



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo de un material compuesto a base de cascarilla de  
cebada y polietileno para la formación de productos  
moldeados base celulosa**

**T E S I S**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Mecánico**

**P R E S E N T A**

San Pedro Zavala Juan Carlos

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dra. Magdalena Trujillo Barragán

**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017**



## **AGRADECIMIENTOS.**

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme cursar mis estudios de licenciatura, la cual me brindo conocimientos y momentos que son invaluable en mi vida, daré mi máximo esfuerzo por representar a la Facultad de Ingeniería con mucho orgullo, pasión y respeto.*

*A mi asesor de tesis la Doctora Magdalena Trujillo Barragán, por darme la oportunidad de elaborar esta tesis, por brindarme su orientación, conocimiento, ayuda, confianza y amistad a lo largo de mi estancia en el LPP.*

*Al Doctor Alfredo Maciel Cerda, por el valioso conocimiento que me transmitió, por su ayuda, orientación y paciencia en las diferentes pruebas realizadas en esta tesis.*

*Al M. en C. Eliezer Hernández por su gran ayuda y paciencia en la realización de las pruebas mecánicas.*

## DEDICATORIAS.

*A mis padres Yolanda y Juan Carlos, quienes han sido mi ejemplo, mi guía y mi admiración a lo largo de toda mi vida, por estar siempre a mi lado motivándome y confiando en todas las decisiones que he tomado, por su amor incondicional y por todo lo que me han dado, porque sin su apoyo y paciencia no hubiera sido posible la culminación de mi carrera profesional.*

*A mi hermano Francisco, gracias por su apoyo incondicional, por su cariño y ayuda, espero que esta tesis te pueda servir como motivación para que igualmente cumplas tus metas.*

*A mi abuela Felisa Zavala, por todo el amor, cariño y consejos que me diste, aunque ya no te encuentras físicamente conmigo siempre estarás en mi corazón.*

*A la familia Nava González y Ana María Sampedro, por su cariño, apoyo, consejos, unión y por todos los momentos que hemos vivido juntos a lo largo de todo este tiempo.*

*A mis queridos amigos de la facultad, por todos los momentos y por su gran ayuda a lo largo de toda la carrera, Mario, David, Julio, Enrique, Emmanuel, Irving, Erick.*

*A mis entrañables amigos y colegas del LPP, por su amistad, compañerismo, por todas las risas que algún día compartimos y seguimos compartiendo, Víctor Hernández, Gerardo, Israel, Samuel, Víctor Montenegro, Gustavo, Mariana, Sergio, Alejandro Vargas, Alejandro Torres, Francisco, Neill, Esteban, Josué.*

# **CONTENIDO**

<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>2</b>
<b>ANTECEDENTES. ....</b>	<b>2</b>
<b>CELULOSA MOLDEADA. ....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 EMPAQUE.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 EMPAQUES BIODEGRADABLES. ....</b>	<b>9</b>
<b>BIOPOLÍMEROS ACTUALES .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 POLÍMEROS DE ORIGEN NATURAL.....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 HIDRATOS DE CARBONO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 POLIMEROS DE ORIGEN SINTETICO BIODEGRADABLES. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.6 POLÍMEROS COMPOSTABLES.....</b>	<b>20</b>
<b>1.7 POLÍMEROS OXO BIODEGRADABLES. ....</b>	<b>22</b>
<b>1.8 POLÍMEROS HIDRO-BIODEGRADABLES.....</b>	<b>24</b>
<b>LÁMINAS DE POLIETILENO (FILMS).....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>27</b>
<b>MATERIALES COMPUESTOS. ....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS. ....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS. ....</b>	<b>30</b>
<b>2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN EN COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA. ....</b>	<b>31</b>
<b>EXTRUSIÓN.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4 COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6 DATOS DE EXTRUSIÓN DE LÁMINA PLANA.....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>41</b>
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA CASCARILLA DE CEBADA .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 CLASIFICACIÓN Y CULTIVO .....</b>	<b>41</b>

