, pirólisis
Oxígeno, ozono	Oxidativa, oxidación, ozonólisis
Calor y oxígeno	Termooxidativa (termooxidación), combustión, pirólisis oxidativa

### 2.7.1.1. Fotodegradación

La radiación incide en la degradación de los polímeros, algunos tipos de radiación como los Rayos X,  $\beta$ ,  $\gamma$  y ultravioleta (UV) poseen suficiente energía para penetrar en los materiales poliméricos e interactuar con los átomos, originando la ruptura de las cadenas poliméricas. Cabe señalar que en mayor o menor grado todos los plásticos comerciales son fotodegradables por naturaleza <sup>[4,20, 61,63]</sup>.

En la mayoría de los materiales, como consecuencia de la degradación la estructura del material original se altera, cambian sus características mecánicas,

así como su comportamiento; de manera general la degradación se manifiesta una decoloración superficial y un aumento de la fragilidad <sup>[4,60, 64]</sup>.

La energía de la luz UV procedente de la luz solar es la principal responsable de la degradación de los polímeros, debido a que dicha energía es mayor que la energía de unión de los enlaces moleculares C-C y C-H. De manera general, la fotodegradación de los materiales se presenta por la acción de los rayos UV de la radiación solar <sup>[4,20, 61,65]</sup>.

En este sentido la capacidad de absorción del material es determinante, debido a que la fotodegradación inicia si la energía de la radiación que absorbe el material es suficiente para romper los enlaces <sup>[4,20, 61]</sup>.

Es importante señalar que dicho rompimiento es inducido por la presencia de grupos funcionales denominados cromóforos, que absorben energía en el rango de la longitud de onda UV-Vis, provocando la formación de radicales que promueven la escisión molecular del polímero de tal manera que pierden resistencia y se fragmentan, reduciendo su peso molecular <sup>[4,65, 66]</sup>.

En los polímeros los grupos carbonilo C=O actúan como grupos cromóforos favoreciendo el desarrollo de reacciones provocadas por la acción de la luz. Por otra parte, su formación, como consecuencia de la degradación del polímero, va acompañada de la pérdida de color y propiedades mecánicas <sup>[4,59, 63]</sup>.

Dentro de las radiaciones UV se ha comprobado que las de longitud de onda larga son las responsables de las reacciones de foto-oxidación, mientras que las de onda más corta producen la escisión directa de las cadenas poliméricas. Cabe mencionar que en ambos casos la estructura del material cambia formando cadenas más pequeñas insaturadas o reticulaciones entre cadenas contiguas <sup>[4,58, 60,65, 66,67]</sup>.

Como se ha mencionado anteriormente, la fotodegradación de los polímeros es debido a la radiación ultravioleta; sin embargo, la luz visible potencia el efecto de la oxidación <sup>[4,20, 64,67]</sup>.

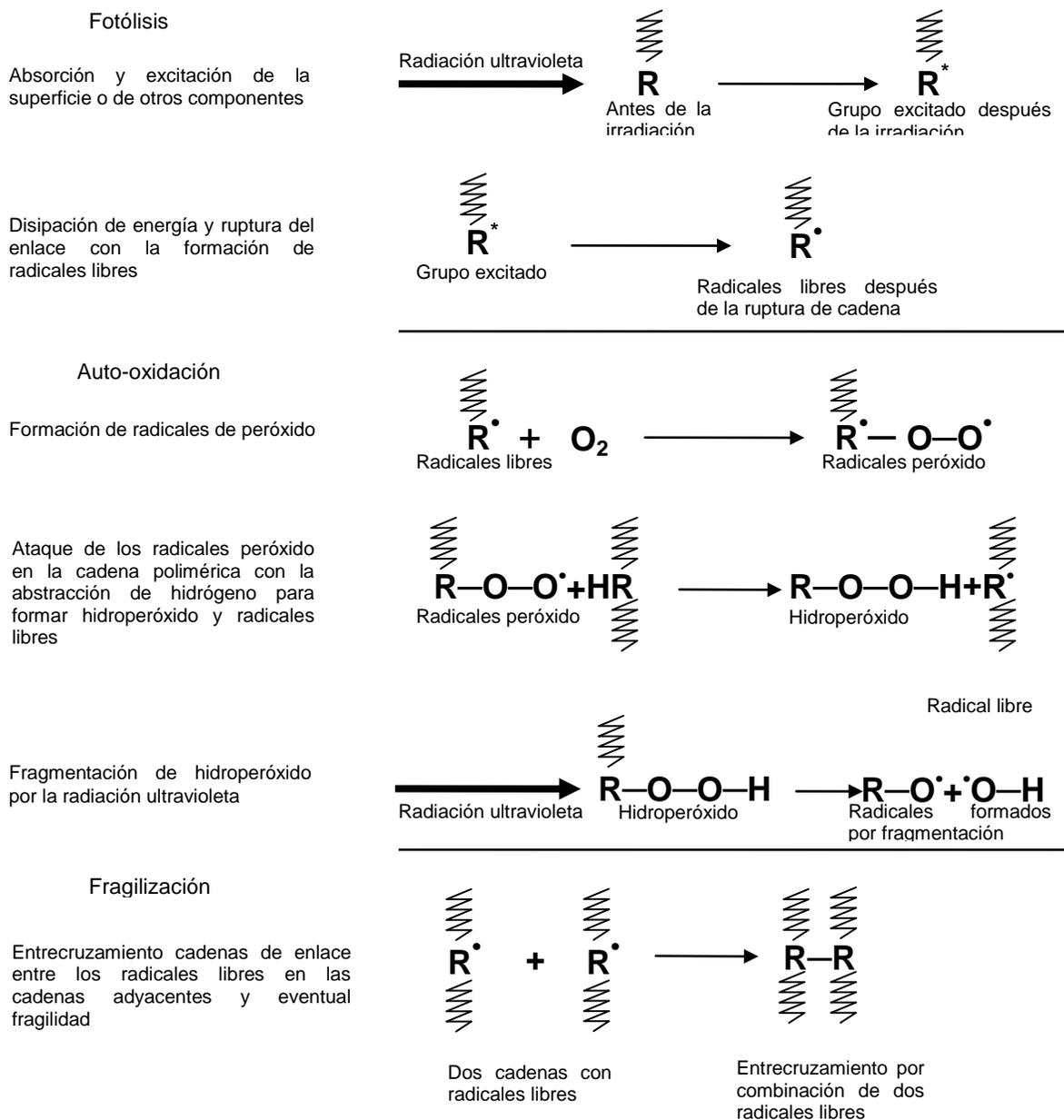
En el caso de los polímeros expuestos a la intemperie el deterioro se debe principalmente a la oxidación iniciada por la radiación ultravioleta. Posteriormente,

el oxígeno reacciona con la estructura produciendo hidroperóxidos, creando uniones entre las cadenas y como consecuencia se tiene una disminución de la flexibilidad. El efecto de oxidación se potencia si actúa la radiación ultravioleta o el material está sometido a tensiones <sup>[4,20, 64,65, 67]</sup>.

De manera general el mecanismo de la fotodegradación se puede ver en la Figura 11, el cual inicia con la fotólisis, que es la absorción de la radiación UV por parte del polímero ocasionando que se eleve la energía. Este exceso de energía debe ser eliminado; en este sentido, una forma de eliminación es por la escisión de la cadena del polímero, dando como resultado la formación de radicales libres altamente reactivos.

Después en la foto-oxidación, a través de la reacción de los radicales libres con el oxígeno se forman peróxidos, los cuales reacciona con el hidrógeno de otra cadena para formar el hidroperóxido y otro radical libre.

Debido a que el hidroperóxido es extremadamente vulnerable a la fotólisis, se fragmenta fácilmente para propiciar más radicales libres; por último estos radicales libres atacan otros sitios de la cadena principal <sup>[4,64, 65,67]</sup>.



**Figura 11.** Mecanismo general de la fotodegradación de polímeros <sup>[67]</sup>.

### 2.7.2. Intemperismo acelerado

También denominado envejecimiento acelerado (*accelerated weathering* o *artificial weathering*) consiste en someter las muestras a una fuente de luz artificial controlando la temperatura y la humedad <sup>[4,63, 68]</sup>.

La principal ventaja de este método, es acelerar el envejecimiento mediante el

adecuado control de las condiciones o factores de envejecimiento aunque la desventaja principal es comprender como dichos factores interactúan durante el proceso de envejecimiento [63,64, 68,69].

En este contexto el objetivo de realizar el intemperismo artificial es acelerar los procesos de meteorización para obtener una predicción de la vida útil de los materiales. Cabe mencionar que en comparación con el intemperismo natural, la prueba se realiza en un período corto de tiempo [4,63, 68].

El riesgo principal en la exposición natural al aire libre es la radiación ultravioleta, la porción de onda corta entre 290 nm y 365 nm del espectro solar es la principal responsable de la degradación de los materiales. En este sentido es importante mencionar que el parámetro principal de todo aparato de envejecimiento acelerado es la fuente de luz [63,70, 71].

Una manera de acelerar el deterioro es utilizar lámparas que emiten radiaciones de longitudes de onda por debajo del límite inferior, aproximadamente en la porción de onda corta del espectro solar, es decir entre 290 nm y 365 nm. Lo anterior debido a que cuanto menor sea la longitud de onda mayor es la energía del fotón [66,71, 72,73].

Existen diferentes equipos que son empleados para el envejecimiento acelerado, los cuales emplean diferentes fuentes de luz que, simulan los efectos de la radiación natural. Entre las diferentes fuentes de luz UV empleadas para el intemperismo artificial, se encuentran [66,72, 73]:

- ♦ Xenón
- ♦ Fluorescentes
- ♦ Arco de carbono

El arco de xenón reproduce el espectro entero de luz solar, incluyendo UV, luz visible, e infrarroja (IR). Mientras que las lámparas fluorescentes están disponibles con diferentes salidas espectrales. La intensidad de las lámparas UVB incrementa al máximo la aceleración con espectros en torno a 313 nm y las UVA se asemejan más a la radiación solar con espectros de 340 nm y 351 nm [66,72, 73,74].

Cabe mencionar que en las cámaras de intemperismo el arco de xenón y las

lámparas fluorescentes son las más utilizadas <sup>[66]</sup>. Las lámparas de este tipo de equipos emiten radiación UV en las mismas longitudes de onda que la radiación solar, lo anterior con el objetivo de simular de forma acelerada, la degradación frente a una exposición directa al sol <sup>[65,66, 73,75]</sup>.

Entre las características de los equipos de intemperismo acelerado se encuentran que pueden emplear lámparas UVA-340, UVA-351, UVB-313, en ciclo UV los rangos de temperaturas oscilan entre 45-80 °C mientras que en el ciclo de condensación los rangos de temperaturas son de entre 40-60 °C. En este sentido cabe mencionar que los equipos pueden programarse para ambos ciclos con el objetivo de simular los fenómenos atmosféricos <sup>[66,70, 71,76]</sup>.

De manera general se ha concluido que, la sinergia entre la radiación UV y la humedad incrementa las pérdidas de propiedades mecánicas debido a la erosión de la superficie y el aumento de la capacidad de humectación superficial. En este sentido, la exposición a la radiación UV y al agua es más perjudicial que solo a la radiación UV <sup>[77,78]</sup>.

Diferentes estudios han demostrado que la condensación, en forma de rocío, es responsable de la mayor humedad al aire libre. El rocío es más perjudicial que la lluvia ya que permanece en el material por más tiempo, lo que permite una absorción significativa de la humedad <sup>[66]</sup>.

### ***2.7.3. Intemperismo natural***

El exceso de confianza en las pruebas de intemperismo aceleradas puede ser engañosa. Debido a lo anterior cabe mencionar que el envejecimiento natural debe ser utilizado para verificarlo <sup>[79]</sup>.

El envejecimiento natural o también denominado intemperismo natural es el método más preciso para estudiar la durabilidad o tiempo de vida útil de los materiales. De manera general como se mencionó anteriormente, el objetivo de la prueba es la predicción de la vida útil en condiciones de servicio. Cabe mencionar que las condiciones de exposición más apropiadas son aquellos que coincide con el entorno en el que va a estar en servicio el material <sup>[72,74,78]</sup>.

Es importante mencionar que estas pruebas no son útiles para determinar de manera general las características del tiempo de vida útil de cualquier material ni para todos los climas del mundo, es decir no todas las exposiciones son iguales. Los datos obtenidos son sensibles a un grupo específico de parámetros entre los cuales tenemos [78,80,81,82].

- ♦ Montaje
- ♦ Ángulo de exposición
- ♦ Temperatura y Humedad
- ♦ Las variaciones estacionales

Entre los parámetros ambientales podemos mencionar la humedad, lluvia, niebla, irradiación solar, etcétera. En este sentido cabe mencionar que las diferencias entre los sitios en los que se realiza y los períodos de exposición a la intemperie pueden conducir a resultados variables. Para plásticos y diversos recubrimientos, la temperatura, la humedad y la radiación UV son factores importantes, debido a que pueden iniciar la degradación del material [4,74,82].

Una de las razones por las que vemos muchos informes que indican pobre correlación entre ambos estudios se debe a que los factores de erosión son diferentes (Ver Tabla 3). La columna del lado derecho muestra que hay muchos más factores que pueden influir en la intemperie exterior [79].

**Tabla 3.** Comparación de los factores que intervienen en las pruebas [79].

<b>Intemperismo acelerado</b>	<b>Intemperismo natural</b>
Luz artificial	Luz solar
Temperatura	Temperatura
Condensación	Lluvia
	Condensación
	Humedad
	Depósito de ácidos
	Suciedad y contaminantes

Otro factor que se debe de considerar en las pruebas de exposición natural es el período requerido de exposición; para resultados confiables dicho período debe ser igual o mayor que el tiempo de servicio requerido. En el intemperismo acelerado, esto es fácil, pero la validez de las predicciones de vida útil en condiciones naturales sobre la base de los datos de estas pruebas es cuestionable

[78,79,80,83]

Por lo general, el período de prueba de intemperie natural necesaria para observar la degradación es relativamente largo. En este contexto, la norma UNE-EN 927-3 estipula un período de 12 meses de exposición al aire libre, pero en diversos estudios se ha demostrado que las pruebas pueden durar mucho más <sup>[84]</sup>.

De igual manera la Norma ASTM D1435 recomienda un período de exposición de 12 meses; en caso contrario, los resultados de la exposición de menos de un año dependerán de la estación del año en que se realizó. Debido a que las exposiciones de verano suelen ser más agresivas que las exposiciones de invierno.

Los resultados de las pruebas de exposición a corto plazo pueden proporcionar una indicación del rendimiento relativo al aire libre, pero no deben ser utilizados para predecir la rentabilidad absoluta a largo plazo de un material. Los resultados de las pruebas realizadas por menos de doce meses dependerán de la temporada particular del año en el que comienzan <sup>[79,83]</sup>.

#### ***2.7.4. Caracterización para el estudio de la degradación***

##### **2.7.4.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

La calorimetría diferencial de barrido es una técnica térmica basada en la medición de calor, la cual se emplea para estudiar las transiciones térmicas que ocurren en los materiales cuando se calientan. Cabe mencionar que dicha técnica tiene un campo de aplicación amplio <sup>[63,85]</sup>.

Entre las aplicaciones de esta técnica se encuentra que principalmente se emplea para estudiar el comportamiento térmico de los polímeros, vidrios, cerámicas, resinas, aceites, grasas, ceras, arcillas y minerales en general, entre otros <sup>[85,86]</sup>.

Cabe mencionar que las transiciones térmicas implican un cambio de energía, ya sea, por procesos de almacenamiento de calor denominados procesos endotérmicos o procesos de liberación de calor conocidos como procesos exotérmicos, las transiciones de fase, procesos de cristalización, oxidación,

deshidratación <sup>[63,86,87]</sup>.

De manera general la transición aparece como una discontinuidad de la línea de base a la temperatura de transición vítrea. A medida que aumenta la temperatura, el material puede cristalizar dando lugar a una reacción exotérmica antes de que ocurra la fusión. A temperaturas más altas, se puede degradar u oxidar dependiendo de la atmósfera circundante.

El resultado final de la medición es un termograma que registra la diferencia de calor a medida que la temperatura se incrementa <sup>[63,88, 89]</sup>.

#### 2.7.4.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)

En la espectroscopía de infrarrojo se emplea la región infrarroja del espectro electromagnético. Al igual que en las demás técnicas espectroscópicas, puede ser utilizada para identificar un compuesto o su composición.

De manera general esta técnica se basa en el hecho de que los enlaces químicos tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Cabe mencionar que estas frecuencias dependen de la geometría molecular, las masas atómicas, etcétera <sup>[89,90]</sup>.

Entre las técnicas que se utilizan para estudiar los materiales se encuentra la espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada conocida como ATR-FTIR, la cual permite identificar la estructura molecular de un material en su superficie.

El ATR permite analizar la muestra directamente, es decir sin tratamiento previo y sin moler para elaborar pastillas de KBr. Cabe mencionar que con la técnica de ATR es posible un estudio más completo de las propiedades estructurales al no tener que moler la muestra y mediante esta técnica es posible obtener espectros sin que se presente el traslape de bandas <sup>[88,91, 92]</sup>.

La técnica consiste en el paso de un haz de radiación infrarroja (IR) a través de un cristal transparente al IR y de alto índice de refracción, sobre el cual se coloca la muestra.

La radiación penetra unos  $\mu\text{m}$  de la superficie de cristal donde se produce reflexión total. Cabe mencionar que la profundidad de la penetración depende de

la longitud de onda de la radiación, tanto del índice de refracción del cristal, así como del índice de refracción de la muestra, y del ángulo de incidencia del haz de radiación del cristal <sup>[89,91, 92]</sup>.

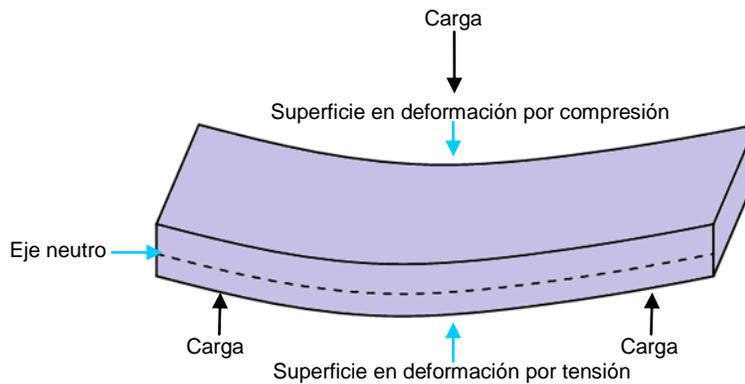
#### 2.7.4.3. Flexión a Tres Puntos

La flexión es un concepto muy importante, ya que se utiliza en el diseño de muchos componentes estructurales y de máquinas, entre dichos componentes se encuentran las vigas, trabes, láminas y placas. Se denomina flexión, a la deformación que se presenta en un material en dirección perpendicular a su eje longitudinal <sup>[11,21, 26,93]</sup>.

Para las pruebas de flexión a tres puntos se emplean en los extremos de la muestra dos apoyos fijos. Cabe mencionar que la carga se aplica entre los puntos de apoyo de manera concentrada <sup>[93,94, 95,96]</sup>.

En este sentido cuando la muestra es sometida a flexión experimenta un esfuerzo de compresión en la superficie cóncava y un esfuerzo de tensión en la convexa. De acuerdo con lo anterior como resultado de la flexión cabe mencionar que en la parte superior donde se aplica la carga la muestra es comprimida, mientras que en la parte inferior el material se alarga debido al esfuerzo de tensión al que es sometido <sup>[26,93, 96]</sup>.

Además otro aspecto importante es que durante la prueba entre esas dos superficies existe una superficie neutra. En dicha superficie denominado eje neutro las fibras longitudinales de la muestra no experimentan un cambio de longitud (ver Figura 12) <sup>[26,93, 95]</sup>.



**Figura 12.** Esquema general de una prueba de flexión a tres puntos.

Cabe mencionar que los resultados que se obtienen de las pruebas de flexión describen el comportamiento del material mediante el diagrama de esfuerzo-deformación. Al igual que con las pruebas de tensión y compresión, con las pruebas de flexión se puede determinar el módulo de flexión, el esfuerzo de flexión y la deformación por flexión [93,95, 96].

## **2.8. Estudios previos de los envases Tetra Brik®**

### **2.8.1. Estudios sobre el uso de los envases de Tetra Brik® para la obtención de materiales compuestos**

Actualmente, se encuentran estudios en diferentes partes del mundo realizados tanto a los envases Tetra Brik® como a los aglomerados que se obtienen a partir del reciclaje de los mismos.

En Venezuela con el objetivo de ver los efectos ambientales que se podrían obtener con el aumento en el porcentaje de envases asépticos que se recicla, y centrándose principalmente en los beneficios que se obtienen al reciclar una mayor cantidad de envases se realizó un análisis del ciclo de vida de los mismos. Para el estudio se consideraron desde los principales aspectos de la fabricación de los envases, hasta su eliminación y finalmente su reciclaje. Se concluyó que el aumento en la cantidad de envases reciclados trae consigo una serie de beneficios en términos de reducción del consumo energético, de recursos naturales, de la mayoría de los contaminantes del aire y las emisiones de agua.

De manera general, se observó que con el aumento en la cantidad de envases que se reciclan se tiene un impacto positivo en el medio ambiente <sup>[56]</sup>.

Se han realizado estudios para la obtención de aglomerados de Tetra Brik<sup>®</sup>, basándose en los procesos de los que ya encuentran de manera comercial (Tectán<sup>®</sup>) y son utilizados generalmente en la industria del mueble y de la construcción.

En general se resalta la buena consolidación del Tetra Brik<sup>®</sup> utilizando procesos de molienda y prensado en caliente, resultando laminados con buenos acabados. En estos laminados el polietileno presente en los envases sirve para promover la adherencia y al mismo tiempo le brinda una capacidad hidrofóbica al aglomerado <sup>[53]</sup>.

En China y Alemania se han establecido estudios con materiales aglomerados de Tetra Brik<sup>®</sup>, los cuales generalmente son utilizados en la industria del mueble y de la construcción. Basándose en estudios que se han realizado a los aglomerados obtenidos a partir de envases Tetra Brik<sup>®</sup>, como los mencionados anteriormente se recopiló información y se concluyó que el sector industrial debe impulsar el reciclaje de los envases Tetra Pak<sup>®</sup>, considerando la disponibilidad de residuos <sup>[97]</sup>.

De igual manera se han realizado estudios sobre la viabilidad del uso de polietileno reciclado de baja densidad (LDPE) y el aluminio de Tetra Pak<sup>®</sup> para elaborar un tablero compuesto. Para la elaboración de los tableros se utilizó una prensa con platos calientes. Se llegó a la conclusión de que los compuestos de LDPE/Al son afectados significativamente por el efecto de compactación, es decir por la presión ejercida durante el procesamiento, y se ve reflejado principalmente en el aumento de su resistencia a la tensión; en cuanto a la absorción de agua el compuesto presenta baja absorción de agua. Los tableros pueden ser utilizados como un material de ingeniería, por ejemplo para el desarrollo de nuevas alternativas a la fabricación de bobinas de cable <sup>[98]</sup>.

En los últimos años ha crecido el interés mundial por incorporar fibras celulósicas en los materiales compuestos de matrices poliméricas. Sin embargo

éstas poseen una alta tendencia hidrofílica, lo cual incrementa la tendencia a la captación de humedad. El objeto de un estudio de trabajo fue establecer el efecto producido por la absorción de agua en las propiedades mecánicas del compuesto a base de envases de Tetra Brik<sup>®</sup> (LDPE-Al) reforzado con fibra largas de fique. Las probetas sometidas al ensayo de inmersión en agua son fabricadas con fibra de fique sin previo tratamiento superficial. De este estudio se pudo concluir que la absorción de agua por parte del LDPE-Al/fique afecta las propiedades de tensión haciendo que estas disminuyan, de igual manera las propiedades de flexión se ven altamente afectadas por la absorción de agua <sup>[99]</sup>.

De igual manera para observar el efecto producido por la incorporación de fibras en las propiedades físico-mecánicas, se realizó una comparación de las propiedades obtenidas con las fibras de fique y sin refuerzo. Se fabricaron tableros a partir del reciclado de los envases de Tetra Brik<sup>®</sup> con porcentajes de 10%, 30% y 50% fracción volumen de fibras cortas de fique en disposición bidimensional aleatoria y la obtención de los aglomerados fue por medio del proceso de termo-moldeo.

Como resultado se obtuvo un incremento de la resistencia, y el módulo a tensión del material con 50% de fibra sin embargo, los mejores resultados a flexión alcanzados se presentaron con 30 % de fique. Por otra parte, hay que destacar que se observó un incremento en la absorción de agua con la incorporación de dichas fibra en el material <sup>[100]</sup>.

### ***2.8.2. Estudios sobre aglomerados de Tetra Brik<sup>®</sup> elaborados en la región***

En un estudio desarrollado en el Instituto Tecnológico de Chetumal se implementaron estrategias para el reciclaje de envases multicapa para la fabricación de aglomerados como posibles sustituyentes en la industria de la construcción y mueblera. Los resultados obtenidos denotan impactos positivos en los ámbitos económico, social y ecológico. En pruebas de resistencia a flexión al material se observó que presenta una falla dúctil, contraria a lo que sucede con el panel de yeso que tiene una falla frágil <sup>[101]</sup>.

En el CICY se han realizados estudios para optimizar las condiciones de proceso para la elaborar aglomerados, así como evaluar las propiedades de los materiales obtenidos a partir de envases Tetra Brik<sup>®</sup>. Se ha encontrado que entre las condiciones óptimas de procesamiento para la elaboración de las placas se encuentra la cantidad adicional de polietileno reciclado, el tamaño de partículas, así como el tiempo y la presión de consolidación.

En este estudio se realizaron pruebas a tensión y a flexión, y absorción de humedad; se estudió el efecto de la inclusión adicional de HDPE reciclado en la formulación sobre el mejoramiento de las propiedades del material mediante la transferencia de esfuerzos entre las partículas y sobre las propiedades hidrofóbicas del material.

Los resultados, demostraron un mejoramiento de las propiedades mecánicas y una disminución en la absorción de agua al adicionar polietileno hasta un 45 % en fracción volumen.

Se concluyó que con un tamaño de partícula de 7 mm y. mediante el uso de una prensa con placas de calentamiento, el material es sometido a termo-moldeo ejerciendo una presión de 1.1 MPa durante 10 min a una temperatura de 150 °C, obteniendo buenas propiedades.

Con la finalidad de mejorar las propiedades del material mejorando la transferencia de esfuerzos entre las partículas, así como proporcionar propiedades hidrofóbicas al material se procedió a incorporar una cantidad adicional de polietileno reciclado (HDPE) <sup>[102]</sup>.

En otro estudio se realizó una comparación entre los aglomerados que poseen un 45% de HDPE añadido en fracción volumen y sin HDPE, así como variaciones en el tamaño de partícula de los envases Tetra Brik<sup>®</sup>, las cuales corresponden a 3 mm, 5 mm y 7 mm.

Se observó que en las dos primeras horas de inmersión las muestras con tamaño de partícula de 3 mm y 5 mm adicionadas con un 45% de HDPE reciclado presentan un porcentaje de absorción bajo.

Con el análisis de los resultados se demostró que el porcentaje de absorción de

agua disminuye de manera considerable con las partículas de 3 mm.

De igual manera en las pruebas a flexión se encontró que el módulo de elasticidad, el módulo de ruptura, así como la carga máxima que soportan las probetas obtenidas se encuentran por encima de algunos aglomerados reportados comercialmente <sup>[103]</sup>.

Continuando con estudios previos se encontró que se tomaron como parámetros establecidos el añadir 45% de HDPE y tamaño de partícula de 3 mm, debido a que como se mencionó anteriormente, resulta en buenas propiedades mecánicas <sup>[102,103]</sup>.

Se centraron en la obtención de un material tipo sándwich utilizando como núcleo el laminado Tetra Brik<sup>®</sup> y HDPE, agregándole caras de aluminio y utilizando para la unión una película polipropileno injertado con anhídrido maléico (MAPP). En las pruebas a tensión es posible observar que el esfuerzo máximo promedio de este material es de 30.34 MPa, con una carga máxima promedio de 2.99 KN y un módulo elástico de 4.59 GPa <sup>[104]</sup>.

Por último en otro estudio sobre el procesamiento de los envases de Tetra Brik<sup>®</sup> se encontró que los envases son sometidos a un proceso denominado hidropulpeo el cual se emplea para retirar la celulosa presente en los envases mediante agitación mecánica. Cabe mencionar que en este caso las placas se realizaron sólo con el aluminio y LDPE presente en los envases y posteriormente se realizó la adhesión del aluminio para obtener un laminado tipo sándwich con caras de aluminio. En este estudio se reportó que el esfuerzo máximo promedio corresponde a 31.31 MPa y un módulo elástico de 4.20 GPa <sup>[105]</sup>.

### ***2.8.3. Estudios sobre la degradación***

Los procesos de degradación varían dependiendo de las condiciones ambientales en las que el material se va a emplear, así como del proceso de fabricación. La degradación del LDPE presente en los envases Tetra Brik<sup>®</sup> es causada principalmente por las reacciones de escisión de enlaces químicos.

Las impurezas o aditivos presentes en el material podrían reaccionar con la

matriz polimérica, si la temperatura es suficientemente alta [4,72, 74,78].

#### 2.8.3.1. Estudios sobre degradación térmica de los envases Tetra Brik®

Los envases Tetra Brik® son térmicamente degradables y combustibles debido a su naturaleza química, debido a esto se han desarrollado estudios sobre los procesos de degradación de los envases, así como de los aglomerados obtenidos a partir de ellos y de sus componentes.

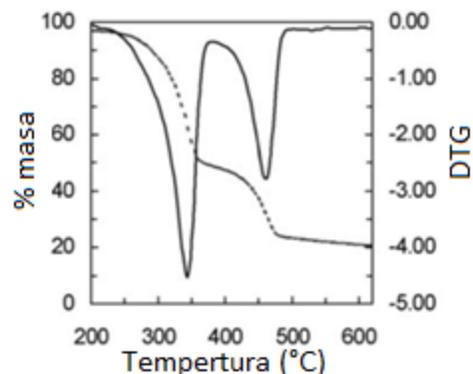
Entre los trabajos realizados se encuentra que se ha estudiado la cinética de la descomposición térmica de los envases mediante técnicas de análisis térmico. Se ha reportado que la velocidad de reacción depende del comportamiento individual del LDPE y el papel kraft presentes en los envases. De manera general mediante la pirólisis de los residuos Tetra Pak® se estudió el efecto de la temperatura en la degradación de los materiales, y se observó la presencia de H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e hidrocarburos de la degradación de la celulosa y el polietileno [106].

En otro estudio realizado a los envases Tetra Brik® se encontró que la descomposición térmica se realiza claramente en dos etapas diferentes. La primera etapa (200 °C a 400 °C) corresponde a la descomposición térmica del papel kraft constituido por la celulosa y hemicelulosa; y la segunda etapa ocurre entre 400 °C y 461 °C incluye la descomposición de LDPE así como la siguiente descomposición del papel restante [107].

De igual manera en otro trabajo mediante la pirólisis se estudió la cinética de la descomposición térmica de envases asépticos. En primer lugar, se asume una descomposición térmica de dos etapas y los parámetros cinéticos se determinaron, mediante una curva termogravimétrica para envases de cartón asépticos enteros. Se utilizó otro método, el cual utiliza los parámetros cinéticos determinados por los componentes individuales de los envases.

En conclusión el comportamiento de la descomposición térmica de los envases de cartón asépticos muestra claramente dos etapas. En la Figura 13 se puede observar un termograma (TGA) realizado a los envases Tetra Brik®, la primera etapa corresponde con la descomposición térmica de la celulosa, así como de la

hemicelulosa y la segunda etapa incluye la descomposición de LDPE [108].



**Figura 13.** Termograma (TGA) de descomposición de envases asépticos [108].

### 2.8.3.2. Estudios sobre la Fotodegradación

#### 2.8.3.2.1. Fotodegradación del LDPE de los envases Tetra Brik®

En estudios sobre degradación foto-oxidativa de diferentes polietilenos se ha encontrado, que la presencia y el grado de ramificación en la cadena es de suma importancia en la tasa de oxidación térmica. En este contexto se encontró un estudio de la degradación del HDPE, LDPE y PE basado en metaloceno (m) al ser sometidos a irradiación. En base a los datos recolectados se estableció que, es posible medir los cambios en el material mediante el índice de carbonilo empleando FTIR. Los resultados obtenidos de la fotodegradación de los polietilenos antes y después de la irradiación se compilan en la Tabla 4.

De manera general, se puede observar que en las primeras 24 h de exposición el polímero de metaloceno (m-PE) presentó la concentración más baja de productos oxidados, asociados con una oxidación durante el proceso de fabricación. La concentración de hidroperóxido de m-PE incrementó gradualmente hasta 98 h de envejecimiento. En contraste, el HDPE desde las primeras horas presentó valores más altos en la concentración de hidroperóxido [109].

**Tabla 4.** Resultado de los análisis IR de los PE al ser sometidos a la irradiación [109].

Tiempo (h)	Hidroperóxidos		Hidroxiilo	Ésteres	Aldehído	Cetona	Ácidos
	3555cm <sup>-1</sup>	3410cm <sup>-1</sup>	3371cm <sup>-1</sup>	1743 cm <sup>-1</sup>	1733 cm <sup>-1</sup>	1720 cm <sup>-1</sup>	1712 cm <sup>-1</sup>
HDPE							
0	0.153	4	1.113	0.265	0.176	0.103	-
24	0.217	4.713	1.178	0.372	0.392	0.618	1
74	0.219	4.986	1.309	0.432	0.608	1.294	2.304
98	0.37	6.007	1.363	1.063	1.912	2.646	3.273
LLDPE							
0	0.097	4.553	0.870	0.495	0.103	0.064	-
24	0.101	4.789	0.966	0.597	0.132	0.083	0.427
74	0.125	5.068	1.112	0.725	0.196	1.118	1.294
98	0.151	5.153	1.463	1.568	0.294	1.814	2.666
m-PE							
0	0.068	4.213	0.888	0.216	0.030	0.017	0.007
24	0.082	4.553	0.869	0.385	0.105	0.546	0.348
74	0.240	5.62	1.168	0.539	1.029	1.912	3.92
98	0.307	5.753	1.219	1.422	1.936	4.786	6.569

De acuerdo con otro estudio donde elaboraron tableros aglomerados a partir de envases Tetra Pak<sup>®</sup> y residuos lignocelulósicos como las hojas de piña y palma de aceite, derivados de las actividades agrícolas; para posteriormente evaluar su resistencia al ser sometidos a envejecimiento acelerado. Se emplearon lámparas UVA de 310 nm de longitud de onda condensación 50 °C (2 h) con un tiempo de exposición total de 600 horas, cabe aclarar que algunos de sus tableros solo soportaron 350 h.

Concluyeron que las mezclas con los envases Tetra Brik<sup>®</sup> presentan el mejor rendimiento, debido a que la superficie mostró pocas irregularidades, seguidos de las mezclas con componentes de palma de aceite y por último por las mezclas compuestas de hojas de piña. En general se observó un cambio de color en la muestras a medida que incrementa el tiempo de exposición [110].

#### 2.8.3.2.2. Fotodegradación del HDPE y LDPE

De manera general y englobando los resultados de diversos estudios de fotodegradación, se ha reportado es un cambio de color en la muestras a medida que incrementa el tiempo de exposición y la correspondiente disminución de sus propiedades. En este sentido se encontró diversos trabajos que abordan la fotodegradación mediante el intemperismo acelerado, así como el intemperismo natural.

Entre los estudios de fotodegradación se encontró el realizado a paneles de albura de pino, a los cuales les fueron aplicados 30 diferentes recubrimientos comerciales para posteriormente ser expuestos a intemperismo natural en Viena, así como a intemperismo artificial usando lámparas fluorescentes UV-A 340 nm, con tiempos de exposición máximos de 30 meses y 15 meses, respectivamente. Al finalizar el estudio, con la comparación de los resultados no se encontró una correlación lineal entre el intemperismo natural y el artificial <sup>[80]</sup>.

En otro trabajo de intemperismo, en este caso realizado con materiales compuestos de fibra de madera y HDPE (WF / HDPE) para determinar los cambios en el color y las propiedades mecánicas de los materiales compuestos antes y después de someterlos a radiación. Para el estudio empleo un equipo Q-Panel con lámparas UVA-340 nm y una irradiación promedio de 0.77 W/m<sup>2</sup>. El tiempo total de la intemperie fue de 2000 h con ciclos de irradiación UV de 8 h a 60 °C y de condensación de 4 h a 50 °C.

En general después del envejecimiento acelerado de 2000 h el color y las propiedades mecánicas cambiaron significativamente, se observó una disminución en el módulo de ruptura de las muestras de aproximadamente un 21.2% <sup>[112]</sup>.

De igual manera cabe mencionar que en otro estudio se empleó LDPE virgen al que se le incorporó LDPE reciclado en concentraciones del 25% y 50% para la elaboración de películas.

Las películas fueron montadas en soportes para exponerlas a intemperismo natural en Jordania. Cabe mencionar que las muestras fueron expuestas a intemperismo natural durante 3, 6, 9, 12 y 15 meses.

Durante el estudio tanto de sus propiedades mecánicas, como físicas, se encontró que la adición de estabilizadores UV con una concentración de 10% y 30% es favorable para disminuir la presencia de grupos carbonilo y retardar el proceso de degradación <sup>[112]</sup>.

En China se estudió el comportamiento de dos tipos de cascarilla de arroz provenientes de residuos de la agricultura que fueron mezclados con PE.

Las muestras se colocaron en posición horizontal en el techo de un edificio en

China para ser expuestos a los factores climáticos, como la precipitación, la nieve, la luz solar, la temperatura, la humedad y el viento.

Las propiedades mecánicas, cambios de color, y propiedades de superficie de estas muestras se midieron después de 5, 12, 17 y 24 meses. Se concluyó que después de que fueron expuestos a intemperismo natural por dos años, se encontró una disminución en el color en más de un 23%.

En cuanto a las pruebas de flexión ambas muestras mostraron una tendencia de disminución en sus propiedades en los primeros 12 meses. Sin embargo, al final del período de prueba, es decir después de 24 meses, se observaron aumentos en resistencia a flexión y módulo de elasticidad <sup>[113]</sup>.

Se investigaron los efectos de la intemperie de materiales compuestos hechos a base de madera de pino con HDPE. Estos materiales compuestos se sometieron a intemperismo acelerado mediante arco de xenón e intemperismo natural para un total de 1200 h y 120 días, respectivamente.

La prueba de envejecimiento natural se llevó a cabo mediante la exposición de las muestras orientadas hacia el sur en un ángulo de 45° en Moscú y Estados Unidos de agosto a noviembre.

Se concluyó que la exposición prolongada provoca el incremento en el grado de degradación, el cual ocasiona una erosión en la superficie dejando grietas y un cambio de color. El aumento en la concentración de carbonilo, así como de la cristalinidad del HDPE proporcionó evidencia de que la fotodegradación se produjo por la exposición prolongada de las muestras <sup>[114]</sup>.

Por último, en otro trabajo se realizaron pruebas de intemperismo a HDPE en dos diferentes latitudes. Las muestras fueron expuestas durante cuatro años en Indonesia y Japón. En ambos lugares, la variación del crecimiento del grupo carbonilo fue correlacionada con la variación de la temperatura y no directamente con la radiación solar.

Se concluyó que la alta radiación no conduce necesariamente a una tasa de degradación más rápida. De igual manera estableció que la temperatura es un factor más importante que la radiación solar <sup>[115]</sup>.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1. ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS AGLOMERADOS PARTICULADOS OBTENIDOS A PARTIR DE ENVASES TETRA BRIK®**

En el Centro de Investigación Científica de Yucatán se implementó una campaña de recolección de desechos domésticos y entre ellos se encuentra los envases Tetra Brik®. Los envases que se emplean para la obtención de los aglomerados son recolectados del centro de acopio ubicado en la Unidad de Materiales de este Centro.

Los parámetros de procesamiento para la obtención de aglomerados a partir de los envases de Tetra Brik® están basados en valores optimizados, los cuales fueron establecidos en estudios previos. Entre dichos parámetros se encuentran el tamaño de partícula tanto de los envases de Tetra Brik®, así como de los envases de HDPE, la fracción volumen y el conformado por termo-moldeo <sup>[102,103]</sup>. Lo anterior con el fin de realizar una comparación válida de los resultados obtenidos del estudio después de la exposición a intemperismo acelerado.

En relación a la materia prima empleada es importante mencionar que debido a que este trabajo se enfoca en el reciclaje de los materiales de desecho, en la recolección solamente se realizó la separación por color, no se realizó ningún tipo separación en cuanto a los recipientes de HDPE. Para este estudio se utilizaron los envases blancos y por lo tanto los de otras coloraciones o pigmentaciones fueron excluidos, de manera particular se emplearon los envases provenientes de envases de yogurt bebible y lactobacilos (Dan´up®, Yoplait®, Lala®, Alpura® y Chamito®), asegurándose que todos tengan la leyenda HDPE o se encuentren marcados con el número dos. En cuanto a los envases de Tetra Brik®, para el estudio se limitó al uso de los provenientes de la empresa Tetra Pak® y cuyo contenido era leche, clasificándose de igual manera de acuerdo al color y marca. La clasificación de los envases en cuanto al color fue en rosa y verde que corresponde a la marca de Alpura® y por último el azul que corresponde a la marca de San Marcos®.

### **3.2. Obtención de los aglomerados de Tetra Brik® reciclado**

El proceso para la obtención de los aglomerados consta de los siguientes pasos:

#### **3.2.1. Separación y limpieza**

Primero se procede a la recuperación de los envases (Tetra Brik® y HDPE) del centro de acopio de la Unidad de Materiales. Posteriormente, se realiza de manera manual la eliminación de los residuos de alimentos que pudieran tener, mediante el lavado con detergente desengrasante.

Posterior al lavado los envases seleccionados son seccionados en 8 partes con ayuda de una sierra cinta marca Truper modelo SCI-10. Posteriormente se introducen en una estufa de convección a 60 °C durante 24 h, para la eliminación de remanentes de agua provenientes del lavado de los mismos.

#### **3.2.2. Reducción del tamaño de partícula del material**

Se redujo el tamaño de los materiales seleccionados mediante una molienda, hasta obtener el tamaño de partícula deseado.

La reducción del tamaño de partícula de los materiales se realizó con el molino PAGANI<sup>MR</sup> modelo 1520FA; para ambos materiales se empleó una criba de 3 mm, con el fin de obtener partículas con tamaños similares tanto para los envases de Tetra Brik®, así como para los botes de HDPE. De acuerdo con resultados de estudios realizados los materiales con tamaño de partícula de 3 mm, presentan mejores propiedades mecánicas y menor porcentaje de absorción de agua en comparación con las partículas de 7 mm y 5 mm <sup>[102,103]</sup>.

#### **3.2.3. Secado**

El material particulado es secado en una estufa marca Felisa modelo FE-292 AD a 60 °C por 24 h previo al laminado con el objetivo de eliminar los residuos de agua que pudiera tener el material, proveniente del proceso de lavado o por la humedad del medio ambiente.

Debido al clima predominante en el Estado de Yucatán se recomienda que

previo al laminado el material sea secado. Cabe mencionar que para los aglomerados preliminares la materia prima requerida (Tetra Brik<sup>®</sup>/HDPE) fue tomada directamente después de la molienda, es decir sin un tratamiento previo de secado y cuyo resultado fue que cuando se realizó el termo-moldeo el contenido de humedad era elevado, a pesar de que antes de la reducción de partícula del material éste ya había sido secado.

De igual manera dicho secado se realizó debido a que, la presencia de agua puede afectar negativamente en las propiedades finales de los aglomerados, ya que al evaporarse del aglomerado final generaría poros, los cuales actúan como concentradores de esfuerzos ocasionando una disminución de sus propiedades mecánicas.

#### **3.2.4. Proceso de laminado**

Con la adición del 45% de HDPE se busca una disminución en la capacidad de absorción de agua del aglomerado final, mediante un acabado impermeabilizante, impidiendo el paso del agua a través del material.

De acuerdo con las diferentes pruebas propuestas en el presente estudio y de las dimensiones de cada una de las probetas requeridas, se decidió emplear el molde con dimensiones de 25 cm x 35 cm. Otra de las razones por la cual se optó por dicho molde es que con estas dimensiones se obtuvieron una mayor cantidad de probetas.

En primer lugar para la realización del aglomerado se pesa el material de acuerdo al espesor requerido, en este caso se desea obtener un aglomerado de 3.2 mm de espesor.

Para los cálculos de la masa requerida, se empleó la densidad del HDPE reportada en la literatura que corresponde a  $0.952 \text{ g/cm}^3$ . Mientras que para estimar la densidad del Tetra Brik<sup>®</sup> se requirió primero de la elaboración de un aglomerado solamente de este material, dando como resultado una densidad de  $1.176 \text{ g/cm}^3$ .

Con los datos anteriores, se calculó la masa de los componentes para elaborar

un aglomerado cuyo espesor final sea de 3.2 mm de espesor: 120 g de HDPE que corresponde al 45 % en fracción volumen y 181 g de Tetra Brik<sup>®</sup> equivalente al 55% en fracción volumen. Las cantidades mencionadas anteriormente se obtuvieron de la siguiente manera:

Espesor de 0.32 cm/molde 25 cm x35 cm

$$V_T = (25cm)(35cm)(0.32cm) = 280cm^3 \quad (1)$$

Para obtener 45% HDPE en fracción volumen

$$V_{HDPE} = (0.45)(280cm^3) = 126cm^3 \quad (2)$$

$$m = \rho V = \left(0.952 \frac{g}{cm^3}\right) (126cm^3) = 119.95 g \cong \boxed{120 g}$$

Para obtener 55% Tetra Brik<sup>®</sup> en fracción volumen

$$V_{TB} = (0.55)(280cm^3) = 154cm^3 \quad (3)$$

$$m = \rho V = \left(1.176 \frac{g}{cm^3}\right) (154cm^3) = 181.10 g \cong \boxed{181 g}$$

Posterior al pesaje de ambos materiales, éstos son mezclados, e inmediatamente la mezcla se dispone en el molde para obtener los aglomerados particulados con las dimensiones correspondientes de 25 cm x 35 y espesor de 3.2 mm.

Como caras externas se colocó una película de LDPE comercial, adquiridos de la empresa Polietileno Publicitario S.A. con las mismas dimensiones del molde, es decir de 25 cm x 35 cm y calibre 125 (6 micras aprox.). Las películas fueron incorporadas con el fin de proporcionarle un acabado superficial liso.

Otro factor importante que determinó la incorporación de estas películas fue que se deseaba obtener datos comparables con estudios previos. En torno a lo anterior se encontró que Pool en su estudio de absorción de agua reportó la adición de dichas caras a los aglomerados <sup>[103]</sup>.