3.2	COMPOSICIÓN DE CARBOHIDRATOS DE LA CEBADA Y PROPIEDADES .....	43
CAPÍTULO 4	.....	46
	DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE POLIETILENO(PE) CON UNA MATRIZ DE CASCARILLA DE CEBADA Y SU CARACTERIZACIÓN.....	46
4.1	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE DENSIDAD DE LA CASCARILLA DE CEBADA.....	49
4.2	PROCESO DE CRIBADO.....	52
4.3	MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO. ....	57
4.4	REGLA DE LAS MEZCLAS PARA MATERIALES COMPUESTOS.....	60
4.5	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA). ....	65
4.6	PROCESO DE OBTENCION DE LÁMINAS PLÁSTICAS DE POLIETILENO CON CASCARILLA DE CEBADA. ....	67
4.7	ENFRIAMIENTO DE LÁMINA PLÁSTICA.....	68
4.8	OBTENCIÓN DE LA LÁMINA PLÁSTICA COMPUESTA. ....	69
4.9	ENSAYO DE TENSIÓN DE LÁMINA DE POLIETILENO (PE) CON CASCARILLA DE CEBADA. .	72
RESULTADOS	.....	74
CONCLUSIONES	.....	78
TRABAJOS A FUTURO	.....	79
BIBLIOGRAFÍA	.....	80
	FICHA TÉCNICA ANHÍDRIDO MALEICO.....	83
	FICHA TÉCNICA CELULOSA MOLDEADA. ....	85
	CRIBA 140, 95% POLIETILENO AL 5% CASCARILLA DE CEBADA. ....	87

## ***OBJETIVOS.***

Establecer las condiciones de procesamiento para obtener un material compuesto semirígido a base de cascarilla de cebada y polietileno, que tenga las propiedades adecuadas para embalajes de productos frágiles.

## ***HIPÓTESIS.***

Un material semirígido a base de pasta de papel se emplea ampliamente en el embalaje de productos alimenticios como el huevo, cámaras fotográficas, celulares, instrumentos de medición, etc. Este material aprovecha el papel reciclado para su formación. Por otro lado, es posible llegar a formar un material para uso en embalaje, agregando polietileno a la cascarilla de cebada.

La cascarilla de cebada es un material con alto contenido de celulosa, que se desecha comúnmente, pero que se puede llegar a aprovechar para obtener un material semirígido que sirva de igual manera como las aplicaciones que tiene la celulosa moldeada.

## ***INTRODUCCIÓN.***

En los últimos años, una preocupación especial se ha manifestado hacia el uso de nuevas fuentes de desechos, con el objetivo de obtener compuestos biológicamente activos que se adapten a diferentes campos y aplicaciones.

Este trabajo tiene como fin obtener un material que pueda sustituir los materiales de los empaques de celulosa moldeada que existen actualmente en el mercado, por un nuevo material denominado semicelulosa moldeada.

Se analizó la cascarilla de cebada para conocer su temperatura de degradación máxima por medio de un análisis termogravimétrico TGA. Una vez conocida la temperatura para evitar la degradación de la cascarilla se procedió a mezclarlo con un polímero (polietileno PE), se usó un agente acoplante (anhídrido maleico) al 5% para diferentes concentraciones de cascarilla de cebada y así lograr la adherencia mecánica de las partículas de polietileno con las partículas de cascarilla de cebada. Posteriormente se añadieron las diferentes mezclas compuestas de polietileno con cascarilla de cebada a una máquina de extrusión con un dado de láminas planas, para así obtener los diferentes perfiles plásticos con una variación de espesores en cada muestra y formar un nuevo material compuesto a base de un desecho agroindustrial.

Una vez obtenidas las láminas plásticas se sometieron a pruebas mecánicas para conocer su resistencia, el modulo elástico, la deformación, y con ello analizar las características de este nuevo material compuesto polietileno- cascarilla de cebada.

# ***CAPÍTULO 1***

## ***ANTECEDENTES.***

La producción de cereales representa uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, principalmente para los países en vías de desarrollo. Se estima que el consumo de cereales en estos países constituye un porcentaje elevado en la alimentación de la población, debido en gran parte a su bajo costo.

La cebada (*Hordeum vulgare*) ha sido uno de los alimentos más importantes desde tiempos antiguos: es uno de los granos de cereales más comunes que sirve como fuente importante de alimentos saludables. Entre los cereales ocupa el cuarto lugar en cantidad producida y área de cultivo en el mundo después del maíz, frijol y arroz. La cebada se ha cultivado comúnmente por siglos debido a su versatilidad, su capacidad de adaptación al clima y a un suelo desfavorable [1].



Figura 1. Cultivo de Cebada [2]



El uso cada vez mayor del trigo, el arroz y el maíz en la dieta humana han llevado a una disminución drástica del uso de la cebada para el consumo humano, excepto para la producción de bebidas alcohólicas tales como cerveza, por lo tanto, en la actualidad su uso principal es la elaboración de cerveza.

Un material lignocelulósico está constituido principalmente por 3 compuestos estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina, los materiales constituidos con desechos lignocelulósicos han tenido un gran auge en los últimos años, debido a la necesidad de buscar recursos naturales de desecho. Estos residuos lignocelulósicos de cereales naturales son compatibles con el medio ambiente y podrían proporcionar una nueva fuente de productos especializados.