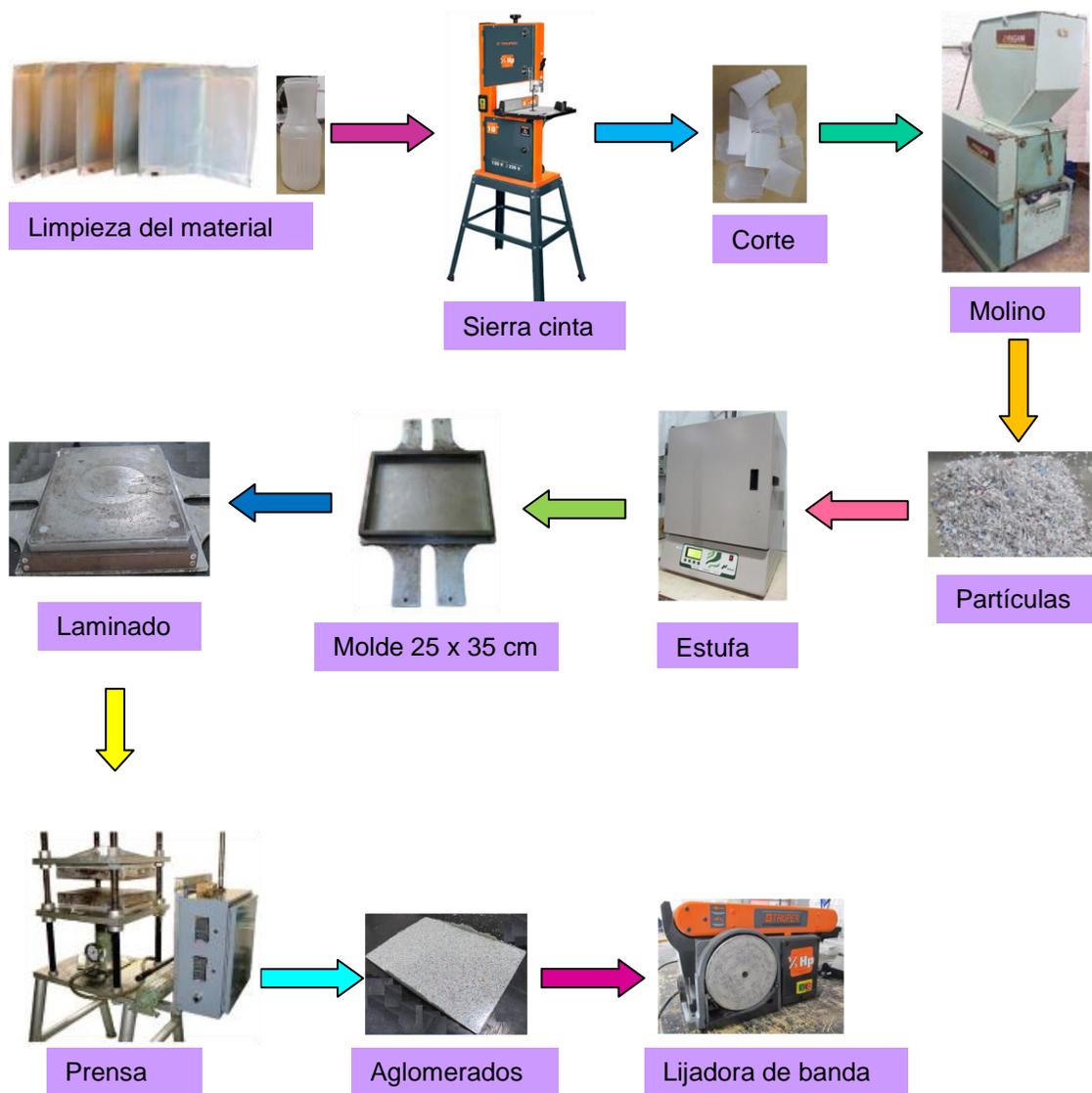
El proceso de termo-moldeo se realizó en una prensa hidráulica marca Cordemex a 150 °C y con una presión de 1.13 MPa durante 10 min. Posteriormente transcurrido el tiempo mencionado se procede a un enfriamiento

en dos etapas; la primera consistió en disminuir la temperatura a 100 °C y mantenerla constante, así como la presión por un período de 10 min y por último un enfriamiento hasta los 40 °C. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de procesamiento para la obtención de los aglomerados particulados.

**Tabla 5.** Parámetros de procesamiento.

<b>Actividad</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (MPa)</b>
Calentamiento de prensa	-	150	-
Calentamiento de tapa	8	150	-
Prensado	10	150	1.13
Pre-enfriamiento	10	100	1.13
Enfriamiento	20	40	1.13

De manera general el esquema de procesamiento para obtención de los aglomerados particulados se muestran en la Figura 14.



**Figura 14.** Esquema de procesamiento para obtención de los aglomerados.

### 3.3. Preparación de las probetas para las pruebas físicas y mecánicas

De manera general en la Tabla 6 se pueden ver los lotes que se estudiaron, así como las probetas que los conforman y las pruebas a la que fueron sometidas. Cabe mencionar que la nomenclatura empleada para identificar cada muestra corresponde a  $L_{\#, \#}, X$ , de dicha nomenclatura la letra L equivale a lámina, el primer subíndice denota el número de la lámina y el segundo al número de probeta que se obtuvo de la misma; por último la letra X corresponde a la prueba a la que se somete, en el caso de que sean pruebas de flexión a tres puntos se le asigna la

letra F y la A para las pruebas de absorción de agua.

**Tabla 6.** Distribución de las muestras para las diferentes pruebas.

Lote	Tipo y tiempo de exposición	Tipo de prueba	Muestra	
1	Sin intemperismo (0 h)	Flexión y absorción	L <sub>4,2</sub> ,F,	L <sub>3,1</sub> ,A
			L <sub>5,1</sub> ,F	L <sub>4,2</sub> ,A
			L <sub>49,1</sub> ,F	L <sub>15,1</sub> ,A
			L <sub>11,2</sub> ,F	L <sub>8,1</sub> ,A
			L <sub>30,2</sub> ,F	L <sub>1,1</sub> ,A
			L <sub>3,2</sub> ,F	L <sub>7,2</sub> ,A
			L <sub>6,1</sub> ,F	L <sub>18,2</sub> ,A
2	Intemperismo acelerado (500 h)	Flexión y absorción	L <sub>14,3</sub> ,F	L <sub>14,1</sub> ,A
			L <sub>16,1</sub> ,F	L <sub>16,2</sub> ,A
			L <sub>16,2</sub> ,F	L <sub>18,1</sub> ,A
			L <sub>19,1</sub> ,F	L <sub>19,1</sub> ,A
			L <sub>19,2</sub> ,F	L <sub>19,2</sub> ,A
			L <sub>23,1</sub> ,F	L <sub>20,2</sub> ,A
			L <sub>25,1</sub> ,F	L <sub>30,1</sub> ,A
			L <sub>25,2</sub> ,F	~
			L <sub>11,1</sub> ,F	L <sub>2,2</sub> ,A
3	Intemperismo acelerado (1000 h)	Flexión y absorción	L <sub>30,1</sub> ,F	L <sub>8,2</sub> ,A
			L <sub>1,2</sub> ,F	L <sub>10,1</sub> ,A
			L <sub>8,1</sub> ,F	L <sub>7,1</sub> ,A
			L <sub>10,1</sub> ,F	L <sub>5,1</sub> ,A
			L <sub>7,1</sub> ,F	L <sub>12,1</sub> ,A
			L <sub>15,3</sub> ,F	L <sub>11,2</sub> ,A
			L <sub>15,2</sub> ,F	~
4	Intemperismo acelerado (2000 h)	Flexión y absorción	L <sub>12,1</sub> ,F	L <sub>10,2</sub> ,A
			L <sub>10,2</sub> ,F	L <sub>1,2</sub> ,A
			L <sub>3,1</sub> ,F	L <sub>3,2</sub> ,A
			L <sub>29,1</sub> ,F	L <sub>6,1</sub> ,A
			L <sub>12,2</sub> ,F	L <sub>2,1</sub> ,A
			L <sub>8,2</sub> ,F	L <sub>4,1</sub> ,A
			L <sub>1,1</sub> ,F	L <sub>11,1</sub> ,A
			L <sub>14,1</sub> ,F	~
5	Intemperismo natural (8 semanas)	Flexión	L <sub>21,1</sub> ,F	~
			L <sub>21,2</sub> ,F	~
			L <sub>27,1</sub> ,F	~
			L <sub>27,2</sub> ,F	~
			L <sub>28,2</sub> ,F	~
			L <sub>34,2</sub> ,F	~
6	Intemperismo natural (16 semanas)	Flexión	L <sub>37,2</sub> ,F	~
			L <sub>9,1</sub> ,F	~
			L <sub>22,1</sub> ,F	~
			L <sub>24,1</sub> ,F	~
			L <sub>26,3</sub> ,F	~
			L <sub>28,3</sub> ,F	~
			L <sub>31,1</sub> ,F	~
L <sub>36,1</sub> ,F	~			

### 3.3.1. Obtención de las probetas para la prueba de flexión a 3 puntos

Las placas del aglomerado previamente obtenidas, son seccionadas en probetas de 51 mm x 127.8 mm x 3.2 mm y cortadas con una sierra radial

Craftsman para las pruebas de flexión de acuerdo a la norma ASTM D1037-12 (ver Figura 15). Los bordes de las probetas se lijan con ayuda de la lijadora de banda y disco Truper modelo PUL-4x6 para eliminar rebabas <sup>[94]</sup>. Lo anterior se realiza con la finalidad de que al efectuar las pruebas, la superficie sea lo más uniforme posible y así tratar de reducir algún tipo de imperfección superficial que pudiera inducir una falla.

Por último, se procede a registrar el peso y las dimensiones de cada una, para posteriormente determinar y reportar la cantidad de material que se pierde en cada una de las pruebas a las que serán sometidas. Lo anterior debido a que de los siete lotes con los que se cuenta, tres lotes de estas probetas son para pruebas de intemperismo acelerado y dos a intemperismo natural previo a su evaluación a flexión.



**Figura 15.** *Probetas de flexión.*

### **3.3.2. Obtención de las probetas para la prueba de absorción de agua**

Para esta prueba las dimensiones de las probetas requeridas son de 15.2 cm x 15.2 cm según la norma ASTM D-1037-12, como se puede ver en la Figura 16. De igual manera como el caso anterior al concluir el corte, las probetas obtenidas deben de ser lijadas para reducir algún tipo de falla provocada por la presencia de rebabas <sup>[94]</sup>. Tanto los cortes como el lijado de las probetas se realizan con los mismos equipos empleados en las probetas de flexión.

De igual manera que en el caso anterior, para estas probetas también se llevó un registro del peso y de las dimensiones de cada una con el fin de determinar la cantidad de material que se pierde en cada una de las pruebas a las que serán

sometidas previo a su evaluación de absorción de agua. Al igual que en el caso de las muestras de flexión para la prueba de absorción de agua también se cuenta con siete lotes, de los cuales tres lotes son para pruebas de intemperismo acelerado, dos a intemperismo natural y dos sin ningún tipo de exposición previo a su evaluación.

Cabe resaltar que para esta prueba en especial es de vital importancia llevar el registro del peso de cada una de las muestras, ya que mediante el valor del peso de la muestra es que se hacen los cálculos necesarios para determinar la cantidad de agua que cada una es capaz de absorber.



**Figura 16.** *Probetas de absorción de agua.*

### ***3.3.3. Preparación de las probetas para los ensayos***

#### **3.3.3.1. Secado**

Las muestras son introducidas en la estufa Felisa modelo FE-292AD durante 48 h a  $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  para eliminar cualquier remanente de humedad del ambiente e inmediatamente se dejan enfriar en un desecador durante al menos 5 h de acuerdo a la norma ASTM D618-13, seleccionado para materiales con un espesor  $\leq 7\text{ mm}$  <sup>[116]</sup>.

#### **3.3.3.2. Acondicionamiento**

De igual manera para el acondicionamiento de las muestras se trabaja de

acuerdo al espesor del material, basándose en la norma ASTM D4933-10, en un laboratorio con ambiente controlado el tiempo requerido para estabilizar las muestras a peso constante durante 29 h a 20 °C ±3 con 50% de humedad relativa. Previo a cada una de las actividades mencionadas anteriormente (secado y acondicionamiento), se realizó un registro de peso de cada probeta <sup>[117]</sup>.

### 3.4. Caracterización de los aglomerados

#### 3.4.1. Prueba mecánica de flexión a 3 puntos

Las pruebas de flexión a los aglomerados obtenidos se realizan de acuerdo a la norma ASTM D1037-12, sección 9 <sup>[94]</sup>. Dichas pruebas se realizan para identificar los cambios de las propiedades de los materiales antes y después de ser sometidos a intemperismo acelerado.

Las dimensiones de las probetas requeridas para esta prueba son de 51 mm x 127.8 mm x 3.2 mm. La distancia entre los puntos de apoyo o también conocido como *span* fue de 76.8 mm y la velocidad de desplazamiento del cabezal de 1.53 mm/min. Es importante mencionar que dicha velocidad se obtuvo de la siguiente manera y de acuerdo a la norma ASTM D1037-12 <sup>[94]</sup>.

$$N = \frac{zL^2}{6d} = \frac{(0.005)(76.8)^2}{6(3.2)} = 1.53 \text{ mm/min} \quad \begin{array}{l} Z=0.005 \text{ (cte.)} \\ L=\text{span} \\ d=\text{espesor en seco} \end{array} \quad (4)$$

Los ensayos se realizaron con ayuda de la máquina de pruebas universales Shimadzu modelo AGS-X que se encuentra en el laboratorio de mecánica del CICY y una celda de carga de 1 kN (ver Figura 17).

De igual manera en torno a lo anterior, de acuerdo con los valores de carga máxima que soporten las muestras, se realiza el cálculo del módulo de ruptura (MOR) o también conocido como esfuerzo máximo a flexión ( $\sigma_{fmax}$ ) y el módulo elástico a flexión ( $E_f$ ) mediante las siguientes ecuaciones y de acuerdo a la norma ASTM D1037-12 <sup>[94]</sup>:

$$\sigma_{fmax} = \frac{3F_{max}L}{2bd^2} \quad F_{max}=\text{carga máxima soportada} \quad (5)$$

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad \begin{array}{l} L=\text{span} \\ b=\text{ancho} \\ d=\text{espesor en seco} \end{array} \quad (6)$$

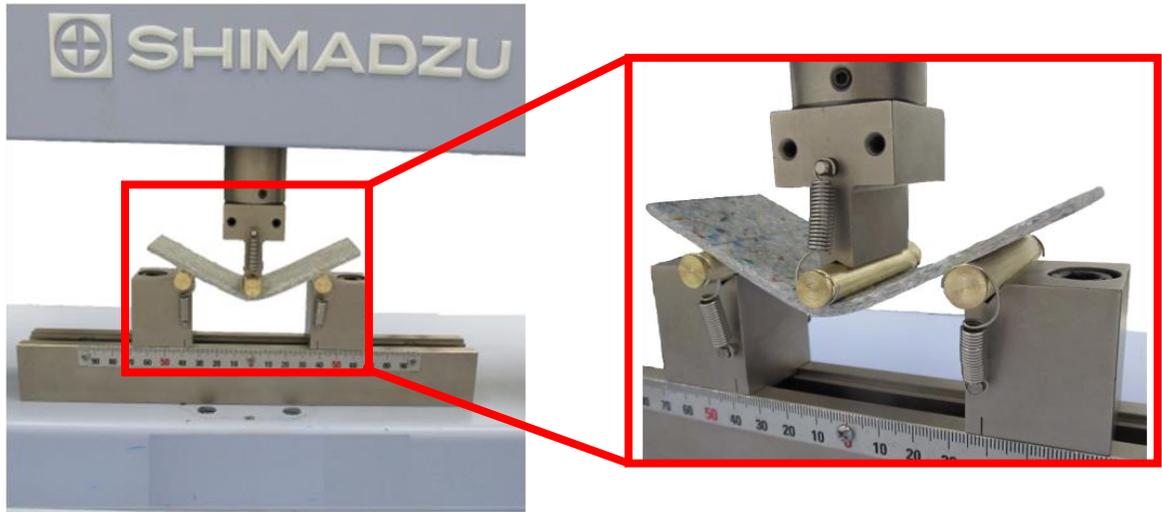


Figura 17. Prueba de flexión a tres puntos.

### 3.4.2. Prueba de absorción de agua

Para la inmersión de las muestras se optó por el método A; esta prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM D1037-12 sección 23, y cuyas dimensiones de las probetas fueron de 15.2 x 15.2 cm <sup>[94]</sup>. Cabe mencionar que para esta prueba es de suma importancia el secado de las probetas debido a que la norma indica que se requiere el registro de peso y espesor de cada probeta en seco previo a la inmersión, lo cual se realizó en la estufa Felisa modelo FE-292AD como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18.** *Secado de muestras de absorción de agua.*

Para la inmersión de las muestras se empleó un recipiente lleno con agua a 23 °C y una altura de 18 cm aproximadamente, debido a que de igual manera la norma indica que las muestras deben estar sumergidas como mínimo debajo de 2.54 cm (1 in).

Para iniciar la prueba las muestras se sumergen en posición vertical durante 2 h y posteriormente por 22 h, para tener un total de 24 h de inmersión. En la Figura 19 se muestra la manera en la que se realiza la prueba.



**Figura 19.** *Inmersión de muestras para prueba de absorción de agua.*

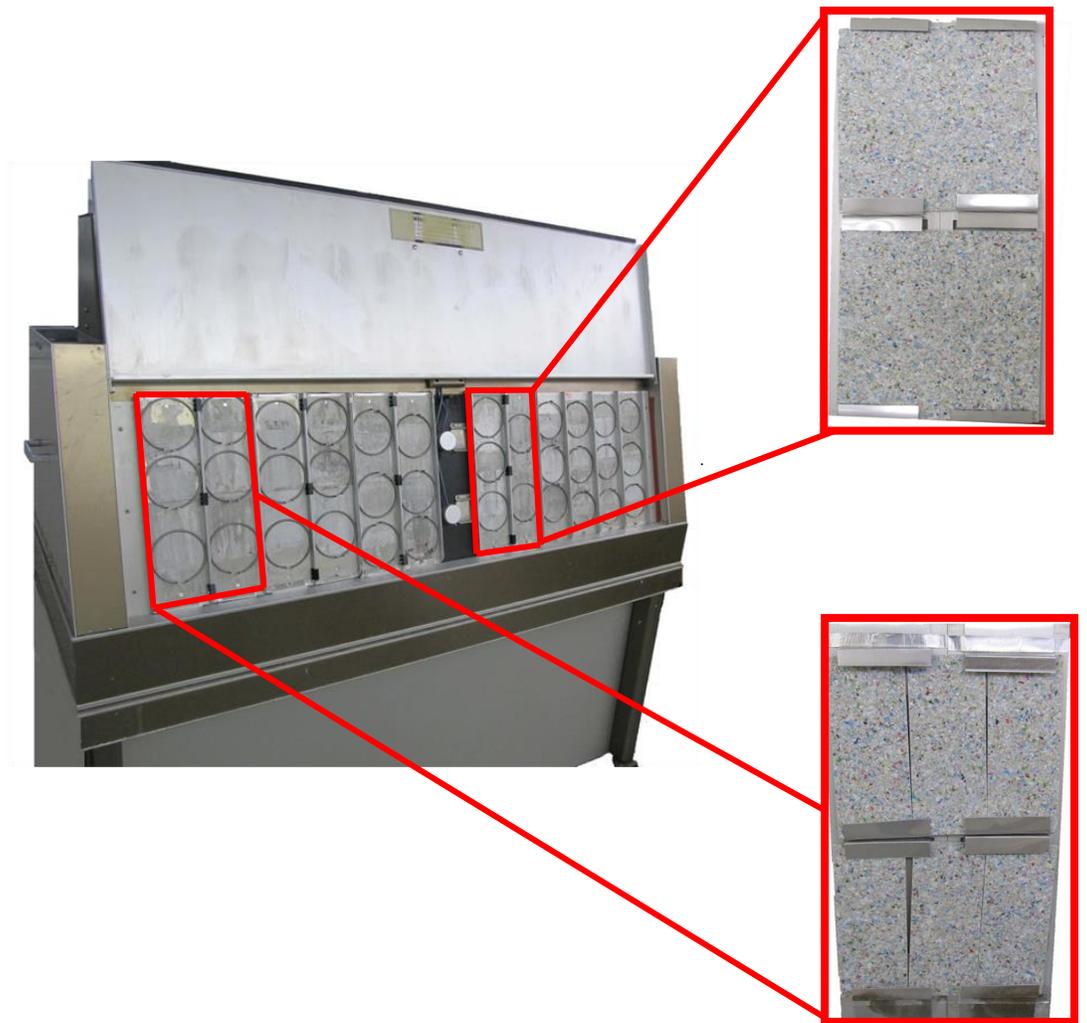
Transcurridas las 2 h las muestras son extraídas y secadas para retirar el exceso de agua, posteriormente se realizó el registro de peso y espesor de cada muestra e inmediatamente fueron sumergidas en el agua nuevamente para continuar con la prueba. Al concluir las 22 h de inmersión restantes, de igual manera como se realizó anteriormente se procedió al secado de las muestras para el registro de peso y espesor. Es importante mencionar que durante toda la prueba, es decir tanto la inmersión de 2 h, así como las de las 22 h, posteriores las probetas siempre se encontraron sumergidas, sin tener la necesidad de ponerle un contrapeso para evitar que floten.

### **3.4.3. Intemperismo acelerado**

Las muestras de los aglomerados son sometidas a una prueba de intemperismo acelerado en una cámara de envejecimiento acelerado Q-PANEL modelo QUV-SE, la cual fue equipada con lámparas fluorescentes UVB-313 nm, las lámparas emiten radiación ultravioleta que ocasiona una reducción en el tiempo de exposición, respecto a la exposición con radiación natural del sol.

Los ensayos de degradación acelerada se realizaron de acuerdo a la norma ASTM G151 y G154, el método consiste básicamente en exponer los materiales a la radiación e ir monitoreando a intervalos constantes, los cambios en las propiedades mecánicas, así como los cambios en la superficie mediante la inspección visual <sup>[70,71]</sup>.

Cabe mencionar que en un principio solamente se pudieron introducir dos lotes para cada una de las pruebas, y la extracción de las mismas se programó de acuerdo a diferentes períodos de exposición e inmediatamente se introdujeron los lotes restantes. En la Figura 20 se muestra la disposición final de las probetas de flexión y absorción de agua en los porta muestras de la cámara de intemperismo.



**Figura 20.** Disposición de las probetas en los porta muestras de la cámara de intemperismo.

De acuerdo con la literatura, es importante mencionar que en la mayoría de los casos, es necesaria la evaluación periódica de los materiales para determinar la variación de las propiedades en función del tiempo de exposición. De acuerdo a lo anterior se debe de seleccionar un tiempo de exposición que sea capaz de producir las mayores diferencias de rendimiento entre los materiales de prueba y el material de control.

Es importante aclarar que el tiempo de exposición que produce un cambio significativo en un tipo de material no necesariamente corresponde o es aplicable a otros materiales [80,110, 111,114].

El tiempo de exposición de las muestras tanto para las pruebas a flexión y absorción de agua fue de 0, 500, 1000 y 2000 h, con ciclos de UV/condensación de 4 h cada uno a 50/40 °C respectivamente y mediante el empleo de lámparas UVB-313 nm e irradiación de 0.70 W/m<sup>2</sup> [70,71, 118]. En la Tabla 7 se puede observar el cronograma con los tiempos de extracción y las pruebas a las que fueron sometidas las muestras una vez que concluyó el proceso de intemperismo acelerado.