Los principales factores que restringen el uso del cereal, paja, cascarilla y otros residuos lignocelulósicos en los materiales compuestos, es principalmente problemas asociados con la recolección del residuo, el almacenamiento del mismo y el transporte de estos materiales.

Se cree que si la investigación se centra en el uso de estos materiales lignocelulósicos podría seguir un mercado de desarrollo, que al mismo tiempo puede conducir a una nueva oportunidad para estos excedentes de cultivos de campo de bajo costo.

La cascarilla de cebada es un desecho agroindustrial: representa del 10 a 13% del peso seco del grano de cebada, es una fibra renovable anualmente y la distribución en volumen es abundante a través de todo el mundo [1].

Normalmente se ha buscado que estos nuevos materiales lignocelulósicos sean biodegradables. Sin embargo, es necesario recurrir a materiales de propiedades conocidas, ya que la consideración de utilizar un polímero al que se le incorpore un material lignocelulósico ofrece diversas ventajas importantes en cuanto a cuestiones económicas y de reciclaje.

El aumento de interés en la cebada se debe a estudios de la misma que ha demostrado ser una excelente fuente de fibra dietética. Los granos de cebada contienen hidratos de carbono (principalmente almidón), tiene un bajo contenido de grasa y están moderadamente bien balanceados.

Por miles de años, la cebada fue utilizada por poblaciones antiguas de diferentes culturas de Asia, África del Norte y Europa como un importante componente de la dieta básica y como un elemento básico los alimentos para su consumo [1].

La cebada se utiliza para hacer pan, así como bebidas alcohólicas y no alcohólicas, su importancia histórica se refleja incluso en que se llegó a utilizar como moneda y como una medicina. Durante siglos, la cebada se cultiva principalmente para la producción de malta y como alimento para animales, mientras que otros cereales (trigo, centeno, avena) se usan primordialmente para el consumo humano.

Hasta hace poco, la producción de cebada en todo el mundo estaba siempre por encima de 140 millones de toneladas por año, con fluctuaciones anuales debido principalmente, a los cambios en condiciones climáticas en los principales países productores, la mayor producción de cebada fue durante 2008/09, con 154,70 millones de toneladas producidas (Tabla 1).

<b>AÑO</b>	<b>PRODUCCIÓN TOTAL DE CEBADA [MMt]</b>	<b>PRECIO DE PRODUCCIÓN [US\$/toneladas]</b>
2000	133.1	158.2
2001	144.1	153.28
2002	136.7	147.67
2003	142.5	167.8
2004	153.8	181.13
2005	138.6	183.29
2006	139.5	191.8
2007	134.1	251.85
2008	154.7	297.47
2009	151.8	249.77
2010	123.6	//

Tabla 1. Cebada producción y precios en el mundo 2000-2010. Datos de FAO/UN (2013)

## **CELULOSA MOLDEADA.**

La celulosa moldeada o pulpa de papel moldeado (PPM) es un material semirígido obtenido a partir de pasta de papel que se utiliza para el envasado de determinados productos, especialmente, bandejas para huevos y fruta. Los papeles y cartones están compuestos de pasta de celulosa, una materia prima con características de transformación que permiten convertirlas en productos de alta calidad, con tecnología de poca complejidad.

La materia prima de la celulosa moldeada es un residuo sólido urbano (RSU), de fácil obtención y transformación, con la capacidad de generar una amplia variedad morfológica, 100% reciclable y con una tecnología de producción limpia.

La celulosa moldeada se utiliza en las cadenas de distribución como un embalaje de amortiguación de los productos industriales, debido a su capacidad de amortiguación favorable (Fig. 1.1).



Figura 1.1 Ejemplo de celulosa moldeada [3].

El impacto del reciclaje de residuos de papel y cartón en la producción industrial de envases de celulosa es ampliamente significativo desde el punto de vista ambiental y socioeconómico. La reutilización de estos componentes no solo implica la conservación de los recursos forestales, sino también una disminución del volumen de residuos sólidos y una reducción de la necesidad de incineración.

El proceso implica la recuperación de materiales desechados, especialmente productos hechos de fibras de papel como cartones, libros, periódicos, revistas etc. Lo que aumenta la tasa de recuperación de papel post-consumido.

El proceso de producción de la celulosa moldeada involucra varios pasos: mezcla, moldeado, secado y, a veces, en ciertos casos prensado. Uno de los aspectos particulares de este proceso está relacionado con el equipo de moldeo, en el que se adjunta un conjunto de herramientas de diseño personalizado denominadas "patrones de moldeo". A partir de un único patrón de moldeo, se pueden fabricar diferentes productos simultáneamente en el equipo y cada producto específico puede fabricarse mediante patrones de moldeo alternativos. En esta industria, la cantidad producida de cada producto depende de los patrones de moldeo, cuánto tiempo se utilizan y también de la velocidad de la máquina de moldeo.

El primer paso en cualquier proceso de reciclado de papel y cartón recuperado es la operación de desintegración o "repulpación" que pretende conseguir una obtención de fibras adecuada que se tratará en el proceso de moldeo subsiguiente. Una vez generada la pulpa reciclada, se procede a la separación de contaminantes por diferentes etapas de tamizado y purificación.

## 1.1 EMPAQUE

Se define empaque como aquel material que cubre todas las funciones que corresponden a envolver, contener y proteger los productos para su transporte, venta y consumo (Fig. 1.2).

El empaque de un alimento tiene como función principal preservar y proteger al producto que contiene, para así poder extender su vida útil. El uso excesivo de empaques elaborados a partir de materiales sintéticos ha generado graves problemas ambientales, debido a su total falta de biodegradabilidad. El creciente interés en los alimentos procesados de alta calidad y menor impacto ambiental ha llevado a la industria de alimentos a buscar diversas alternativas para satisfacer las demandas del consumidor. Hoy en día se está generando una nueva tecnología en el envasado de alimentos, que tiene como principal objetivo sustituir los materiales convencionales en materia prima obtenida a partir de fuentes renovables que sean completamente biodegradables.

El empaque de un alimento es fundamental para la conservación del mismo. Sin embargo, una vez que el alimento es consumido, el empaque se desecha y pasa a formar parte de las grandes cantidades de basura que se acumulan día a día en el planeta.

Adicionalmente, la mayor parte de los materiales usados en la fabricación de empaques para alimentos son plásticos, los cuales provienen de una fuente no renovable y no son biodegradables.

Ha surgido una creciente preocupación entre los especialistas en la conservación de alimentos, por disponer de materiales de empaque que, además de proteger a los productos que contienen, permitan reducir los problemas causados por la generación y acumulación de basura.

Las investigaciones sobre estos últimos incluyen tanto polímeros de origen natural (hidratos de carbono, proteínas, lípidos) como de origen sintético (ácido láctico, polihidroxicarbonatos). Sin la existencia de los empaques sería casi imposible que la mayoría

de los productos fabricados por las industrias procesadoras de alimentos fueran distribuidos y comercializados, debido a que éstos estarían expuestos a un gran número de factores que causarían su deterioro. Los efectos logrados al aplicar tratamientos a los alimentos frescos con el fin de preservarlos estarían seriamente comprometidos si los productos obtenidos no fueron empacados. De aquí que la función principal de los empaques sea proteger a los productos.

La protección que los empaques deben proporcionar a los alimentos depende principalmente de la naturaleza de éstos últimos. La mayoría de los alimentos necesitan protección contra la contaminación microbiana posterior al tratamiento de conservación, el daño causado por insectos y roedores, y el daño mecánico provocado por golpes, caídas y vibraciones. Muchos requieren protección contra la ganancia y/o pérdida de agua, y algunos otros deben ser protegidos del contacto con el oxígeno, la luz y las radiaciones ultravioleta.

Otra función básica de un empaque es contener al alimento en porciones definidas y apropiadas para su venta. Además, el empaque sirve como medio para proporcionar al consumidor información sobre el producto (cantidad, ingredientes, valor nutricional, instrucciones para el almacenamiento y el consumo, entre otras) y para promoverlo.



Figura 1.2 Empaque de comida con propiedades antimicrobianas biodegradable [3].

## **1.2 EMPAQUES BIODEGRADABLES.**

Un empaque biodegradable está definido por la ASTM como aquel que es capaz de descomponerse en bióxido de carbono, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa, siendo el mecanismo dominante de descomposición la acción enzimática de los microorganismos y que los productos resultantes puedan ser obtenidos y medidos en un periodo determinado de tiempo [4].

Existen dos tipos de biodegradación, la aerobia y la anaerobia. La biodegradación aerobia ocurre en presencia de oxígeno; los productos resultantes de este proceso de degradación son biomasas, dióxido de carbono, agua y compuestos inorgánicos. La biodegradación anaerobia no necesita oxígeno y los productos resultantes son biomasas, metano, metabolitos intermedios y compuestos inorgánicos. El grado de biodegradación del empaque va a depender de las condiciones ambientales, tales como temperatura, humedad, presión parcial del oxígeno, composición de la flora microbiana y pH del suelo [5].