**Tabla 7.** Cronograma de intemperismo acelerado.

Lote	Tiempo de exposición (h)	Fecha de inicio	Fecha de salida	Observaciones
2	500	2 Junio	23 Junio	Flexión y absorción
3	1000	21 Abril	2 Junio	Flexión y absorción
4	2000	21 Abril	14 Julio	Flexión y absorción

A medida que incrementa el tiempo de exposición, de manera general los diferentes estudios han reportado un cambio de color en las muestras y la correspondiente disminución de sus propiedades.

Por ejemplo Moya *et al.*, emplearon lámparas UVA de 310 nm de longitud de onda y con un tiempo de exposición total de 600 h. Concluyeron que las mezclas con los envases Tetra Brik<sup>®</sup> presentan el mejor rendimiento, ya que la superficie mostró pocas irregularidades [110].

Mientras que Roy *et al.*, utilizaron lámparas UVB de 313 nm para exponer

películas de LDPE. Realizaron diversos tiempos de exposición de 0, 100, 200, 400 y 600 h; concluyendo que la fotodegradación del LDPE puede ser acelerado mediante el uso de PE degradado térmicamente por medio de estearato de cobalto. El tiempo de exposición se determinó siguiendo las normas ASTM D 4329-13 y D6662-13 correspondientes a intemperismo acelerado <sup>[118,119]</sup>.

#### **3.4.4. Intemperismo natural**

El intemperismo natural es el método más preciso para estudiar la durabilidad o tiempo de vida útil de los materiales. Cabe mencionar que las condiciones de exposición más apropiados son aquellos que coinciden con el entorno en el que va a estar en servicio el material <sup>[75,77,81]</sup>.

Para esta prueba cabe mencionar que las diferencias entre los sitios en los que se realiza y los períodos de exposición a la intemperie pueden conducir a resultados variables. Para plásticos y diversos recubrimientos, la temperatura, la humedad y la radiación UV son factores importantes, debido a que inciden directamente en la degradación del material <sup>[77,85]</sup>.

Con el fin de exponer las muestras a las condiciones normales de luz solar, calor y presión se procedió a someterlas a intemperismo natural. Así como para tener un estudio más completo y una correlación con los datos de intemperismo acelerado.

Para realizar la prueba de envejecimiento natural primero se tuvo que elaborar una estructura que fuera capaz de soportar dicha exposición y en la cual se puedan fijar las muestras. En este caso se optó por una estructura metálica, la cual se manufacturó de acuerdo a la norma ASTM D 1435-13. Para este estudio se consideró el ángulo de exposición de 45° (Ver Figura 21) <sup>[83]</sup>.



**Figura 21.** Estructura elaborada para exposición de las probetas de flexión a intemperismo natural.

Los ensayos de degradación natural se realizaron a dos lotes y de acuerdo a la norma ASTM D 1435-13, y consistió básicamente en exponer los materiales a la radiación e ir monitoreándolo mediante inspección visual en tiempos definidos. De igual manera se estudió el comportamiento de los aglomerados al transcurrir el tiempo de exposición, mediante las pruebas a flexión.

Es importante mencionar que estas pruebas no son útiles para determinar de manera general las características del tiempo de vida útil de cualquier material ni para todos los climas del mundo, los datos obtenidos son sensible a un grupo específico de parámetros <sup>[78,80,81,82]</sup>.

Entre los parámetros ambientales podemos mencionar la humedad, lluvia, niebla, irradiación solar, etcétera. En este sentido cabe mencionar que las diferencias entre los sitios en los que se realiza y los períodos de exposición a la intemperie pueden conducir a resultados variables <sup>[4,74,82]</sup>.

Para el presente estudio el tiempo de exposición de las muestras fue de 0, 8 y 16 semanas, en el período de Julio a Octubre del 2015 en la ciudad de Mérida, Yucatán. Las coordenadas de la ubicación de las muestras fueron 21° 1' 5.1" N

89° 39' 37.6" W, expuestas en dirección al sur y con una inclinación de 45°. En la Tabla 8 se puede observar el cronograma con los tiempos de extracción de las muestras.

**Tabla 8.** Cronograma de intemperismo natural.

Lote	Tiempo de exposición (semanas)	Fecha de inicio	Fecha de salida	Observaciones
5	8	8 Julio	2 Septiembre	Flexión
6	16	8 Julio	28 Octubre	Flexión

### **3.4.5. Caracterización para el estudio de la degradación**

Distintos métodos son empleados para la caracterización de los cambios fisicoquímicos. En este caso, las muestras sin intemperismo, al igual que las expuestas a intemperismo acelerado y natural fueron analizadas por FTIR y DSC.

La espectrometría, principalmente la de infrarrojo; se utiliza principalmente para detectar la formación o desaparición de grupos funcionales <sup>[85, 87]</sup>. Mientras que, para las propiedades térmicas de las muestras, como la temperatura de fusión se emplea el DSC.

#### 3.4.5.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Para esta prueba se empleó el equipo Diamond DSC de la marca Perkin Elmer, y se realizó de acuerdo a la norma ASTM D3418-15. En este sentido cabe mencionar que previo a las pruebas, se llevó a cabo la tara de las charolas de aluminio con ayuda de una balanza analítica digital de la marca AND GR-200. Posteriormente se pesaron las muestras, cabe mencionar que se recomienda manejar aproximadamente 10 mg para evitar saturar la charola y por último se procedió a cerrarlas con ayuda de la prensa del equipo <sup>[120]</sup>.

Se realizaron 2 barridos térmicos, en primer lugar se realizó el calentamiento de 50-200 °C y enfriamiento de 200-50 °C, con isoterma de 5 min a 50 °C, con una rampa de calentamiento de 10 °C/min. Para el segundo barrido, las muestras se calentaron y se enfriaron bajo las mismas condiciones. Para todas las mediciones se empleó nitrógeno como gas de purga y una charola de aluminio vacío se utiliza como referencia. Cabe mencionar que el primer barrido se realizó para borrar el

historial térmico de la muestra.

En general las propiedades térmicas de las muestras pueden ser afectadas debido a la oxidación y a la ruptura de las cadenas moleculares, afectando principalmente, la temperatura de fusión <sup>[4,23, 24]</sup>. Mediante esta técnica se puede obtener la entalpía ( $\Delta H_f$ ), temperatura de fusión ( $T_f$ ) y porcentaje de cristalinidad ( $X_c$ ).

El porcentaje de cristalinidad de los polímeros se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \cdot 100 \quad (7)$$

Donde

$X_c$ =Porcentaje de cristalinidad teórica

$\Delta H_f$ =Calor de fusión obtenido de las muestras en el segundo calentamiento

$\Delta H_f^0$ =Calor de fusión del polietileno completamente cristalino (290 J/g) <sup>[121,122]</sup>.

En torno al porcentaje de cristalinidad y la temperatura de fusión ( $T_f$ ), se estudia como se ve afectada a medida que aumentaba el tiempo de exposición de la muestras.

#### 3.4.5.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)

En los polímeros la degradación se presenta principalmente de manera superficial, por lo que se espera que las caras expuestas directamente a la radiación sean las afectadas <sup>[4,60, 114]</sup>.

La caracterización del material se realizó de acuerdo a la norma ASTM E1252–13e1 y empleando el equipo Nicolet 8700 Thermo Scientific, operando en el modo de reflexión total atenuada (ATR) <sup>[123]</sup>.

Cabe mencionar que para el análisis de las muestra se realizan tres repeticiones en el lado expuesto al intemperismo, tanto al acelerado como al natural. En el caso de intemperismo acelerado, es importante mencionar que a las muestras con 2000 h de exposición, en lugar de tres repeticiones se realizaron cinco repeticiones en distintos puntos de la superficie expuesta, con el fin de obtener datos representativos.

Mediante el estudio por ATR, se realizó el análisis de la degradación del material, centrándose en la región de los grupos carbonilos de  $1800\text{ cm}^{-1}$  a  $1600\text{ cm}^{-1}$  y los hidroperóxidos  $3554\text{ cm}^{-1}$  [59,63, 124].

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. OBTENCIÓN DE LOS AGLOMERADOS DE TETRA BRIK® RECICLADO**

Se obtuvo un material compuesto aglomerado con características similares a los aglomerados disponibles de manera comercial. Es importante mencionar que para mejorar las propiedades hidrofóbicas del material, se agrega HDPE reciclado como parte de la formulación.

El resultado de este proceso fue la obtención de aglomerados con acabado liso, distribución de partículas homogéneo y la facilidad de maquinarlos para la obtención de las probetas.

Se procesaron 60 láminas, de las cuales se usaron 50 para la obtención de las probetas para las pruebas de flexión a 3 puntos, absorción de agua, y para las pruebas de intemperismo acelerado y natural. Una vez que se terminó el termo-moldeo el material fue retirado del molde y se procedió a la eliminación de las rebabas que se generaron.

Posteriormente se llevó a cabo el registro de peso y espesor; lo anterior para poder descartar del estudio las muestras que estuvieron muy por debajo del peso promedio, es decir en las que se generó una mayor cantidad de pérdida de material por las rebabas.

#### **4.2. Caracterización de los aglomerados**

La caracterización de los aglomerados estudiados aquí, fue realizada ante absorción de agua y la identificación de las propiedades mecánicas ante flexión a tres puntos. Las muestras fueron tratadas previamente ante intemperismo acelerado desde 0, 500, 1000 y 2000 horas (ver Tabla 6).

Cabe mencionar que tanto para las pruebas de absorción de agua, así como para las de flexión a tres puntos se designó 1 lote, el cual fue estudiado sin intemperismo. El estudio se complementó con dos lotes de muestras sometidas a intemperismo natural durante 8 y 16 semanas, evaluadas a flexión. Lo anterior se realizó para poder determinar el grado de degradación que se genera ante una simulación climática y cómo ésta repercute en la disminución de sus propiedades tanto físicas como mecánicas y su comparación en el ambiente natural.

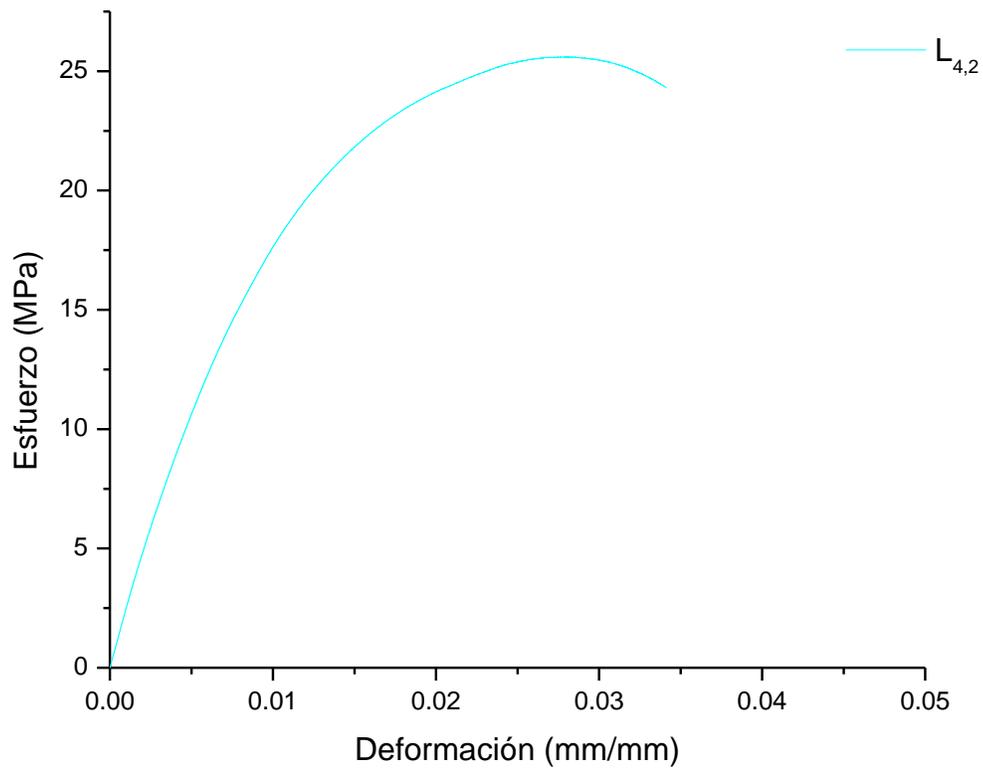
### **4.2.1. Prueba mecánica de flexión a 3 puntos**

Con la realización de las pruebas de flexión a tres puntos se obtuvieron datos sobre el comportamiento de los aglomerados en condiciones de degradación reales. Los resultados obtenidos se compararon con los valores obtenidos en estudios previos, así como con el lote que no fue expuesto a ningún tipo de intemperismo y con los reportados para materiales comerciales hechos a base de los envases Tetra Brik®.

#### 4.2.1.1. Estudio sin intemperismo

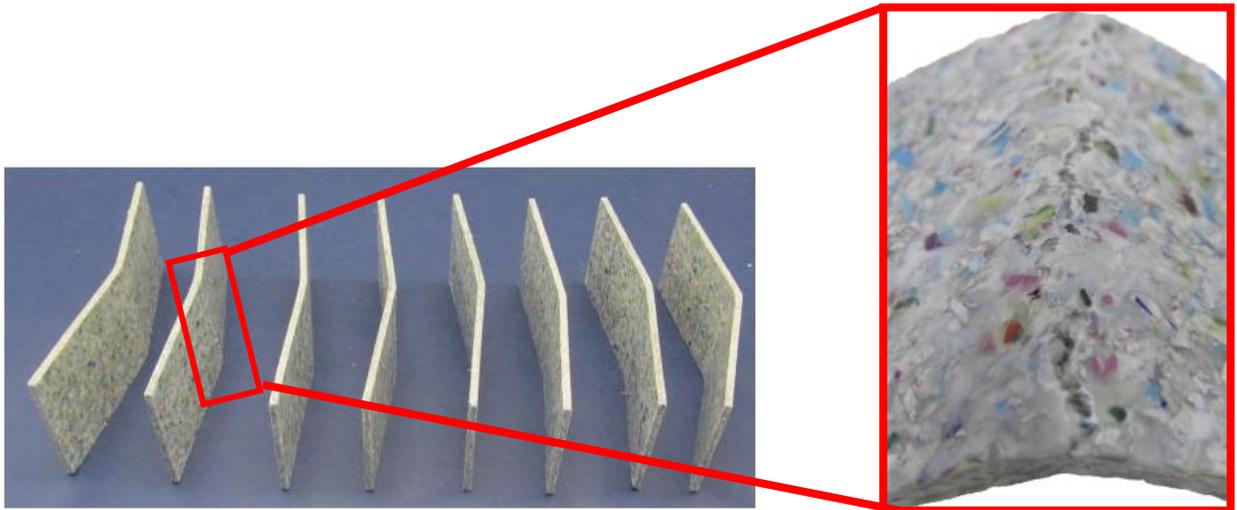
Los ensayos mecánicos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D1037-12, en la Figura 22 se presenta la curva representativa del comportamiento de la muestra L<sub>4,2</sub> del lote 1 (sin intemperismo), sometido a flexión. Se puede observar una parte lineal al inicio de la prueba, que corresponde a la zona elástica del comportamiento mecánico del material que se extiende hasta los 10 MPa aproximadamente y posteriormente se presentó un comportamiento dúctil. La prueba concluyó con la fractura de la muestra, la cual inicia con la presencia de grietas en la parte inferior (que se encuentra en tensión). Cabe mencionar que a partir de las pruebas de flexión a tres puntos para el lote 1, se obtuvo una carga máxima promedio de  $115.92 \pm 2.04$  N dando como resultado un esfuerzo máximo a flexión o también conocido como módulo de ruptura de  $25.63 \pm 0.45$  MPa y un módulo elástico a flexión de  $2.09 \pm 0.19$  GPa. Cabe mencionar que como se mencionó anteriormente el módulo de ruptura del material para el lote 1 corresponde a  $25.63 \pm 0.45$  MPa y es comparable con el módulo de ruptura de 26.70 MPa reportado por Pool en su estudio <sup>[103]</sup>.

De manera general, el modo de falla de las muestras durante el ensayo se puede observar que inicia con la deformación, prosigue hasta alcanzar el esfuerzo máximo y finalmente se fracturan. Es importante mencionar que al retirar la carga ejercida, a simple vista se puede observar una deformación permanente en todas las probetas.



**Figura 22.** Curva típica de la probeta  $L_{4,2}$  con 0 h de exposición sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

En la Figura 23 se presentan las muestras correspondientes al lote 1 posteriores al ensayo, con un acercamiento en la región de falla del material, observando una propagación lineal de la grieta con respecto a la carga ejercida.



**Figura 23.** *Falla típica del material con 0 h de exposición después de la prueba de flexión a 3 puntos.*

#### 4.2.1.2. Estudios con intemperismo acelerado

Para esta prueba el estudio consta de un total de 3 lotes con diferentes tiempos de exposición (500 h, 1000 h y 2000 h). Al concluir el tiempo de exposición programado para cada grupo de muestras, los especímenes fueron evaluados con pruebas de flexión a tres puntos. Lo anterior se realizó para poder obtener un estudio que permita determinar el grado de degradación que se puede lograr ante esta simulación climática y cómo ésta repercute en la disminución de sus propiedades mecánicas.

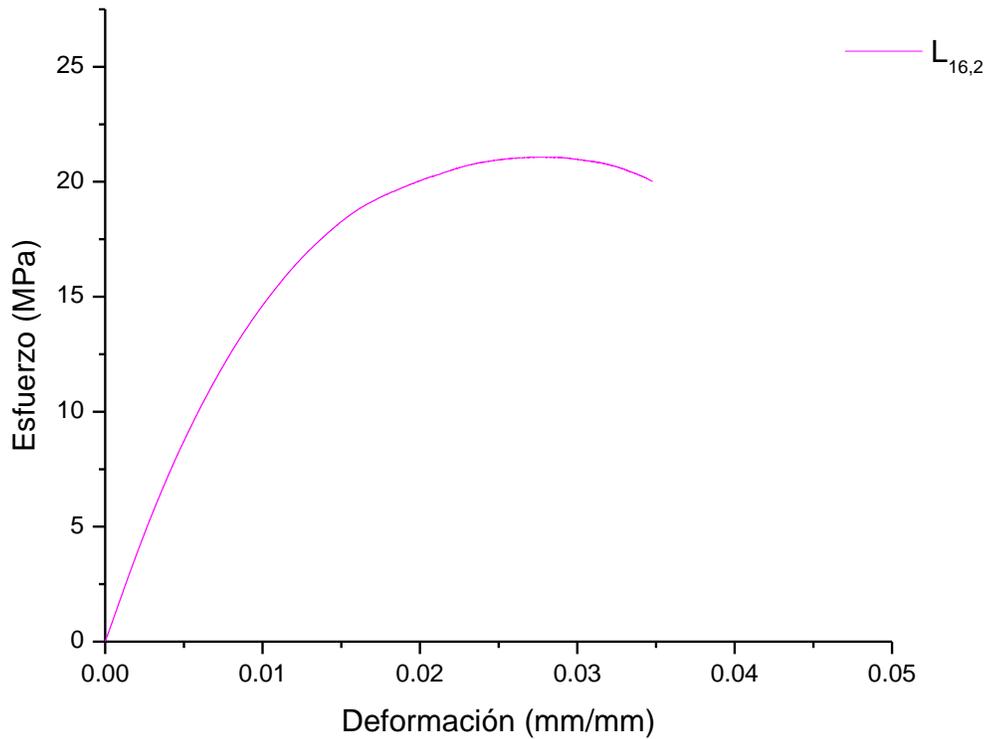
Con un tiempo de exposición de 500 h a intemperismo acelerado, la Figura 24 presenta el diagrama esfuerzo/deformación de la muestra L<sub>16,2</sub> del lote 2 al ser sometido a flexión.

Al inicio de la prueba se puede observar una parte lineal, atribuida a la zona elástica del material hasta aproximadamente 8 MPa y posteriormente un comportamiento dúctil, hasta alcanzar el esfuerzo máximo. Por último la prueba concluye con la fractura de la muestra, debido a la presencia de grietas en la parte inferior de la muestra. Al igual que en el lote anterior al retirar la carga ejercida, a simple vista se puede observar una deformación permanente en todas las probetas.

A partir de las pruebas de flexión a tres puntos para el lote 2 se obtuvo una carga máxima promedio de  $91.16 \pm 6.17$  N, módulo elástico a flexión de  $1.63 \pm 0.20$  GPa y módulo de ruptura de  $20.16 \pm 1.36$  MPa.

Se puede apreciar que el comportamiento es muy similar al lote sin intemperismo acelerado, aunque con magnitudes inferiores, atribuido a la exposición de irradiación, temperatura y humedad al que fueron expuestos durante 500 h. La exposición continua a los factores mencionados anteriormente, provocó una degradación mecánica, debido a que de manera constante las muestras sufrieron hinchamiento (expansión) por parte de la condensación e inmediatamente eran sometidas a la radiación UV, provocando un incremento en la temperatura y secado (contracción) de las muestras al eliminarse el exceso de humedad en la cámara de intemperismo.

Por otra parte, enfocándose en el efecto de la irradiación la disminución de las propiedades es atribuida a la foto-oxidación, principalmente por la ruptura de las cadenas poliméricas, dando como resultado una disminución del peso molecular y decoloración y aumento en la fragilidad <sup>[4,20,59,64]</sup>.



**Figura 24.** Curva típica del lote con 500 h de envejecimiento acelerado sometido a la prueba de flexión a tres puntos.

En la Figura 25 se presenta las muestras correspondientes al lote 2 posteriores a la prueba de intemperismo acelerado, con un acercamiento en la región expuesta del material. A simple vista, solamente se observó una disminución del color en la superficie expuesta a la radiación; como se puede ver en la imagen, no se observó ningún daño superficial importante en comparación con las muestras sin intemperismo acelerado.



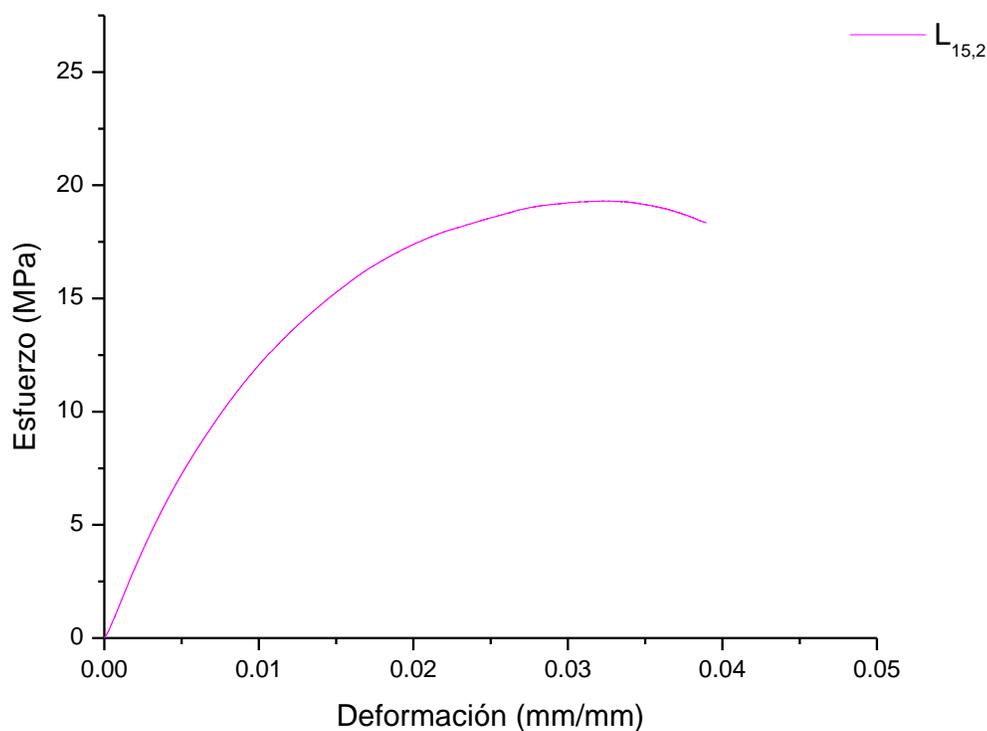
**Figura 25.** Muestras del lote 2 expuesto a 500 h de intemperismo acelerado.