Los avances en el desarrollo de empaques biodegradables como materiales de empaque para alimentos permiten suponer que, a corto o mediano plazo, será posible disponer de empaques que puedan degradarse en poco tiempo por la acción de agentes biológicos y que, además, cumplan adecuadamente las funciones de protección propias de un empaque. El incremento en los proyectos de investigación orientados a optimizar la calidad de estas láminas y sus procesos para su elaboración será determinante para el logro de esta meta.

## **BIOPOLÍMEROS ACTUALES**

Los biopolímeros basados en recursos renovables y/o biodegradables están generando un interés progresivo no solo en la industria de los plásticos sino en la sociedad en general.

Los Biopolímeros tienen propiedades fisicoquímicas y termoplásticas iguales a las de los polímeros fabricados a partir de petróleo, con la gran diferencia que una vez desechados estos biopolímeros tienden a biodegradarse. De aquí se derivan las grandes ventajas de sustituir el uso de petróleo y de reemplazar los polímeros actuales por polímeros biodegradables, lo que disminuiría notablemente la contaminación del medio ambiente.

La cifra global de residuos plásticos aumenta año tras año; la múltiple versatilidad de este material ha ocasionado un incremento de su consumo y, por lo tanto, de la contaminación, cada año, aproximadamente entre 500.000 millones y 1 billón de bolsas de plástico son consumidas alrededor del mundo, lo que representa que cada minuto se consumen 1 millón de estas bolsas. Además, millones de ellas se convierten en basura [6].

El aumento constante de los precios internacionales del petróleo ha impulsado la producción de productos químicos a partir de materias primas basadas en fuentes renovables. El reciclado de plástico es y será una solución, pero se produce sobre el residuo ya generado y, a su vez, no es una alternativa efectiva para todos los plásticos.

Los biopolímeros, suponen en cambio, una solución desde el origen del problema. Los biopolímeros, que en su mayor parte proceden de recursos renovables, se convierten en una alternativa para la industria de los plásticos. Estos bioplásticos pueden procesarse mediante los mismos procesos que los materiales termoplásticos convencionales, tales como extrusión, inyección o soplado

Los biopolímeros se dividen en aquellos basados en recursos renovables y degradables que cumplen todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para biodegradabilidad y compostaje de plásticos y productos plásticos.



Los renovables no son necesariamente biodegradables o compostables, aunque la mayoría lo son. Los degradables no necesariamente tienen que estar basados en materias primas renovables, para cumplir la norma, ya que la biodegradabilidad está más directamente relacionada con la estructura química que con el origen de las materias primas.

Los biopolímeros naturales provienen de cuatro fuentes: origen animal (colágeno/gelatina), origen marino (quitina/quitosan), origen agrícola (lípidos y grasas e hidrocoloides: proteínas y polisacáridos) y origen microbiano como el Poli(acidolactico), (PLA) y polihidroxicanoatos (PHA) [7]. Por sus altas tasas de biodegradabilidad y sus excelentes propiedades físico-mecánicas, los PHAs y el PLA han resultado ser los de más amplia aplicación en la actualidad.

Los biopolímeros son macromoléculas formadas por la unión covalente de pequeñas unidades moleculares llamadas meros o monomeros, que han sido obtenidos mediante un proceso de polimerización. En la figura 1.3 se pueden ver un ejemplo de estas cadenas.

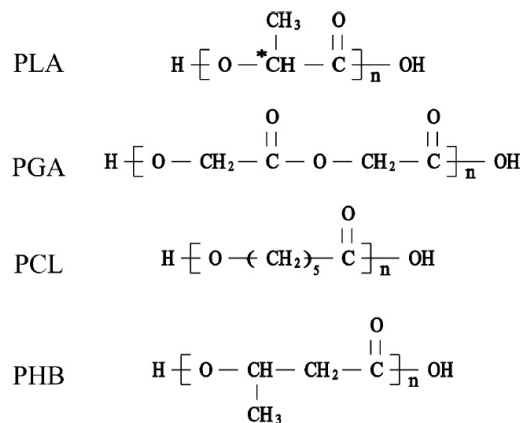


Figura 1.3 Fórmulas estructurales de los biopolímeros PLA Poli (ácidoláctico), PGA Poli (ácidoglicólico), PCL policaprolactona y PHB polihidroxitirato [7].

Algunas propiedades del biopolímero afectan su grado de biodegradación. Estas propiedades son la cristalinidad, las temperaturas de fusión, la transición vítrea, el peso molecular, su secuencia de distribución (al azar, en bloque...), y la presencia de monómero residual o aditivos.