En la Figura 26 se presenta el comportamiento de la muestra L<sub>15,2</sub> al ser sometido a flexión, que corresponde a muestras con un tiempo de exposición de 1000 h a intemperismo acelerado (lote 3).

De manera general, al igual que en el caso anterior se presenta una parte lineal al inicio de la prueba, identificada como la zona elástica del material que se extiende hasta los 8 MPa aproximadamente, después soportando una carga máxima de  $87.32 \pm 5.51$  N alcanza su esfuerzo máximo y concluye con la fractura de la muestra. Al igual que en el lote anterior al retirar la carga ejercida, a simple vista se puede observar una deformación permanente en todas las probetas.

De acuerdo con los valores de carga máxima que soportaron las muestras en las pruebas de flexión, se obtuvo que la carga máxima promedio para el lote 3 fue de  $87.32 \pm 5.51$  N, módulo de ruptura de  $19.31 \pm 1.21$  MPa, módulo elástico a flexión de  $1.50 \pm 0.15$  GPa. En comparación con los datos obtenidos en las

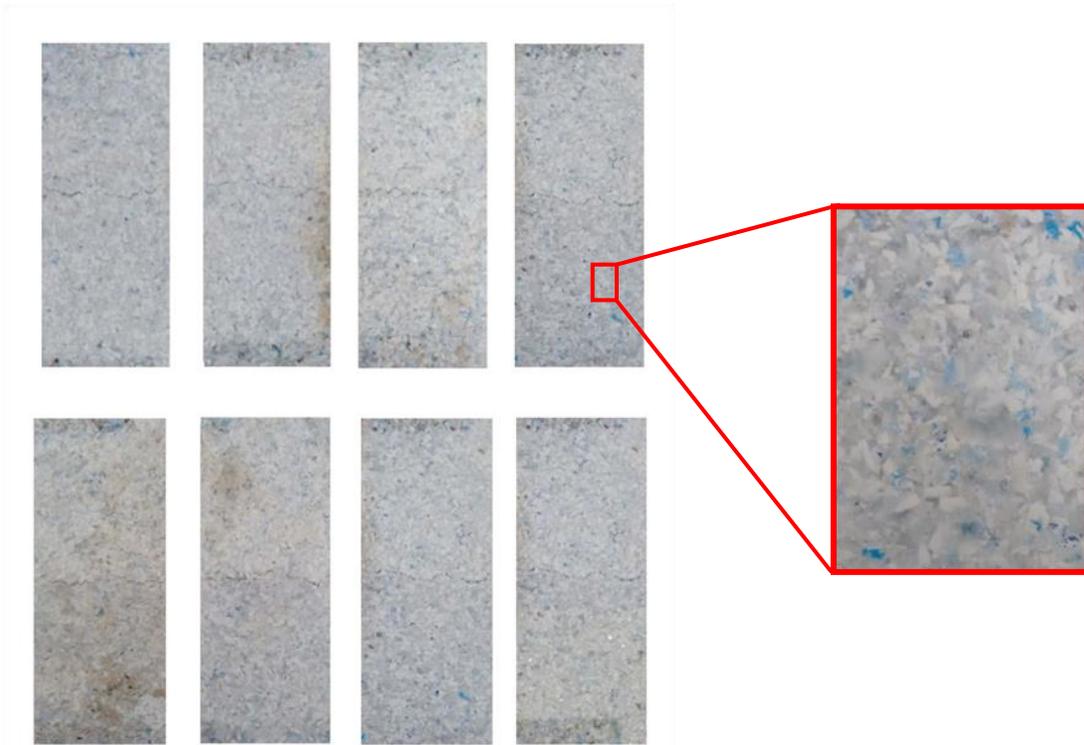
muestras sin intemperismo, para las muestras con 1000 h de exposición a intemperismo acelerado se puede apreciar una disminución del 25% en cuanto a la carga máxima soportada, así como para el módulo de ruptura. Mientras que para el módulo elástico a flexión se obtuvo una disminución del 28%, dichas disminuciones son atribuidas al tiempo de exposición del material. En general, la degradación del material debido a irradiación UV, temperatura y la humedad se vio reflejada en la disminución de las propiedades mecánicas a flexión y en la decoloración de las muestras, al igual que en el caso anterior.



**Figura 26.** Curva típica de la probeta  $L_{15,2}$  con 1000 h de exposición sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

En la Figura 27 se presenta el lote 3, a simple vista se puede observar una disminución de color más notable en la zona expuesta a intemperismo acelerado en comparación con los lotes 1 y 2, así como la aparición de manchas oscuras en algunas regiones de las muestras, principalmente iniciando en los bordes y

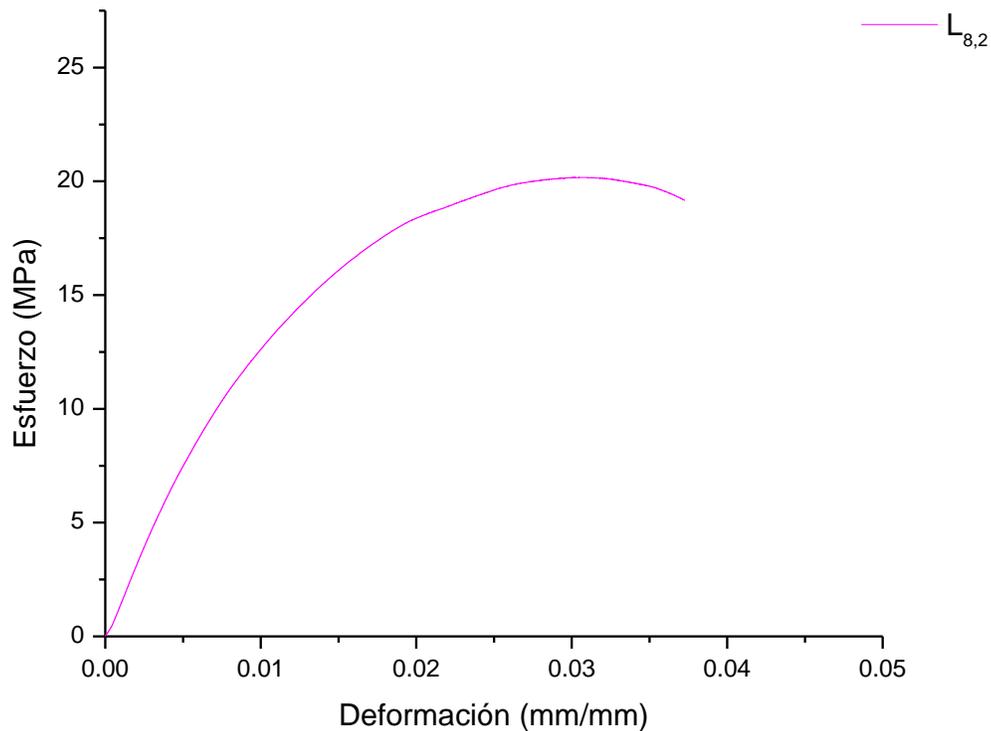
extendiéndose hasta el centro de las probetas.



**Figura 27.** Muestras del lote 3 expuesto a 1000 h de intemperismo acelerado.

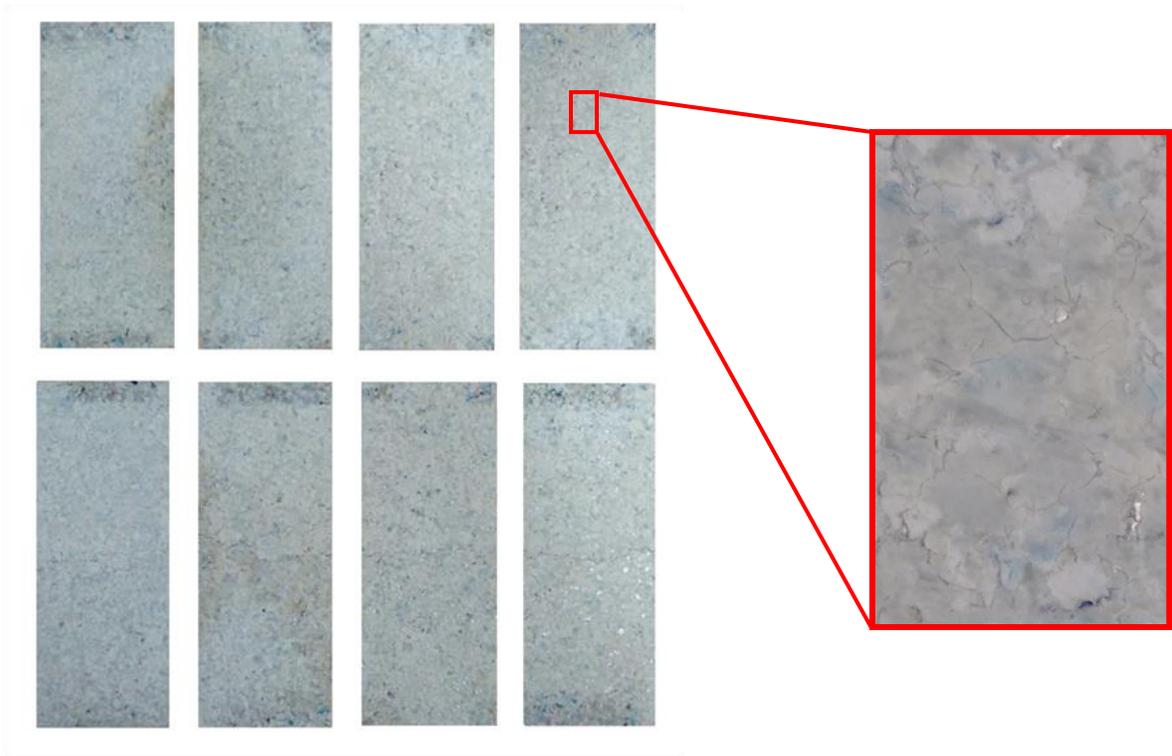
Por último con un tiempo de exposición de 2000 h a intemperismo acelerado, en la Figura 28 se presenta el diagrama esfuerzo/deformación de la muestra L<sub>8,2</sub> del lote 4 al ser sometido a flexión. Se puede observar que la zona elástica del material se extiende hasta los 8 MPa aproximadamente, continuando con la prueba se presentó un comportamiento dúctil hasta alcanzar el esfuerzo máximo a flexión y concluyó con la fractura de la muestra. Al igual que en los casos anteriores al retirar la carga ejercida se puede observar una deformación permanente en todas las probetas.

En general para el lote 4 se obtuvo una carga máxima promedio de  $91.17 \pm 2.82$  N, módulo elástico a flexión de  $1.60 \pm 0.13$  GPa y módulo de ruptura de  $20.16 \pm 0.62$  MPa. En este caso en comparación con las muestras sin intemperismo, se puede observar una disminución del 21% en la carga máxima soportada y en el esfuerzo máximo, y del 23% en el módulo elástico a flexión.

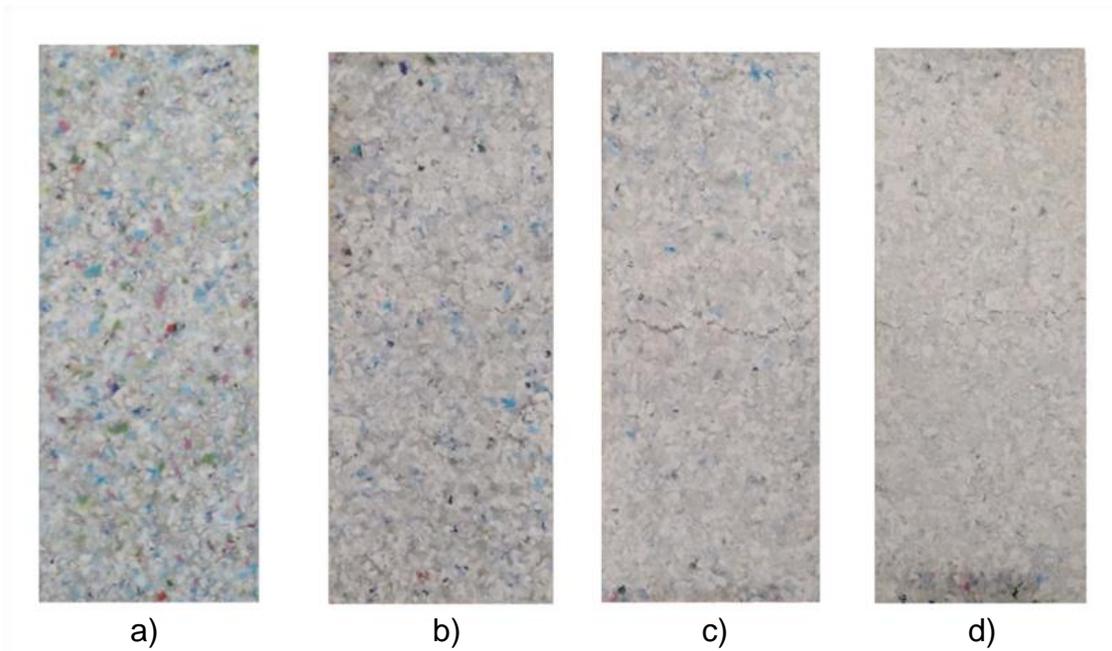


**Figura 28.** Curva típica del lote con 2000 h de irradiación sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

En la Figura 29 se presentan las muestras correspondientes al lote 4 posteriores a la prueba de intemperismo acelerado, con un acercamiento en la región expuesta del material. Cabe mencionar que al igual que en el caso del lote 3, también se presentaron manchas oscuras en la superficie expuesta a intemperismo acelerado, así como grietas superficiales y en algunos casos en ciertas zonas ya se encontraba expuesto la celulosa y el aluminio del material. En general en comparación con las muestras sin intemperismo se observó una disminución del color en la superficie expuesta a las condiciones determinadas, como se puede ver en la imagen (Ver Figura 30).



**Figura 29.** Muestras del lote 4 expuesto a 2000 h de intemperismo acelerado.



**Figura 30.** Comparación de muestras con y sin intemperismo acelerado, de izquierda a derecha a) 0 h, b) 500 h, c) 1000 h, d) 2000 h.

Entre los aglomerados que se encuentran en el mercado tenemos al Tectán<sup>®</sup>, Ecoplak<sup>®</sup>, Tablex<sup>®</sup>, entre otros. Al comparar los datos de las muestras sin intemperismo con los valores reportados para los materiales que se encuentran de manera comercial, se observó que para el material estudiado los valores obtenidos están por encima de algunos de ellos (Ver Tabla 9), lo anterior atribuido a las variantes en el proceso de reducción de partícula, así como en el conformado de las placas.

Es importante mencionar que tanto el material estudiado, así como con los que se comparan poseen características similares, lo anterior debido a que en ambos casos se trata de materiales que están hechos a base de los envases Tetra Brik<sup>®</sup>. En este contexto, debido a que la mayoría de los productos que se mencionaron anteriormente reportan tener la misma calidad y resistencia que los productos fabricados a base de madera, se incorporó en la comparación el Tablex<sup>®</sup> de Colombia, el cual emplea madera como materia prima <sup>[57]</sup>.

**Tabla 9.** Comparación del módulo de ruptura de los diferentes materiales.

Tectán <sup>®</sup>	Ecoplak <sup>®</sup>	Tablex <sup>®</sup>	Tetra Brik <sup>®</sup> /HDPE
14.95 MPa	20 MPa	17.60 MPa	25.63 ±0.45 MPa

De manera general se ha concluido que, la combinación de la radiación UV y la humedad incrementa las pérdidas de propiedades mecánicas debido a la degradación de la superficie y el aumento de la capacidad de humectación superficial. En este sentido, como se ha mencionado anteriormente la exposición a la radiación UV y al agua es más perjudicial que solo a la radiación UV.

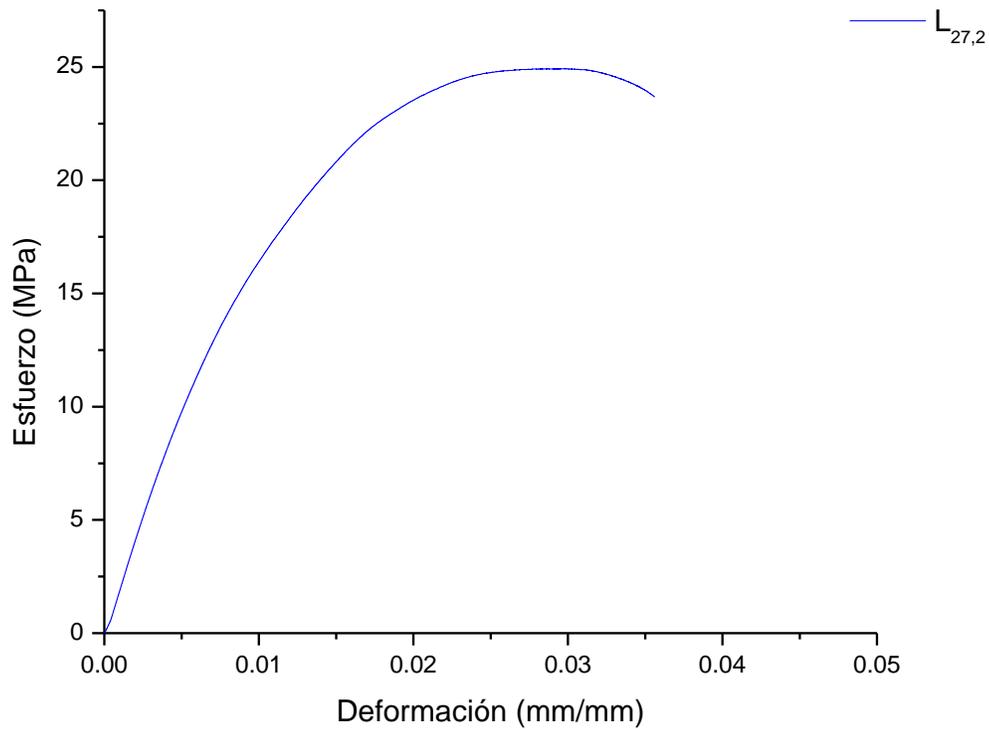
#### 4.2.1.3. Intemperismo natural

Cabe mencionar que, complementario al estudio de intemperismo acelerado, se incluyó un estudio de intemperismo natural. Al concluir el tiempo de exposición programado para cada grupo de muestras, los especímenes fueron evaluados con pruebas de flexión a tres puntos para poder obtener un estudio que permita determinar el grado de degradación.

En la Figura 31, se presenta la curva representativa del comportamiento de la

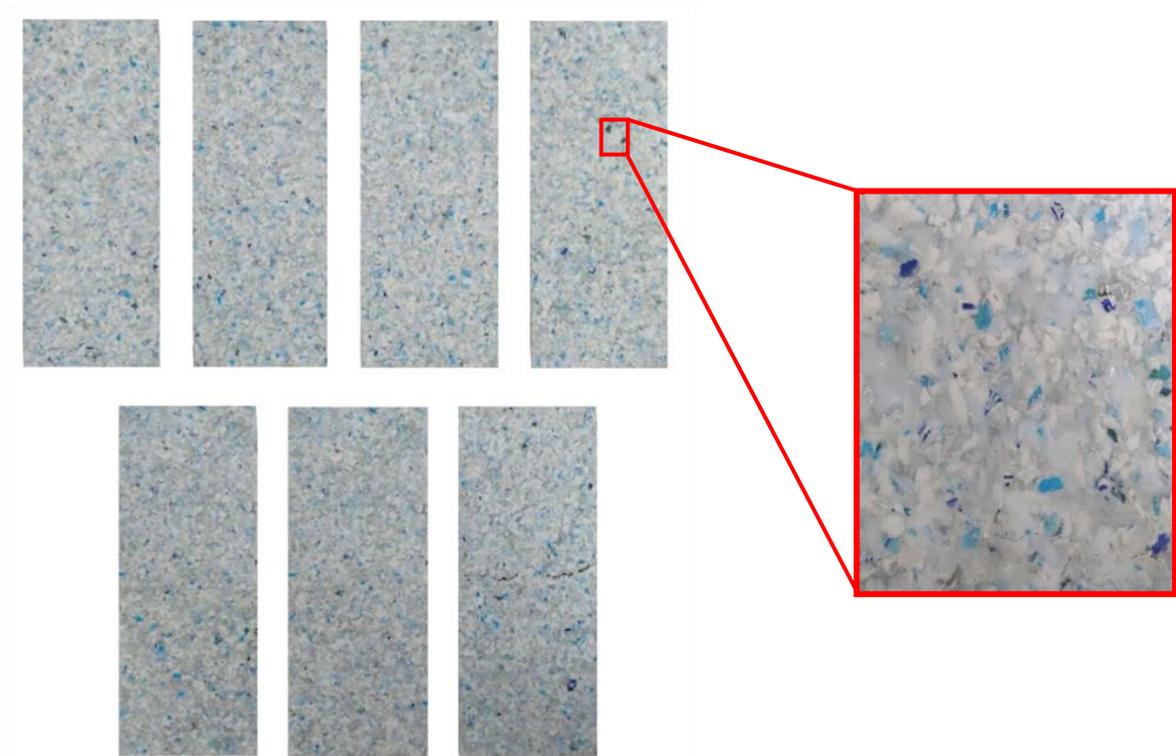
muestra L<sub>27,2</sub> del lote 5 (8 semanas), sometido a flexión. Se puede observar una parte lineal al inicio de la prueba, que corresponde a la zona elástica que abarca hasta los 10 MPa aproximadamente, pasando a un punto de cedencia, alcanzando su valor de esfuerzo máximo y concluyendo con la fractura de la muestra. Al retirar la carga ejercida, a simple vista se puede observar una deformación permanente en todas las probetas.

Después de una exposición de 8 semanas a intemperismo natural, para el lote 5 se obtuvo una carga máxima promedio de  $111.78 \pm 4.68$  N, módulo elástico a flexión de  $1.91 \pm 0.07$  GPa y módulo de ruptura de  $24.72 \pm 1.03$  MPa. Al hacer la comparación de los datos registrados en el lote sin intemperismo con los obtenidos en este lote, en general no se presentó una disminución notable en ninguno de los valores. Los valores son muy similares a los obtenidos en las muestras sin intemperismo; solamente se presentó una disminución del 4% para la carga máxima, así como para el esfuerzo máximo a flexión y del 9% en el módulo elástico a flexión.



**Figura 31.** Curva típica de las muestras sometidas a la prueba de flexión a tres puntos con 8 semanas de exposición a intemperismo natural.

En la Figura 32 se presentan las muestras correspondientes al lote 5 posteriores a la prueba y un acercamiento en la región expuesta a intemperismo natural, en donde se observó una decoloración menor en comparación con el lote 2 (500 h de intemperismo acelerado).