Diversas investigaciones se dedicaron al desarrollo de polímeros biodegradables y materiales plásticos a partir de recursos renovables como el almidón, la proteína de soya, la celulosa y el aceite vegetal. El almidón y la proteína de soya pueden ser termoplastificadas bajo calor y, a su vez, se pueden mezclar eficazmente con otros polímeros termoplásticos para formar materiales compuestos poliméricos biodegradables [8].

Nº	Tipo de bioplástico	Tipo de polímero	Estructura o método de obtención
1	Polímero basado en almidón	Polisacáridos Grupo 1	Obtenidos por modificación de polímero natural
2	Poli (ácido láctico)	Poliéster Grupo 1	Se obtiene por polimerización química del monómero de ácido láctico
3	Poliésteres obtenidos a partir de otros precursores:  Poli (tereftalato de trinitileno)  Poli (tereftalato de butilenglicol)  Poli (succinato de butileno)	Poliéster Grupo 1 ó Grupo 3 si se parte de recursos petroquímicos	1,3 propanodiol obtenido por fermentación + ácido Tereftálico (origen petroquímico)  1,4 butanodiol obtenido por fermentación + ácido Tereftálico (origen petroquímico)  Ácido Succínico obtenido por fermentación + ácido Tereftálico (origen petroquímico)
4	Poli(hidroxi)alcanoatos (PHA): PHB, PHV y copolímeros	Poliéster Grupo 2	Polímero obtenido directamente por fermentación o cosechas genéticamente modificadas
5	Poliuretanos (PURs)	Poliuretano Grupo 2	Poliol obtenido por fermentación o modificación química de aceites naturales + isocianato petroquímico
6	Nylon 6  Nylon 66  Nylon 69	Poliamidas Grupo 1	Caprolactama obtenida por fermentación  Ácido adipídico obtenido por fermentación  Monómero obtenido por transformación química del ácido oleico
7	Polímeros de celulosa	Polisacáridos Grupo 1 /Grupo 2	Modificación polímero natural, o vía fermentación bacterial

Tabla 1.1 tipos de biopolímeros de fuentes renovables [9].

### 1.3 POLÍMEROS DE ORIGEN NATURAL

Entre los polímeros de origen natural que están siendo utilizados para la elaboración de películas biodegradables se encuentran proteínas como el colágeno, la queratina, la gelatina, el gluten de maíz, el gluten de trigo, las proteínas de leche, las proteínas de soya, entre otras, entre los polisacáridos se encuentra el almidón, los derivados de celulosa, el quitosano, el alginato, los carragenatos, y las pectinas, entre otras, entre los lípidos se encuentran las ceras, los ácidos grasos y los moniglicéridos.

### 1.4 HIDRATOS DE CARBONO

#### ALMIDÓN

El almidón es un polisacárido que constituye la principal fuente de carbohidratos en la dieta humana (Fig. 1.4). Al ser un polímero de glucosa el almidón ha sido intensamente estudiado con el fin de procesarlo en un polímero termoplástico y aun mejor con la esperanza de sustituir parcialmente algunos polímeros petroquímicos. El almidón principalmente es una mezcla de dos polisacáridos llamados amilasa y amilopectina y glucosa, con estructura forma de gránulos.

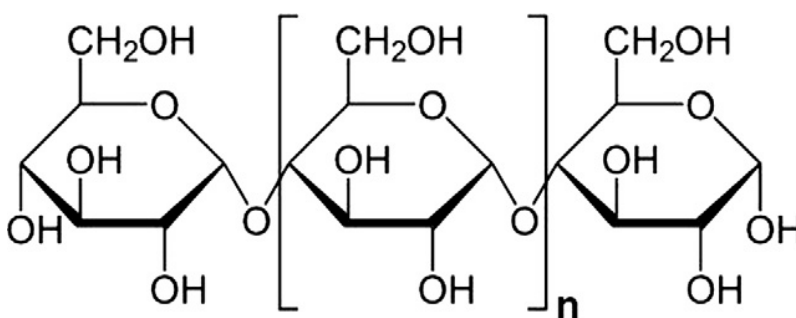


Figura 1.4 Estructura química del almidón [8].

En su forma natural, el almidón no es fundible, y, por lo tanto, no se puede procesar como un termoplástico, se han llevado a cabo numerosos estudios para explorar su uso como un polímero termoplástico y así tratar de dominar sus desventajas, incluyendo baja resistencia mecánica, alta sensibilidad a la humedad, fragilidad causada por la retrogradación del almidón y la pérdida gradual de los plastificantes.