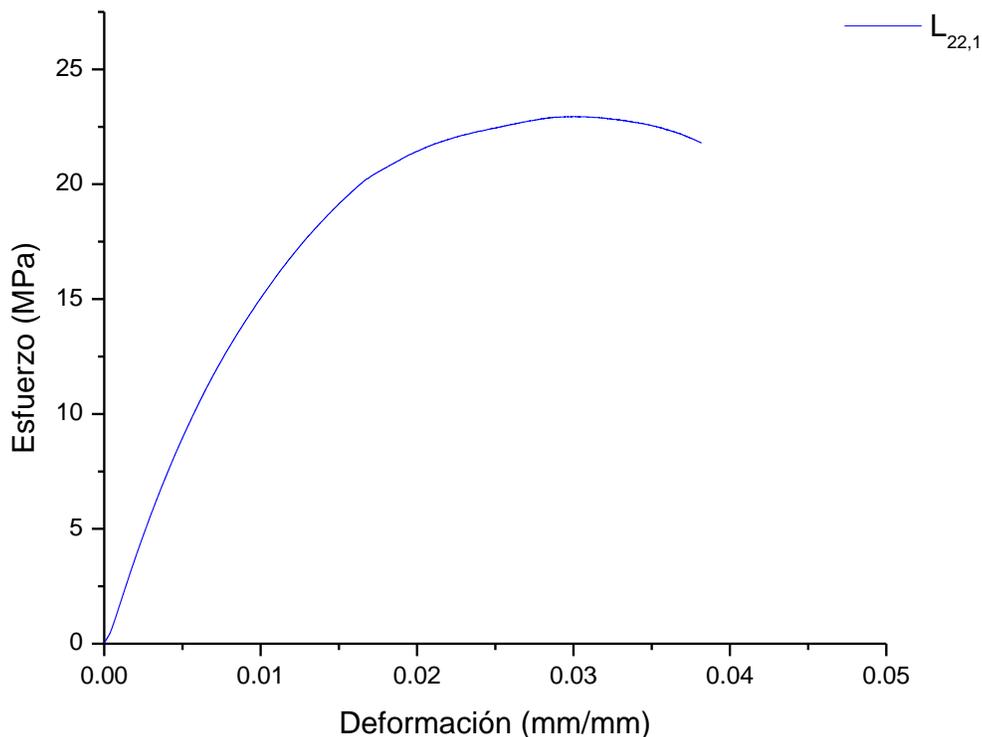
**Figura 32.** Muestras del lote 5 del material expuesto a 8 semanas de intemperismo natural.

Con un tiempo de exposición de 16 semanas a intemperismo natural, en la Figura 33, se presenta el diagrama esfuerzo/deformación de la muestra L<sub>22,1</sub> del lote 6 al ser sometido a flexión.

En torno a lo anterior, al igual que en los casos anteriores, se presenta una parte lineal al inicio de la prueba, señalada como la zona elástica del material que se extiende hasta 9 MPa aproximadamente, prosigue con un comportamiento dúctil hasta alcanzar su esfuerzo máximo a flexión, concluyendo con la fractura de la muestra y con la presencia de grietas.

Con los valores de carga máxima que soportaron las muestras, se obtuvo una carga máxima promedio de  $100.71 \pm 5.26$  N, módulo elástico a flexión de  $1.75 \pm 0.15$  GPa y módulo de ruptura de  $22.27 \pm 1.16$  MPa; los valores obtenidos en este lote fueron muy bajos comparados con los obtenidos en las muestras con intemperismo acelerado, que corresponde a aproximadamente la mitad de los resultados de las muestras con 500 h de exposición a intemperismo acelerado. En

comparación con el lote sin intemperismo se obtuvo una disminución del 13% en la carga máxima soportada, del 11% en el esfuerzo máximo a flexión y del 16% en el módulo elástico a flexión.



**Figura 33.** Curva típica del lote con 16 semanas de exposición a intemperismo natural sometida a la prueba de flexión a tres puntos.

En la Figura 34 se presentan las muestras correspondientes al lote 6 posteriores a la prueba y el acercamiento a la región expuesta; en general se observó una disminución del color en la superficie expuesta, como se puede ver en la imagen. Cabe mencionar el nivel de la decoloración de este lote sigue sin acercarse al lote 2 (500 h de intemperismo acelerado), al igual que en el caso anterior.

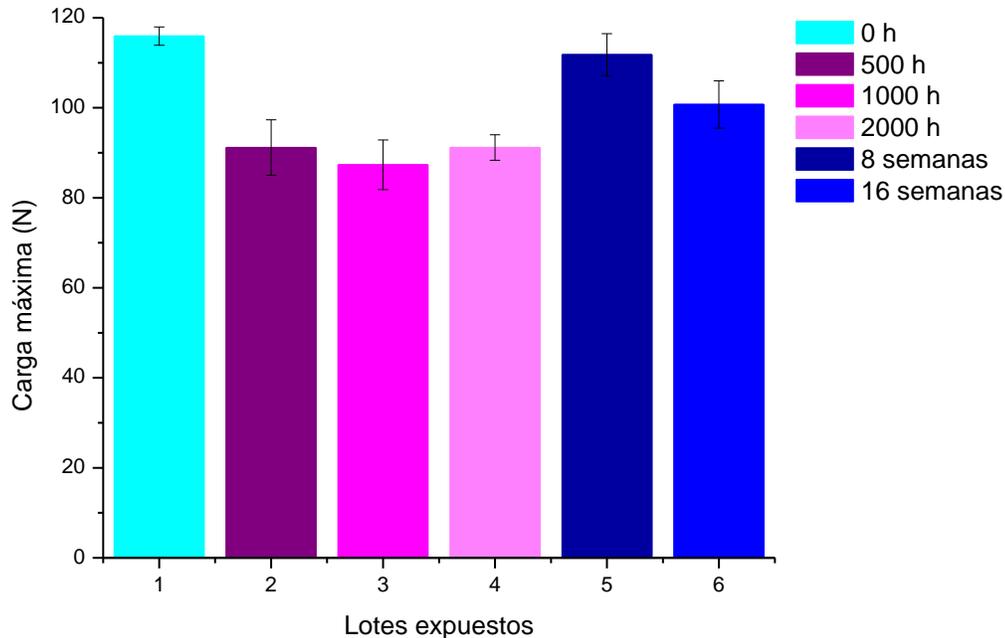


**Figura 34.** Muestras del lote 5 del material expuesto a 8 semanas de intemperismo natural.

Con respecto al tiempo y al tipo de intemperismo al que son expuestos cada uno de los lotes, en general se presenta una disminución en la carga máxima. En este sentido en la Figura 35 se puede apreciar que con 500 h de exposición a intemperismo acelerado se obtuvo una disminución equivalente a un 21%, con respecto a las muestras sin intemperismo y de un 25% para las de 1000 h de exposición. En contraste con las muestras anteriores, para el lote 4 cuyo tiempo de exposición fue de 2000 h de intemperismo acelerado se presentó un incremento de 21%, ocasionando un estancamiento en la pérdida de propiedades mecánicas, donde los tres tiempos evaluados traslapan sus valores de incertidumbre.

Para las muestras con intemperismo natural la tendencia de disminución fue menor, debido que el tiempo de exposición fue corto. El lote con 8 semanas de exposición mostró una disminución en la carga máxima soportada del 4% y del

13% para el lote de 16 semanas, ambos con respecto a las muestras sin intemperismo.



**Figura 35.** Comparación de la carga máxima promedio de las muestras a flexión.

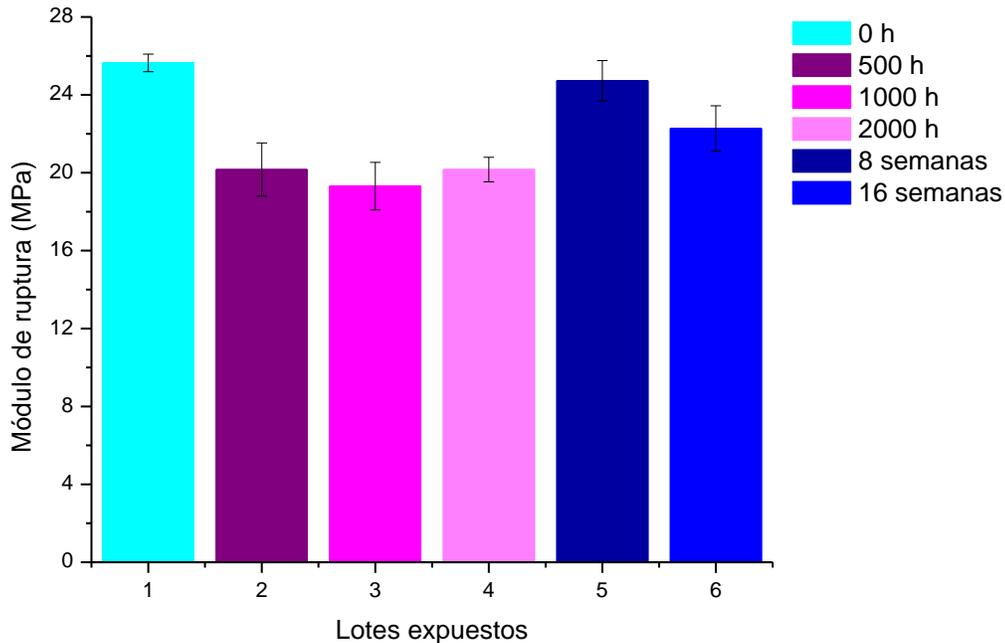
En la Figura 36 se pueden observar los valores del módulo de ruptura a flexión que se calcularon con los datos obtenidos de las pruebas de flexión a tres puntos.

El lote 2, que corresponde a 500 h de exposición presentó una disminución del módulo de ruptura equivale a un 21% con respecto a las muestras con 0 h de exposición, en las muestras con 1000 h de exposición la disminución fue del 25%.

Mientras que, para las de 2000 h se reportó un decremento del módulo de ruptura y se mantuvo en 21%, rigidez atribuida al aumento en la cristalinidad por la exposición de las muestras a los rayos UV. Al igual que en el caso de la carga máxima soportada, se presentó un incremento en el esfuerzo máximo a flexión ocasionando un estancamiento en la pérdida de propiedades mecánicas, donde los tres tiempos evaluados traslapan sus valores de incertidumbre.

En las muestras con una exposición de 8 semanas se pudo observar una disminución de aproximadamente el 4% del módulo de ruptura, con respecto a las

muestras sin intemperismo. Para las muestras con 16 semanas de exposición, los resultados mostraron una diferencia en el módulo de ruptura equivalente a una disminución del 11%.



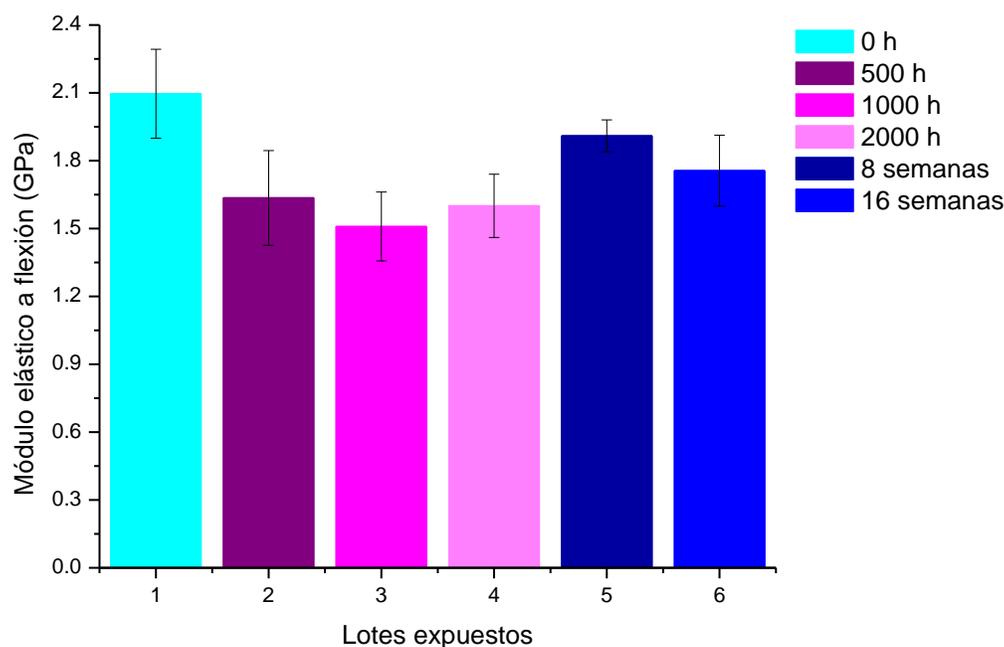
**Figura 36.** Comparación del módulo de ruptura de los lotes sometidos a flexión a tres puntos.

En la figura 37 se puede observar la tendencia del módulo elástico a flexión de cada uno de los lotes evaluados. Al igual que en los casos anteriores, se puede apreciar que el comportamiento de las muestras con intemperismo acelerado fue de una notoria disminución en el módulo elástico a flexión, en comparación con las muestras sometidas a intemperismo natural.

Para las muestras con 500 h de exposición se obtuvo una disminución del 22% con respecto a las de 0 h. Las muestras con 1000 h presentaron una disminución en su módulo alástico a flexión del 28% y del 23% el lote con 2000 h, donde este último menor decremento se interpreta como un estancamiento del módulo elástico a flexión. Cabe mencionar que, al igual que en los casos anteriores, en las muestras evaluados a intemperismo acelerado se traslapan sus valores de

incertidumbre.

Mientras que para las muestras con intemperismo natural se aprecia una tendencia menor a la disminución del módulo elástico a flexión, obteniendo una disminución de 180 MPa y 340 MPa para 8 y 16 semanas respectivamente. Lo anterior debido a que en el caso de las muestras expuestas a intemperismo natural, éstas no se encuentran sometidas continuamente a cambios drásticos en la temperatura, por lo que no se presentó de igual manera la expansión y contracción, dando como resultado una menor degradación superficial del material.



**Figura 37.** Comparación del módulo elástico a flexión de los lotes sometidos a flexión a tres puntos.

En general, en las mezclas de polímeros se encontró que el HDPE da lugar a materiales más rígidos, con buena resistencia a la tensión y en el caso del LDPE, este material brinda flexibilidad. En el caso de la resistencia a la flexión en las mezclas de poliolefinas se ha reportado valores mayores en comparación con los

componentes puros <sup>[20,33]</sup>.

En este sentido, para el HDPE González reportó 20 MPa, 7 MPa para el LDPE mientras que para la mezcla con 45PP/45HDPE/10LDPE reportó una resistencia a la flexión de 25.57 MPa, comparable al valor calculado en lote sin intemperismo de  $25.63 \pm 0.45$  MPa. La disminución más drástica se presentó en el lote con 500 h de intemperismo acelerado a  $20.16 \pm 1.36$  MPa, cuyo valor es comparable con la del HDPE. En torno al módulo elástico a flexión para el HDPE se reportó 659.48 MPa, 200 MPa del LDPE y 700 MPa para la mezcla 45PP/45HDPE/10LDPE, mientras que para nuestra mezcla el módulo elástico fue de  $2.09 \pm 0.19$  GPa <sup>[33]</sup>.

Con el análisis de los resultados y la literatura de la mezcla de polímeros, se puede concluir que, aunque los dos PE son inmiscibles, se ha encontrado que las mezclas HDPE/LDPE son miscibles en su fase amorfa, dando como resultado una miscibilidad parcial, dependiendo de las condiciones de proceso, del peso molecular y de la densidad de los materiales.

#### ***4.2.2. Prueba de absorción de agua***

##### **4.2.2.1. Sin intemperismo**

Para esta prueba las probetas se sumergieron durante 2 h en agua y se determinó el porcentaje de absorción. Se observó, para las muestras no expuestas a intemperismo una baja absorción de agua de  $0.91\% \pm 0.09$ , atribuido al HDPE que se utilizó durante el procesamiento (ver Tabla 10); debido a que es el material que se encuentra presente en mayor porcentaje en comparación con LDPE de los envases.

En este sentido, la incorporación y distribución del HDPE en los aglomerados actúa como un aglutinante, que prácticamente encapsula al papel que se encuentra presente en los envases y con esto se disminuye la absorción de agua del material estudiado, debido a que de los materiales que componen el aglomerado, el papel es el material con mayor capacidad de absorción de agua.

Mientras que al transcurrir las 22 h adicionales de inmersión en agua se obtuvo un incremento moderado del  $2.64\% \pm 0.27$ .

Díaz, en su estudio de absorción de agua obtuvo que sus aglomerados con 0% de adición de HDPE, los cuales presentaron un mayor porcentaje de absorción de agua, que corresponde a  $6.15\% \pm 0.014$  y de  $23.8\% \pm 0.034$  para 2 hrs y de 24 hrs respectivamente <sup>[102]</sup>.

De acuerdo con lo anterior, al hacer una comparación de los resultados del presente trabajo con estudios en donde los aglomerados tienen 0% de adición de HDPE, es decir son 100% de envases Tetra Brik<sup>®</sup>; se observó que estos últimos presentaron un porcentaje de absorción de agua mayor.

#### 4.2.2.2. Intemperismo acelerado

Los lotes 2, 3 y 4 corresponden a muestras que fueron sometidas a envejecimiento acelerado, con 500 h, 1000 h y 2000 h respectivamente, fueron sometidos igualmente a pruebas de absorción de agua. De acuerdo con la Tabla 10, no se presentaron cambios significativos en el incremento de la capacidad de absorción de agua conforme aumentó el tiempo de exposición a intemperismo acelerado. Lo anterior se atribuye a que solamente se presentó una degradación superficial (erosión) en la cara expuesta a intemperismo, la capacidad de absorción de agua de las muestras no se vio afectada.

En este sentido se observó que después de 500 h de exposición las muestras después con dos horas de inmersión presentaron un  $1.95\% \pm 0.38$  de absorción de agua, que incrementó a  $2.28\% \pm 0.18$  al concluir la prueba (24 h). Por otra parte para las probetas con mayor tiempo de exposición a intemperismo acelerado (2000 h) se obtuvo  $2.52\% \pm 0.42$  en las primeras dos horas y  $2.56\% \pm 0.26$  al transcurrir las 22 horas restantes de la prueba de absorción de agua del estudio.

**Tabla 10.** Registro del porcentaje de absorción de agua.

Lote	Condiciones de exposición	Tiempo de exposición (h)	Absorción (%)	
			2 hrs	22 hrs
1	Sin intemperismo	0 h	$0.91 \pm 0.09$	$2.64 \pm 0.27$
2	Con intemperismo acelerado	500 h	$1.95 \pm 0.38$	$2.28 \pm 0.18$
3	Con intemperismo acelerado	1000 h	$2.06 \pm 0.55$	$2.57 \pm 0.40$
4	Con intemperismo acelerado	2000 h	$2.52 \pm 0.42$	$2.56 \pm 0.26$

### **4.2.3. Estudio de la degradación**

Las muestras sin intemperismo, al igual que las expuestas a intemperismo acelerado y natural fueron analizadas por FTIR y DSC. En general se emplean varios métodos para la caracterización de los cambios fisicoquímicos. Entre los métodos se encuentran el de espectrometría, principalmente la de infrarrojo; que se utiliza principalmente para detectar la formación o desaparición de grupos funcionales, en este caso cromóforos <sup>[4,85, 87]</sup>.

Por otra parte, los cambios físicos en la superficie, como los cambios en la textura y el agrietamiento, también son indicadores de la degradación <sup>[114]</sup>.

En el caso de los polímeros reciclados post-consumo, la imposibilidad de poder controlar las propiedades de partida, sumado a la posibilidad de contaminación de un plástico con otro, debido a la difícil separación entre polímeros con similitudes en cuanto a densidad y propiedades físicas; hacen que las mezclas de polímeros reciclados tengan un grado de dificultad adicional. Para el presente estudio, en cuanto a la mezcla de PE nos referimos a un encapsulamiento del LDPE por parte del HDPE probablemente debido a la afinidad química de ambos PE.

De acuerdo con lo anterior se pueden, en las curvas de DSC se pueden distinguir tres casos, en el primer cada componente presenta un máximo propio claramente definible y ocurre cuando se cuenta con la presencia más de un material que del otro en la muestra. Otro caso es cuando LDPE y HDPE están presentes en la mezcla aproximadamente en las mismas cantidades. Por último cuando el pico del LDPE ya no se aprecia en el de HDPE, debido a que hay menos LDPE que HDPE en la muestra <sup>[127,128]</sup>.

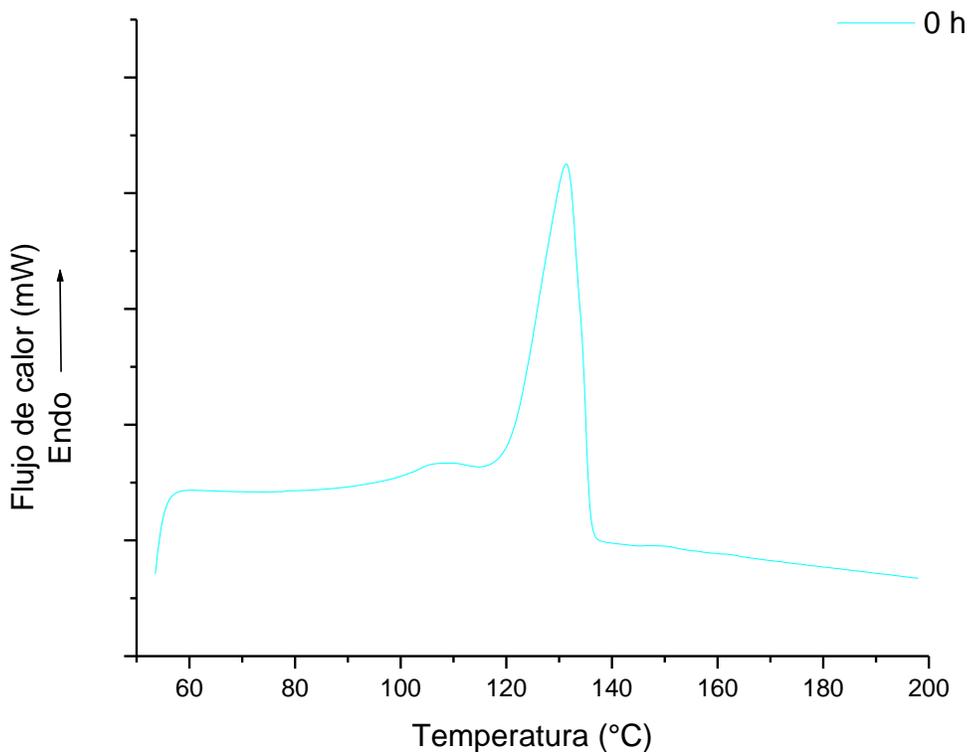
#### **4.2.3.1. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)**

Para el reciclado de plásticos de post-consumo, principalmente en el caso de las mezclas de polímeros, el análisis de la composición se puede realizar con ayuda del DSC. Cabe mencionar que la curva de fusión de una mezcla no se puede expresar directamente como suma de las curvas de fusión de cada uno de sus componentes.

Es importante mencionar que, la temperatura de fusión se determinó en la segunda corrida de calentamiento para eliminar la historia térmica del material.

Si bien, la muestra contiene aluminio, celulosa y polietileno (HDPE/LDPE), es bien sabido que el HDPE presenta una temperatura de fusión ( $T_f$ ) alrededor de 130 a 135 °C, mientras que la  $T_f$  del LDPE se encuentra en el rango de 110 a 115 °C.

Como ya se mencionó anteriormente la mezcla de HDPE/LDPE son parcialmente miscibles. En este sentido las probetas que no fueron sometidas a intemperismo presentaron dos picos endotérmicos como se puede ver en la Figura 38, un pico a 131.41 °C y un pequeño hombro a 114.77 °C que corresponden a las  $T_f$  del HDPE y LDPE respectivamente. De manera general se puede ver que sus temperaturas de fusión se aproximan tanto, que sus señales se solapan en la curva de fusión.

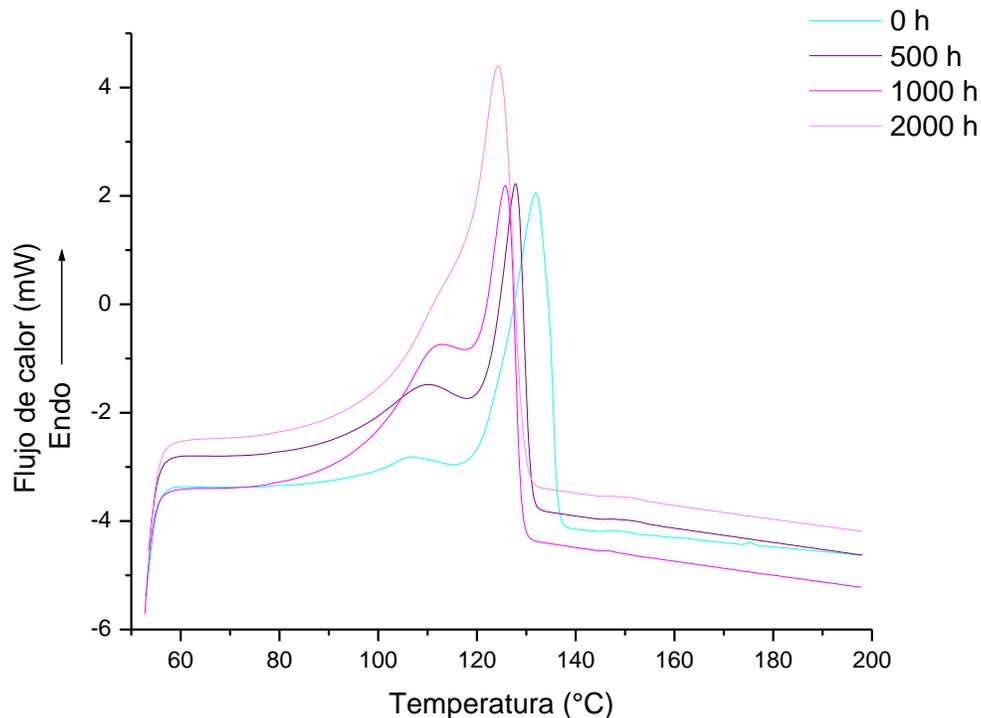


**Figura 38.** Termograma DSC de las muestras sin intemperismo.

En la Figura 39 se puede observar la comparación del lote uno, el cual corresponde al lote con 0 h de exposición y los tres lotes expuestos a intemperismo acelerado. Se aprecia una disminución en el valor de la  $T_f$  conforme se incrementa el tiempo de exposición, posiblemente debido a la ruptura de las cadenas del PE, que conlleva a una disminución del peso molecular promedio, como consecuencia del deterioro generado durante el intemperismo, en combinación con la irradiación UV, la temperatura y la humedad.

En este sentido cabe mencionar que la cristalinidad también se vio favorecida por el mismo efecto y se incrementó debido a la mayor movilidad de cadenas más cortas en comparación con los altos pesos moleculares con los que se contaban al inicio. Cabe mencionar que con el aumento del grado de cristalinidad, también subió la entalpía de fusión <sup>[4,20]</sup>.

En la comparación de los termogramas de DSC del lote sin exposición con los lotes expuestos a envejecimiento acelerado, se puede apreciar el crecimiento de un pequeño hombro a 110 °C y luego como va cambiando su forma y tamaño de manera constante, a medida que aumenta el tiempo de exposición. Como se puede ver en la Figura 39, el material muestra una ligera tendencia a valores más bajos de la  $T_f$  conforme incrementa el tiempo de exposición a intemperismo acelerado. Para el lote con 2000 h de exposición se cuenta con un pico menos pronunciado y más ancho, lo cual se relaciona con la formación de nuevas regiones cristalinas que tienen temperaturas de fusión más bajas. En este sentido de acuerdo con la literatura la desaparición del hombro posiblemente se debe a que hay menos LDPE que HDPE en la muestra <sup>[127,128]</sup>.



**Figura 39.** Comparación de termogramas DSC de las muestras sin intemperismo y con intemperismo acelerado.

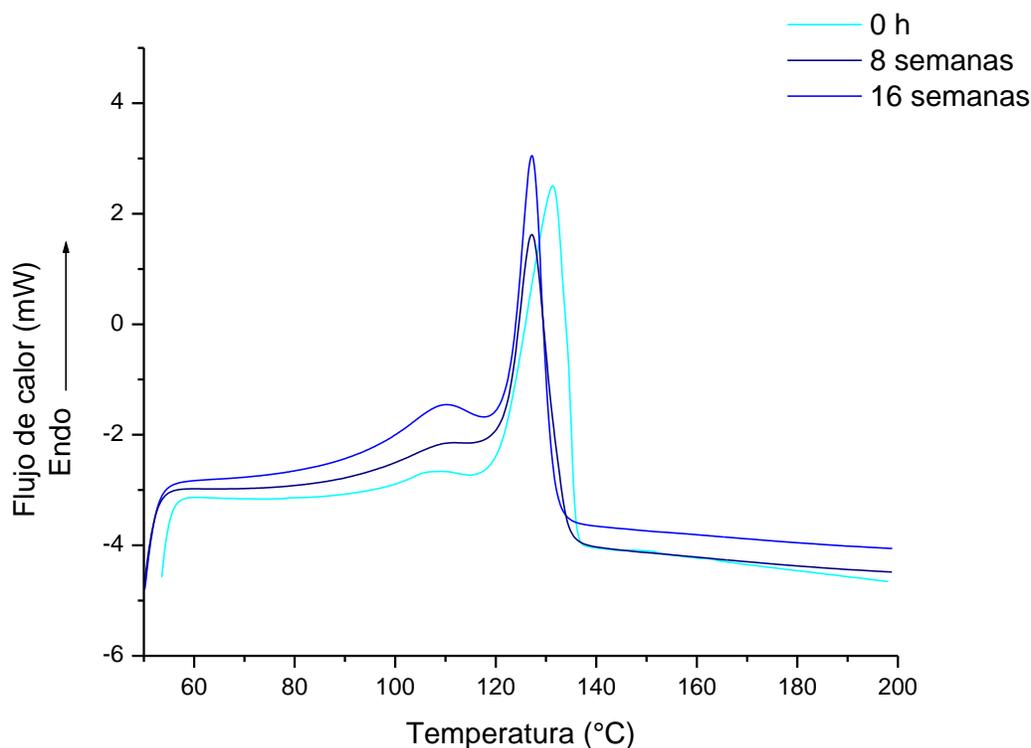
En general, se pudo observar que las propiedades térmicas de las muestras fueron afectadas posiblemente debido a la oxidación y a la ruptura de las cadenas moleculares, afectando principalmente en la temperatura de fusión (disminución de  $T_f$ ). La formación de este segundo pico posiblemente es debido a que las nuevas regiones cristalinas tienen temperaturas de fusión más bajas [4,23, 24].

En comparación con el caso anterior, las propiedades térmicas de los materiales expuestos a intemperismo natural presentaron un comportamiento similar pero menos significativo en su temperatura de fusión como se muestra en la Figura 40.

Durante la exposición de 8 y 16 semanas se obtuvo una  $T_f$  de 127.20 °C y 127.08 °C respectivamente, de igual manera se puede observar el crecimiento del hombro a 110 °C. A medida que dicho tiempo se incrementa lo mismo sucede con

el hombro, aunque en menor medida en comparación con las muestras con intemperismo acelerado.

El aumento de la cristalinidad se puede atribuir a la oxidación de la fase amorfa del HDPE, a la formación de nuevos cristalititos provenientes de las reacciones de ruptura de la cadena. Cabe mencionar que una característica intrínseca de estas nuevas regiones cristalinas es su temperatura de fusión más baja <sup>[4,64]</sup>.



**Figura 40.** Comparación de termogramas DSC de las muestras con intemperismo natural.

Los resultados de la caracterización de las muestras sometidas a los ensayos envejecimiento acelerado y natural se indican en la Tabla 11, donde se presentan los diferentes valores obtenidos de la  $T_f$ , de acuerdo al tiempo de exposición y el porcentaje de cristalinidad.

Las probetas con 500h de exposición presentaron una disminución en la  $T_f$  del 3% y las de 1000 h el 4%, con respecto a las muestras con 0 h de exposición. En

comparación con los datos anteriores, cabe mencionar que las de 2000 h de exposición fueron las que presentaron un porcentaje de disminución mayor, equivalente al 5%. En contraste lotes sometidos a intemperismo natural no presentaron un cambio significativo en su  $T_f$ , para las muestras con 8 y 16 semanas, en ambos casos se obtuvo una disminución de 3% en la temperatura de fusión.

En torno al porcentaje de cristalinidad, se pudo observar cómo se incrementaba a medida que aumentaba el tiempo de exposición. Para las muestras con 500 h de intemperismo acelerado se obtuvo un incremento del 6%, mientras que las de 2000 h obtuvieron un incremento del 10% aproximadamente.

Por otra parte, para el lote 5 y 6 que corresponden a intemperismo natural, se obtuvo un incremento del porcentaje de cristalinidad del 1% y 4%, respectivamente.

**Tabla 11.** Comparación de la temperatura de fusión ( $T_f$ ) de los lotes expuestos a intemperismo acelerado.

Lote	Tiempo de exposición	Temperatura de fusión (°C)	Cristalinidad (%)
1	0 h	131.41	61
2	500 h	127.56	67
3	1000 h	126.29	70
4	2000 h	124.26	69
5	8 semanas	127.20	62
6	16 semanas	127.08	65

#### 4.2.3.2. Espectroscopía FTIR de Reflexión Total Atenuada (ATR-FTIR)

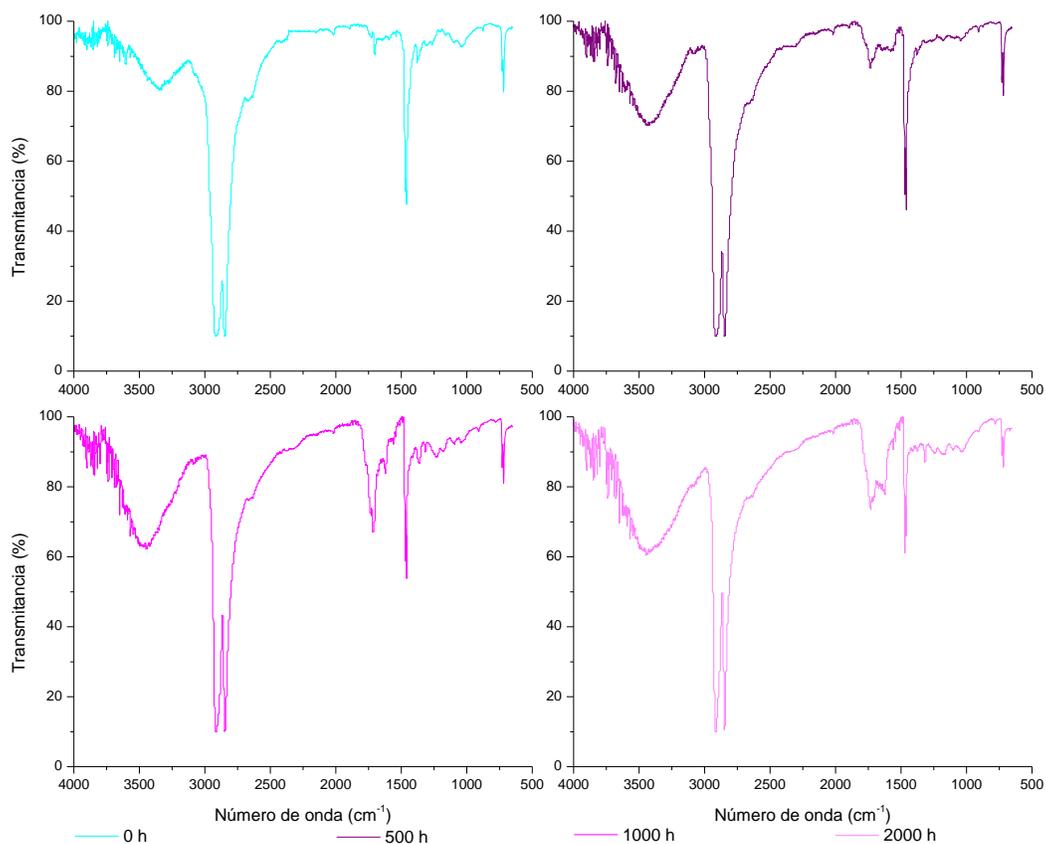
En los polímeros la degradación es un fenómeno que se presenta principalmente de manera superficial, por lo que se espera que las caras expuestas directamente a la radiación sean las afectadas en comparación con las no expuestas [4,60, 114].

Mediante la espectroscopía de infrarrojo por transmitancia y ATR se realizó la identificación de la degradación del material. Se evaluó la región de los grupos carbonilos de  $1800\text{ cm}^{-1}$  a  $1600\text{ cm}^{-1}$  y los hidroperóxidos  $3554\text{ cm}^{-1}$  [59,63, 124].

En la Figura 41 se puede observar la comparación de los espectros obtenidos de las muestras que fueron expuestas a los diferentes intervalos de intemperismo

acelerado.

En la gráfica se puede ver la aparición y crecimiento del pico en  $1630\text{ cm}^{-1}$  conforme incrementa el tiempo de exposición a intemperismo acelerado; de igual manera se aprecia el crecimiento del pico en  $1710\text{ cm}^{-1}$ , atribuido a la formación de compuestos oxidados. Cabe mencionar que también se presentó el crecimiento del pico  $3450\text{ cm}^{-1}$ , con lo se comprueba la formación de hidroperóxidos [109,112, 114].

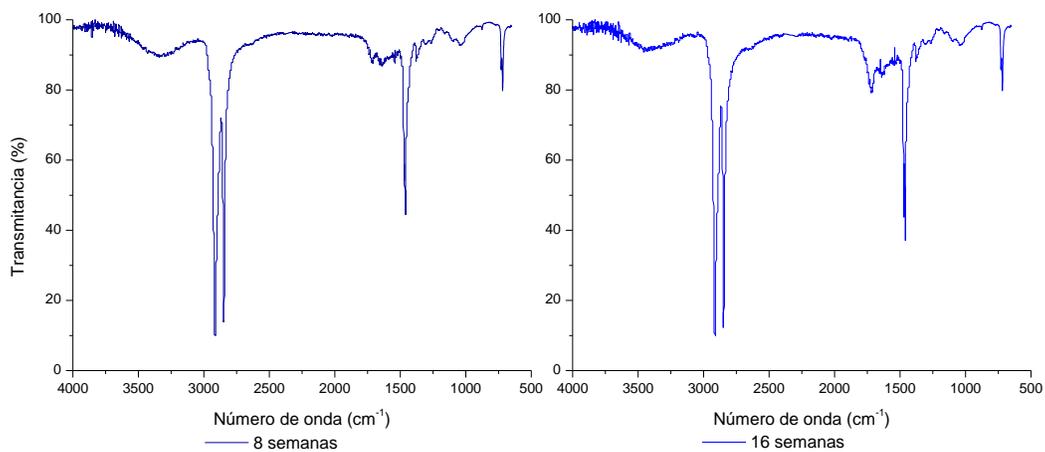


**Figura 41.** Comparación de espectros ATR-FTIR de las muestras con intemperismo acelerado.

Los espectros obtenidos de las muestras después de 500 h, 1000 h y 2000 h de exposición a intemperismo acelerado indican cambios importantes en los picos, principalmente en la región de los carbonilos que abarca de  $1800\text{ cm}^{-1}$  a  $1600\text{ cm}^{-1}$ , que va creciendo conforme aumenta el tiempo por lo que hay evidencia de formación de compuestos oxidados. De acuerdo con lo anterior el crecimiento en

3450  $\text{cm}^{-1}$  y 3410  $\text{cm}^{-1}$  indica la presencia de grupos OH e hidroperóxidos [115,124].

La Figura 42 muestra los espectros obtenidos de las muestras después de 8 semanas y 16 semanas a intemperismo natural. En contraste con las muestras de intemperismo acelerado, en este caso se presentó un crecimiento moderado de la banda en 1710  $\text{cm}^{-1}$ , lo cual indica que las reacciones de degradación son más lentas pero si se extendiera el tiempo suficiente posiblemente obtendríamos datos comparables con los de intemperismo acelerado [79,80].



**Figura 42.** Comparación de espectros ATR-FTIR de las muestras con intemperismo natural.

En general para evaluar el grado de oxidación se calcula el índice de carbonilo, el cual se realiza por medio de la relación de la absorbancia de la banda que se desea analizar con respecto a una banda que no sufre cambios durante el envejecimiento. En este caso, para el polietileno se usó la relación entre la altura de absorbancia en 1710  $\text{cm}^{-1}$  y como referencia se utilizó el pico en 1470  $\text{cm}^{-1}$  [59,109, 124].

En la Tabla 12 se puede ver la evolución del índice de carbonilo conforme se incrementó el tiempo de exposición de las muestras, así como la comparación entre los dos diferentes tipos de exposición.

Para las muestras con 500 h de exposición a intemperismo acelerado se obtuvo un incremento del índice de carbonilo de 0.10, mientras que el incremento que se

presentó en la muestras con 1000 h fue de 0.39 y para 2000 h de 0.64. En contraste para las muestras con 8 semanas y 16 semanas a intemperismo natural se obtuvo un incremento de 0.12 a 0.31 respectivamente.

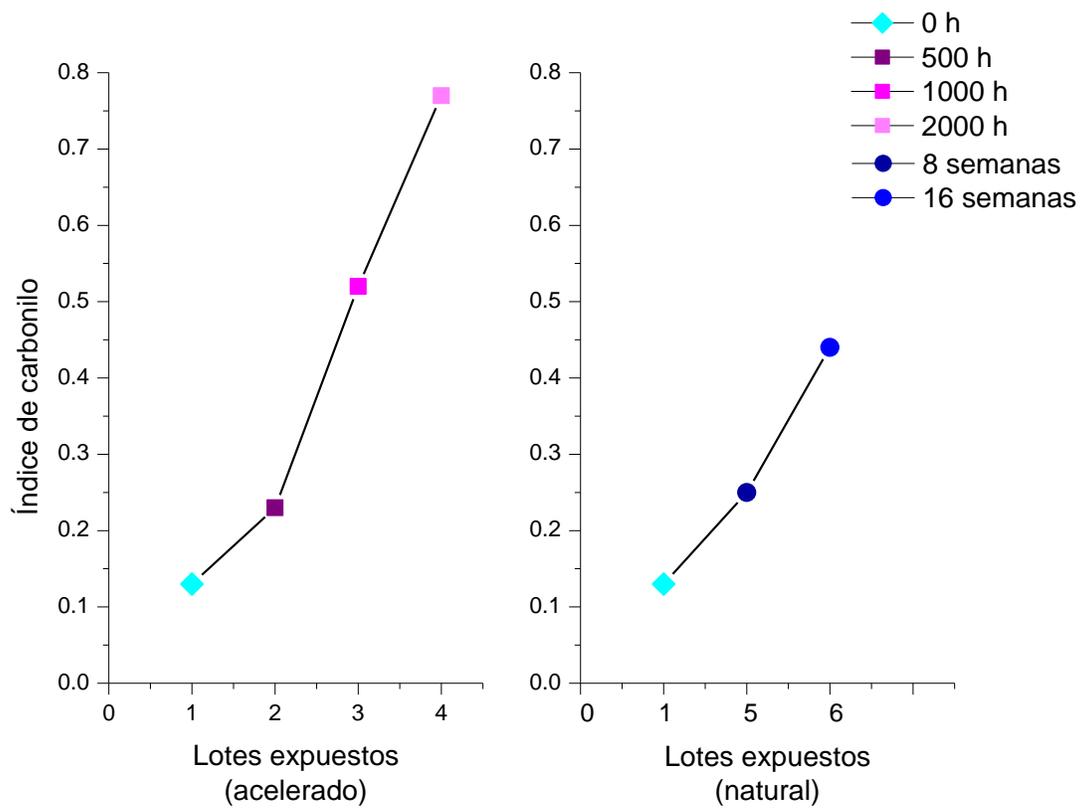
De acuerdo a lo mencionado anteriormente se puede concluir que el tiempo y el tipo de condiciones seleccionadas, afecta en gran medida la integridad del material; debido a que produce la disminución de sus propiedades mecánicas, como consecuencia del daño superficial, que en los tiempos más prolongados se evidenció.

**Tabla 12.** Comparación del índice de carbonilo de los lotes expuestos.

Lote	Tiempo de exposición	Índice de carbonilo
1	0 h	0.13
2	500 h	0.23
3	1000 h	0.52
4	2000 h	0.77
5	8 semanas	0.25
6	16 semanas	0.44

Con el análisis de los índices de carbonilo tanto de las muestras con intemperismo acelerado, así como para las muestras con intemperismo natural se puede concluir que el índice de carbonilo tiene un comportamiento similar, debido a que ambos aumentan con el tiempo de exposición. Aunque en los lotes sometidos a intemperismo natural se pudo observar un comportamiento proporcional del índice de carbonilo con respecto al tiempo de exposición.

En la Figura 43 se puede observar que durante las primeras horas de exposición el índice de carbonilo tiene los valores más bajos y posteriormente empieza a incrementar, lo cual concuerda con la disminución de las propiedades mecánicas a flexión.



**Figura 43.** Comparación del incremento del índice de carbonilo de los diferentes lotes.

## CONCLUSIONES

En este proyecto se estudiaron aglomerados elaborados a base de envases de postconsumo para su aprovechamiento en nuevo ciclo de vida como madera plástica.

Se obtuvo un material compuesto aglomerado con características similares a los aglomerados comerciales a base de madera. Basándose en los criterios de uso real a los que puede estar expuesto el material, se realizaron pruebas de flexión a 3 puntos y de absorción de agua. De igual manera fueron sometidos a pruebas de intemperismo tanto acelerado como natural para estudiar como se ven afectadas sus propiedades mecánicas y físicas, a medida que se incrementa el tiempo de exposición.

Los aglomerados sin intemperismo, presentan una resistencia mayor a flexión, en comparación con los materiales hechos a partir de los envases que existen comercialmente. Los aglomerados obtenidos resultaron con características atractivas como buena resistencia mecánica.

El módulo de ruptura de las muestras 500 h de exposición disminuyó aproximadamente un 21%, al igual que el módulo elástico a flexión un 22% con respecto a las muestras con 0 h de exposición. El lote con 1000 h de intemperismo acelerado presentó una disminución en el módulo elástico a flexión un 28%, mientras que para el módulo de ruptura un 25%. Por último, con el aumento en el tiempo de exposición, en las muestras con 2000 h de exposición no se presentaron cambios significativos respecto a las de 1000 h, tanto en el módulo de ruptura como el módulo elástico a flexión, 21% y 23% respectivamente.

En el caso de las pruebas de absorción de agua, los aglomerados realizados muestran buenas propiedades hidrofóbicas debido a la presencia del polietileno. A medida que incrementó el tiempo de exposición las muestras no presentaron un aumento en el porcentaje de absorción de agua. Cabe mencionar que las muestras no expuestas a intemperismo tuvieron una baja absorción de agua.