Para romper la estructura cristalina del almidón y permitir que el almidón tenga un comportamiento como el de un fluido, este se combina con un polímero para formar un almidón termoplástico. Dependiendo de la cantidad de polímero utilizado en su elaboración, los almidones termoplásticos pasan de su estado de transición vítrea a un estado viscoso. Su comportamiento de tensión-deformación depende únicamente del polímero utilizado [8].

El almidón termoplástico al ser un material hidrofílico, es susceptible a la humedad durante su almacenamiento. El aumento en el contenido de agua en el almidón termoplástico disminuye la temperatura de transición vítrea. Posteriormente, debido a esta disminución, se reduce su resistencia a la tracción.

Por otra parte, cuando la humedad y la temperatura son constantes, las propiedades mecánicas del almidón termoplástico dependen del tiempo durante su almacenamiento. La resistencia a la tracción aumenta, esto debido a un fenómeno de post cristalización del almidón en presencia de la humedad. En los primeros años que se mezcló almidón con materiales poliméricos, la mezcla final se utilizó únicamente como mezcla de relleno. Como la mayoría de los polímeros son hidrofóbicos y el almidón es un compuesto hidrofílico, es termodinámicamente miscible con estos polímeros y, por consiguiente, da lugar a una unión interfacial débil entre el almidón y la matriz polimérica.

Esto a su vez da lugar a malas propiedades mecánicas de las mezclas, principalmente la baja resistencia a la tracción y a la fragilidad.

Otro tipo de biopolímero a base de almidón son los llamados “almidones termoplásticos”, los cuales contienen una alta concentración de este polisacárido (aproximadamente 90%). Éstos son estables en aceites y grasas; sin embargo, dependiendo del tipo, pueden cambiar de estables a inestables en agua caliente o fría. También dependiendo del tipo, pueden ser degradados completamente en 5 días en sistemas acuosos y en 45 días en compostas controladas [8].

Existe un biopolímero con un contenido de almidón del 100% conocido como “espuma de almidón”. Es un material antiestático, aislante y amortiguador, completamente biodegradable y composteable, que puede sustituir a la espuma de poliestireno como material de empaque biodegradable o puede ser comprimido en láminas para productos de paredes delgadas, tales como charolas, platos desechables, entre otros.

## CELULOSA

Este polisacárido es el biopolímero renovable más abundante en la naturaleza. Alrededor del 33% de toda la materia vegetal es la celulosa. La forma más pura de celulosa natural es el algodón con un contenido del 90%, la madera contiene aproximadamente 50% de celulosa. La celulosa es un polisacárido que tiene una estructura molecular similar al almidón (Fig. 1.5). Es el constituyente principal de las paredes celulares de las plantas y más de la mitad del carbono orgánico del planeta se encuentra en la celulosa. En comparación con el almidón, la celulosa es relativamente resistente a la biodegradación.

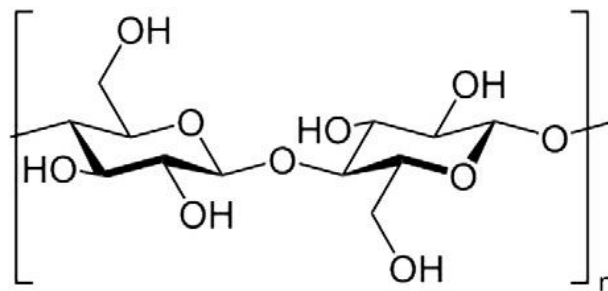


Figura 1.5 Estructura química de la celulosa [8].

Las fibras naturales de celulosa como abacá, bambú, yute, lino, y cáñamo han sido durante mucho utilizados como materiales de carga para reforzar la matriz del polímero.

En comparación con las fibras tradicionales de refuerzo tales como las fibras de vidrio y fibras de carbono, las fibras celulósicas muestran las ventajas de un muy bajo costo, bajo impacto ambiental y dióxido de carbono neutro. Es decir, nada de dióxido de carbono en exceso se devuelve al medio ambiente cuando se abona o se degrada.

Las fibras celulósicas no son abrasivas para equipos de procesamiento, lo que contribuye a una reducción del costo de producción y, a su vez, son más seguras de manipular en comparación con fibras hechas por el hombre. Una desventaja importante de las fibras de celulosa es que son altamente hidrofílicas, esto se debe a la existencia de grandes cantidades de grupos hidroxilo en las moléculas del polisacárido. La mezcla con polímeros de matrices hidrofóbicas conduce a graves problemas de dispersión, dando lugar a malas propiedades mecánicas.