Las propiedades térmicas de las muestras fueron afectadas posiblemente

debido a la oxidación y a la ruptura de las cadenas moleculares del HDPE, afectando principalmente en la temperatura de fusión. Los resultados de la caracterización de las muestras sometidas a los ensayos de envejecimiento acelerado y natural mostraron un incremento en el porcentaje de cristalinidad y una disminución de en la temperatura de fusión a medida que aumentaba el tiempo de exposición.

Los espectros obtenidos de las muestras después de 500 h, 1000 h y 2000 h de exposición a intemperismo acelerado indican cambios, principalmente en la región de los carbonilos que abarca de  $1800\text{ cm}^{-1}$  a  $1600\text{ cm}^{-1}$ , por lo que hay evidencia de degradación por la formación de compuestos oxidados. Igualmente se observó el crecimiento en  $13450\text{ cm}^{-1}$  y  $3410\text{ cm}^{-1}$  indicando la presencia de grupos OH e hidroperóxidos. Durante las primeras horas de exposición el índice de carbonilo tuvo los valores más bajos y posteriormente incrementó, lo cual concuerda con la disminución de las propiedades mecánicas a flexión.

En general el tiempo y el tipo de condiciones afectan en gran medida la degradación del material, debido a que produce la disminución de sus propiedades mecánicas. El comportamiento de las muestras con intemperismo acelerado fue de una notoria disminución en el módulo elástico a flexión, en comparación con las muestras sometidas a intemperismo natural. Se observó que los materiales expuestos a intemperismo acelerado, mostraron una disminución de color importante, mientras que las muestras con intemperismo natural fueron menos afectadas.

## **TRABAJOS A FUTURO**

La finalidad de la caracterización de este material fue desarrollar productos con buen desempeño mecánico para futuros materiales o componentes estructurales, incluyendo su comportamiento mecánico con el paso del tiempo.

En base a los resultados obtenidos, como trabajos a futuro se debe continuar con la caracterización de los materiales a intemperismo acelerado, hasta las 3000 h de exposición y así complementar el presente estudio, obteniendo un panorama más amplio del comportamiento del material estudiado.

Por otro lado, en cuanto al intemperismo natural, igualmente se recomienda realizar un estudio de los materiales con una exposición mínima de 12 meses; así como integrar al estudio de intemperismo muestras de absorción de agua.

Por último, se recomienda estudiar la variedad de los materiales de desecho aquí propuestos (como por ejemplo los tipos de PE y envases multicapa) para robustecer el estudio y poder alcanzar eventualmente, un desarrollo tecnológico que pueda ser aprovechado industrialmente.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Tetra Pak S.A., Recycling and Recovery, A Hands on Approach, [Online], Disponible en: <http://www.tetrapak.com/environment/recycling-and-recovery> [Acceso 15 de Agosto 2014].
- [2]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave y Desempeño Ambiental, Edición 2012, México, 2013.
- [3]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT, Directorio De Centros De Acopio De Materiales Provenientes De Residuos, México 2010.
- [4]. W. Schnabel, Polymer Degradation Principles and Practical Applications, Hanser Publishers, German Democratic Republic, 1981.
- [5]. N. García, Expansión, Empaque y embalaje con futuro en México, [Online], Disponible en: <http://www.cnnexpansion.com/manufactura/2009/07/01/empaque-y-embalaje-con-futuro-en-mexico> [Acceso 28 de Septiembre 2015].
- [6]. C. Pérez, Empaques y Embalajes, Red Tercer Milenio, México, 2012.
- [7]. A. Hidalgo, Diseño de un Proceso para la Elaboración de Tableros Aglomerados a partir de Envases Tetra Pak, Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica, Facultad de Química, Ecuador, 2013.
- [8]. El Financiero, Producción de Plástico en México crecerá más de 2% este año, estima Bioplástica, [Online], Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/produccion-de-plastico-en-mexico-crecera-mas-de-este-ano-estima-bioplastica.html> [Acceso 23 de Septiembre 2015].
- [9]. El Financiero, Industria del Plástico espera crecer hasta un 10% en 2015, [Online], Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/empresas/industria->

- del-plastico-espera-crecer-hasta-10-en-2015.html [Acceso 23 de Septiembre 2015].
- [10]. M. Conde, Perspectivas de la Industria del Plástico en México, Revista Ambiente Plástico, 2011.
- [11]. D. Askeland, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 3 ed., USA, 1998.
- [12]. V. Luppi, L. Bertini, M. Fidalgo, F. Yrazu, Elaboración de una Matriz de Impacto Ambiental Comparativa de Materiales de Envases, Influencia en la Generación y posterior Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Departamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina, 2011.
- [13]. Manufactura, Empaque y embalaje con futuro en México [Online], Disponible en: <http://www.manufactura.mx/industria/2009/07/01/empaque-y-embalaje-con-futuro-en-mexico> [Acceso 23 de Septiembre 2015].
- [14]. Tetra Pak S.A., Tetra Brik® Aseptic: Simplemente inteligente, [Online], Disponible en: <http://www.tetrapak.com/mx/products-and-services/packages/portion-tba> [Acceso 6 de diciembre 2014].
- [15]. Tetra Pak S.A., Packaging Material, [Online], Disponible en: <http://www.tetrapak.com/packages/materials> [Acceso 15 de Agosto 2014].
- [16]. Tetra Pak S.A., Cuadernillo de Contenidos y Sugerencias para el Docente, Argentina, 2009.
- [17]. Tetra Pak S.A., Descripción de Tetra Pak, Descripción de la compañía.
- [18]. A. Vázquez, M. Beltrán, R. Espinosa y M. Velasco, El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Anipaq, 2015.
- [19]. J. Góngora, La industria del plástico en México y el mundo, Revista Comercio Exterior, 64:5, 2014.
- [20]. A. Horta, Macromoléculas, Unidad Didáctica 1, España, 1940.
- [21]. W. Smith, J. Hashemi, Foundations of Materials Science and Engineering, Mc Graw-Hill, 2006.
- [22]. M. Conde, Presente Futuro de la Industria del Plástico en México, Revista

- Ambiente Plástico, 2012.
- [23]. R. Conley, Thermal stability of Polymers, vol. 1, Marcel Dekker, Nueva York, 1970.
- [24]. B. Suresh, S. Maruthamuthu, A. Khare, N. Palanisamy, V. Muralidharan, R. Ragunathan, , M. Kannan & K. Pandiyaraj, Influence of Thermal Oxidation on Surface and Thermo-mechanical Properties of Polyethylene, Journal Polymer Research 18, 2175–2184, 2011.
- [25]. L. Lin, A. Argon, Review Structure and Plastic Deformation of Polyethylene, Journal of Materials Science 29, 294-323, 1994.
- [26]. W. Callister, D. Rethwisch, Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, 2012.
- [27]. Tecnología de los Plásticos, Polietileno (PE), [Online], Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.mx/2012/07/polietileno-pe.html> [Acceso 21 de Septiembre 2015].
- [28]. Grupo Texne, El Mercado del Polietileno en México, Foro 2013 PEMEX Petroquímica, México, 2013.
- [29]. S. Thomas, C. Harrats, and G. Groeninckx, Micro and Nanostructured Polymer Blends, CRC Press Taylor & Francis p. 1-33, 2006.
- [30]. Burch, H.E. and C.E. Scott, Effect of viscosity ratio on structure evolution in miscible polymer blends. Polymer, 2001. 42(17): p. 7313-7325.
- [31]. J. Yang, Phase Morphology and Orientation Development of Polymer Blends in Melt Processing, Tesis de doctorado, Universidad de Akron, USA, 2008
- [32]. J. Galloway, C. Macosko, M. Montminy, Image Analysis for Interfacial Area and Continuity Detection in Polymer Blends, Journal Polymer 43, 4715–4722. 2002.
- [33]. L. González, Mezclas Multicomponentes de Poliolefinas/PS sin Compatibilizar: Reología, Procesamiento y Caracterización Morfológica y Mecánica, Tesis de maestría, Universidad de Medellín, Colombia, 2012.
- [34]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), El Medio

- ambiente en México 2013-2014: Generación de los Residuos Sólidos Urbanos, [Online], Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_1.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html) [Acceso 29 de Septiembre 2015].
- [35]. Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales (PROMARNAT), Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018, Diario Oficial de la Nación, México, 2015.
- [36]. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), El Trabajo Estadístico de la OCDE 2013-2014, OCDE-iLibrary, México, 2014.
- [37]. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), OCDE Factbook: Economic, Environmental and Social Statistics 2014 [Online], Disponible en: [http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/ocd/economics/ocd-factbook-2014\\_factbook-2014-en#page1](http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/ocd/economics/ocd-factbook-2014_factbook-2014-en#page1) [Acceso 29 de Septiembre 2015].
- [38]. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública de la Cámara de Diputados, LXI Legislatura (CESOP), Reporte CESOP: Residuos Sólidos Urbanos en México, 51, 12-41, México, 2012.
- [39]. F. Stupenengo, Materiales y Materias Primas: Materiales Compuestos, Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica, Argentina, 2011.
- [40]. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), El Medio ambiente en México 2013-2014: Recolección y Disposición de los Residuos Sólidos Urbanos, [Online], Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_resumen14/07\\_residuos/7\\_1\\_2.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_2.html) [Acceso 29 de Septiembre 2015].
- [41]. J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, Plastics recycling: challenges and opportunities, Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci., 364:1526, 2115–2126, 2009.
- [42]. S. Karlsson, Recycled Polyolefins. Material Properties and Means for Quality Determination, Adv Polym Sci 169, 201–229, 2004.
- [43]. A. Vázquez, R. Espinosa, M. Beltrán y M. Velasco, El Reciclaje de los

- Plásticos, Universidad Autónoma Metropolitana, Anipaq, 2015.
- [44]. Tetra Pak S.A., Reciclaje y Educación, [Online], Disponible en: <http://www.tetrapak.com/mx/environment/reciclaje-edu> [Acceso 15 de Agosto 2014].
- [45]. D. Hull, T. W. Clyne, An Introduction to Composite Materials, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [46]. S. Poveda, Lecturas complementarias: Materiales Compuestos, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2007.
- [47]. K. Chawla, Composite Materials Department of Materials Science and Engineering University of Alabama at Birmingham, Springer, USA, 2013.
- [48]. Ecoplak, ¿Qué es Ecoplak?, [Online], Disponible en: <http://www.ecoplak.com/ecoplak.php> [Acceso 10 de Junio 2015].
- [49]. Conciencia Sustentable, Crean Muebles y Materiales de Construcción con Cartón Reciclado, [Online], Disponible en: <http://conciencia-sustentable.abilia.mx/crean-muebles-y-materiales-de-construccion-con-carton-reciclado/> [Acceso 10 de Junio 2015].
- [50]. A. Mourad, E. García, G. Vilela, F. Von Zuben Environmental Effects from a Recycling Rate Increase of Cardboard of Aseptic Packaging System for Milk Using Life Cycle Approach, Wood and Other Renewable Resources (Int J LCA) 13 (2), 140–146, 2008.
- [51]. R. Sánchez, V. Osechas, G. Estrella, S. Camero, R. Torres, Recuperación de Residuos de Envases Tetra Bric® y su Posible Aprovechamiento en la Preparación de Tableros de Aglomerados en Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V. 25:4, 53–59, 2010.
- [52]. Tetra Pak S.A., ¿Que Sucede con los Cartones para Bebidas Usados?, España, 2003.
- [53]. A. Chung, Tectán: Reciclando Tetra Pak, Revista Industrial Data 6:2, 2003.
- [54]. Ecowigid, Maplar, [Online], Disponible en: <http://www.gid.uji.es/ecowigid/?q=node/289> [Acceso 1 de Octubre 2015].

- [55]. T-Plak, La Madera del Futuro T-Plak lo Hace Posible Hoy, [Online], Disponible en: <http://www.tplak.com.ar/index.php> [Acceso 10 de Junio 2015].
- [56]. L. Alberti, A. Gelvis, Z. Grunert, C. Gabriella Estudio de Factibilidad Técnica, Económica y Financiera de una Planta de Reciclaje de Desechos de Tetra Brik® para la Producción de Tableros Aglomerados, Tesis de licenciatura, Ilustre Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2010.
- [57]. Pizano, ¿Quiénes somos?, [Online], Disponible en: [http://www.pizano.com.co/nosotros/#quienes\\_somos](http://www.pizano.com.co/nosotros/#quienes_somos) [Acceso 10 de Junio 2015].
- [58]. B. Posada, Degradación de los Plásticos, Revista Universidad Eafit 94, 67-86.
- [59]. J. White, A. Turnbull, Review Weathering of Polymers: Mechanisms of Degradation and Stabilization, Testing Strategies and Modelling, Journal of Materials Science, 29, 584-613, 1994.
- [60]. N. Allen, Fundamentals of Polymer Degradation and Stabilization, Elsevier Science Publisher Ltd, USA, 1992.
- [61]. M. González, Elementos Estructurales con Materiales Poliméricos: Propiedades Químicas y Físicas de Polímeros, Universidad Politécnica de Madrid, Ed. Universidad Coruña, España, 1996.
- [62]. A. Grand, C. Wilkie, Fire Retardancy of Polymeric Materials, Marcel Dekker Inc, New York, 2000.
- [63]. S. Lee, Encyclopedia of Chemical Processing, Taylor and Francis Group LLC, 2101-2110, USA, 2006.
- [64]. N. Grassie, Developments in Polymer Degradation, Volumen 1, Applied Science Publishers Ltd, 205-275, Inglaterra, 1977.
- [65]. C. Hare, The Degradation of Coatings by Ultraviolet Light and Electromagnetic Radiation, Journal of Protective Coating and Linings, 829-832, 1992.
- [66]. Q-Lab, QUV y Q-SUN: Una Comparación de dos Aproximaciones Eficaces para Intemperismo Acelerado y Pruebas de Estabilidad de Luz, USA, 1-16, 2014.

- [67]. D. Allara and W. Hawkins, Stabilization and Degradation of Polymers, Volumen 169, American Chemical Society, 1-10, USA, 1978.
- [68]. S. Halim, Handbook of Polymer Degradation, 2 Ed., Marcel Dekker Inc., 461-484, 645-726, USA, 2000.
- [69]. G. Grossman and Q-Lab, Correlation of Laboratory to Natural Weathering, USA, 2011.
- [70]. ASTM, Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources, ASTM G151-10.
- [71]. ASTM, Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials, ASTM G154-12a.
- [72]. Q-Lab, Sunlight, Weathering and Light Stability Testing, USA, 2011.
- [73]. Q-Lab, Controlled Irradiance in Laboratory Weathering: Limitation in the State of the Art, USA, 2011.
- [74]. Q-Lab, Weathering and Light Stability: A Testing Summary Guide, USA, 1-6, 2012.
- [75]. Q-Lab, Las Cámaras de Prueba de Condensación/UV de Irradiación Alta Permiten Obtener Resultados Más Rápidos de los Ensayos de Envejecimiento Artificial Acelerado, USA, 2011.
- [76]. Q-Lab, Cámaras de Ensayo de Intemperismo Acelerado, USA, 2007.
- [77]. N. Stark, Effect of Weathering Cycle and Manufacturing Method on Performance of Wood Flour and High-Density Polyethylene Composites, Journal of Applied Polymer Science, 100:4, 3131-3140, 2006.
- [78]. M. MacGreer and Atlas Material Testing Solution, Weathering Testing Guidebook, USA, 2001.
- [79]. M. Crewdson and Q-Lab, Outdoor Weathering must Verify Accelerated Testing, USA, 2008.
- [80]. G. Grüll, F. Tscherne, I. Spitaler, B. Forsthuber, Comparison of Wood Coating Durability in Natural Weathering and Artificial Weathering Using Fluorescent UV-Lamps and Water, Journal Wood Prod., 72, 367-376, 2014.
- [81]. Q-Lab, Outdoor Weathering: Basic Exposure Procedures, USA, 2011.

- [82]. Atlas Material Testing Solution, Natural Weathering Testing Sites, [Online], Disponible en: <http://atlas-mts.com/services/natural-weathering-testing-services/natural-weathering-testing-sites/> [Acceso 10 de Junio 2015].
- [83]. ASTM, Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics, ASTM 1435-13.
- [84]. AENOR, Pinturas y Barnices: Materiales de Recubrimiento y Sistemas de Recubrimiento para Madera Exterior, Parte 3: Ensayo de Envejecimiento Natural, UNE-EN 927-3:2013.
- [85]. R. Silverstein and F. Webster, Spectrometric Identification of Organic Compounds, 6a ed. John Wiley and Sons, New York. 1998.
- [86]. E. Sjöström, R. Alén, Analytical Methods in Wood Chemistry, Pulping and Papermaking, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1999
- [87]. J. Vickerman, I. Gilmore, The Principal Techniques. 2nd Edición, John Wiley & Sons Ltd., U.K., 2009.
- [88]. K. Rubinson and J. Rubinson, Análisis Instrumental, Prentice Hall. Madrid, 2001.
- [89]. D. Skoog, F. Holler, T. Nieman, Principios de Análisis Instrumental, Mc Graw Hill, Madrid 2001.
- [90]. Thermo Nicolet, Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry, USA, 2001.
- [91]. Bruker, Attenuated Total Reflection (ATR): A Versatile Tool for FT-IR Spectroscopy, USA, 2011.
- [92]. Perkin Elmer, FT-IR Spectroscopy: Attenuated Total Reflectance (ATR), USA, 2005.
- [93]. F. Beer, E. Johnston, J. DeWolf, Mecánica de Materiales 4 Ed., Mc Graw Hill/Interamericana, México, 2007.
- [94]. ASTM, Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, ASTM D-1037-12.
- [95]. W. Hosford, Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, USA, 2005.
- [96]. K. Oksman and M. Sain, Wood polymer composites, Woodhead Publishing

Limited and CRC Press LLC, USA, 2008.

- [971]. J. Inche, J. Vergiú, D. Mavila, M. Godoy y A. Chung, Diseño y Evaluación de una Planta de Reciclaje de Envases Tetra Pak a Pequeña Escala, Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial 7: 2, 7-17, 2004.
- [98]. M. Hidalgo, Manufacturing Rigid Board by Packaging Waste Containing Aluminum and Polyethylene, Journal of Scientific and Industrial Research 70:3, 232-234, 2011.
- [99]. M. Hidalgo, M. Muñoz, and K. Quintana, Mechanical Behavior of Polyethylene Aluminum Composite Reinforced with Continuous Agro Fique Fibers, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 31:2, 187-194, 2011.
- [1002]. M. Hidalgo, M. Muñoz, and K. Quintana, Mechanical analysis of Polyethylene Aluminum Composite Reinforced with Short Fique Fibers Available in two-dimensional Arrangement, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 32:1, 89-95, 2012.
- [101]. J. Domínguez, D. Guemez, Fabricación y Evaluación de Paneles Aplicables a la Industria de la Construcción a Partir del Reciclaje de Envases Multicapa (Tetra Brik). Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY 14:3, 191-196, 2010.
- [102]. G. Díaz, Desarrollo y Estudio de Materiales Compuestos con Base en Tetra Pak® Reciclado, Tesis de licenciatura, Universidad Marista, México, 2012.
- [103]. D. Pool, Clasificación Físico-mecánico de Aglomerados a Base de Tetra Brik® con Matriz de Polietileno, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior Progreso, México, 2013.
- [104]. A. Moo, Elaboración y Caracterización Mecánica de un Material Compuesto Tipo Sándwich con Núcleo Particulado de Tetra Pak y Caras de Aluminio, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Motul, México, 2013.
- [105]. A. Farfán, Obtención de Laminados PEBD/AL a Partir de Desechos Tetra Brik®, Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Calkiní en el Estado de Campeche, México, 2014.
- [106]. A. Korkmaz, J. Yanik, M. Brebu, C. Vasile, Pyrolysis of Tetra Pack

- Packaging, Waste Management 29, 2836–2841, 2009.
- [107]. A. Kantürk, E. Terzi, N. Yilgör, S. Kartal, and S. Piskin, Thermal Degradation Characteristic of Tetra Pak Panel Boards Under Inert Atmosphere, Korean Journal Chemistry, Engineering 30:4, 878-890, 2013.
- [108]. J. Haydary, D. Susa, Kinetics of Thermal Decomposition of Aseptic Packages, Chemical Papers 67:12, 1514–1520, 2013.
- [109]. T. Corrales, F. Catalinaa, C. Peinadoa, N. Allenb, y E. Fontan, Photo-oxidative and thermal degradation of polyethylenes: interrelationship by chemiluminescence, thermal gravimetric analysis and FTIR data, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 147, 213–224, 2002.
- [110]. R. Moya, D. Camacho, J. Mata, R. Soto, Fungal Decay, Coating, Burning Properties and Change of Color of Particleboards Manufactured with Woody Biomass, Agricultural Wastes and Tetra Pak Residues, Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology 4, 334-342, 2013.
- [111]. Z. Zhang, H. Du, W. Wang, Q. Wang, Property Changes of Wood-Fiber/HDPE Composites Colored by Iron Oxide Pigments After Accelerated UV Weathering, Journal of Forestry Research 21, 59–62, 2010.
- [112]. A. Al-Robaidi, LDPE/EPDM Multilayer Films Containing Recycled LDPE For Greenhouse Applications, Journal of Polymers and the Environment, 9:1, 1566-2543, 2002.
- [113]. W. Wang, F. Bu, Z. Zhang, S. Sui, Q. Wang, Performance of rice-hull-PE composite exposed to natural weathering, Journal of Forestry Research, 21:2, 219–224, 2010.
- [114]. J. Fabiyi, A. McDonald, D. McIlroy, Wood Modification Effects of Weathering of HDPE-Based Wood Plastic Composites, J Polym Environ, 17, 34–48, 2009.
- [115]. R. Satoto, W. Subowo, R. Yusiasih, Y. Takane, Y. Watanabe and T. Hatakeyama, Weathering of High-Density of Polyethylene in Different Latitudes, Journal Polymer Degradation and Stability 56, 275-279, 1997.
- [116]. ASTM, Standard Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing,

ASTM D618-13.

- [117]. ASTM, Standard Standard Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials, ASTM D4933-10.
- [118]. ASTM, Standard Specification for Polyolefine-Based Plastic Lumber Decking Boards, ASTM D6662-13.
- [119]. ASTM, Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics, ASTM D4329-13.
- [120]. ASTM, Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry, ASTM D3418-15.
- [121]. J. Fatuo, Handbook of Polyolefins: Morphology and Crystallization in Polyolefins, Eds, Marcel Dekker, 8,1993.
- [122]. M. Seeba, C. Servens, J. Pouyet, Journal of Applied Polymer Science, 45, 1049, 1992.
- [123]. ASTM, Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis, ASTM D1252-13e1.
- [124]. J. Rabek, Polymer Photodegradation: Mechanisms and experimental methods, Chapman y Hall, Londres, 5-33, 56-66, 353-368, 1995.
- [125]. J. Schawe, R. Riesen, G. Widmann, M. Schubnell, U. Jörimann, Interpreting DSC curves, Part 1: Dynamic measurements, Journal UserCom, 11, 1-26, 2000.
- [126]. G. Widmann, J. Schawe, R. Riesen, Interpreting DMA curves, Part 1, Journal UserCom, 15, 1-22, 2002.
- [127]. D. Seifert, Art polymer technology: Quantitative analysis of polyolefin blends, Institute of Nonmetallic Materials, Technical University Berlin, Germany, 2002.
- [128]. R. Rodriguez, R. Campomanes, Correlation of HDPE/LDPE blends composition in the properties of blow films, Espacios, 37, 15-19, 2015.