Otro gran inconveniente de las fibras celulósicas es su degradación térmica, dado que deben manipularse por temperaturas debajo de los 200 ° C, sin embargo, muchas de estas desventajas pueden ser reducidas e incluso eliminadas por un procesamiento apropiado del material compuesto. Una de las aplicaciones más prometedoras de fibras celulósicas es el desarrollo de materiales compuestos totalmente biodegradables (verdes) que utilizan los biopolímeros como la matriz. Estos materiales compuestos biodegradables no representan ningún daño al medio ambiente.

La celulosa no puede ser procesada termoplásticamente. Sin embargo, por esterificación es posible producir materiales adecuados para procesarles como termoplásticos, como es el caso de acetato de celulosa (CA), acetato propionato de celulosa (CAP) y el acetato butirato de celulosa (CAB). Una variedad de materias primas como el algodón, el papel reciclado, la celulosa de madera y la caña de azúcar se utilizan en la fabricación de biopolímeros de éster de celulosa en forma de polvo.

Estos polvos combinados con plastificantes y aditivos se extruden para producir diversos grados de plásticos celulósicos comerciales en forma granulada [8].



Figura 1.6 Representación ilustrativa de celulosa

Los ésteres de celulosa son materiales de fácil procesamiento por medio de extrusión e inyección, algunas de sus propiedades innatas incluyen una estrecha ventana entre la temperatura de fundido y la temperatura de descomposición. Por lo tanto, en la mayoría de sus aplicaciones comerciales, se utilizan plastificantes en combinación con ésteres de celulosa. Por ejemplo, el plastificante citratodietililo se utiliza generalmente para el acetato de celulosa (CA), y el adifato de dioctilo (DOA) como plastificante para la celulosa de propionato de etilo (CAP) [10].

Una categoría muy importante, pero poco explotada de materiales a base de celulosa, es la que condujo a algunos de los primeros productos poliméricos industriales tales como el celuloide y el celofán. Esta categoría todavía ofrece nuevas posibilidades para materiales poliméricos.

Por otro lado, cuando se incrusta celulosa natural entorno de fibras en matrices poliméricas biodegradables, se obtiene una nueva generación de materiales fibrosos reforzados conocidos como “biocompuestos”. Mientras los polímeros tradicionales consisten de componentes muy estables, los cuales son muy difíciles de descomponer, los

biocompuestos están totalmente hechos con materiales provenientes de fuentes biológicamente renovables. Esto ofrece posibilidades adicionales de ser eliminado después del final del tiempo de vida, es decir, biodegradación, composteo o combustión neutral a dióxido de carbono.

Otro material derivado de la celulosa es el acetato de celulosa, el cual es un material termoplástico amorfo, translúcido, que pertenece a la familia de los ésteres de celulosa. Es obtenido introduciendo grupos acetilo en la celulosa (como algodón o fibras de madera) para producir un material plástico duro.

Es especialmente adecuado para películas inflamables y otras aplicaciones de recubrimiento que requieren alto punto de fusión, dureza, claridad y buena resistencia a las radiaciones ultravioleta, los químicos, los aceites y las grasas.

## **PROTEÍNAS**

En su estado nativo, las proteínas pueden presentar dos tipos de arreglos estructurales: la fibrilar y la globular. Las proteínas fibrilares se caracterizan por ser insolubles en agua y son los constituyentes estructurales de los tejidos animales; están unidas a través de enlaces de hidrógeno, formando fibras. Por su parte, las proteínas globulares son solubles en agua y forman arreglos esféricos complejos; entre ellas se encuentran el gluten de trigo, la proteína de soya, la proteína del suero de leche y la caseína.

Esta última proteína presenta características físicas interesantes para la elaboración de películas y recubrimientos comestibles, tales como solubilidad en agua y capacidad para actuar como emulgentes. El caseinato de sodio es altamente soluble, se dispersa rápidamente en mezclas acuosas, se homogeniza en presencia de grasa o aceite y forma fácilmente películas a partir de soluciones acuosas, debido a su naturaleza espiral aleatoria y su capacidad para formar enlaces de hidrógeno. Las películas de caseinato presentan alta resistencia a la desnaturalización química y a la coagulación, lo que significa que se mantienen estables en un amplio intervalo de valores de pH, temperatura y concentración de sal. Además, son menos permeables al oxígeno que las películas elaboradas a partir de



polisacáridos. Sin embargo, debido a su carácter hidrófilo presentan una resistencia limitada a la transmisión de agua [11].

Otro sistema proteico utilizado para formar películas es el gluten de trigo, el cual es una alternativa interesante, debido a que presenta buenas propiedades de barrera a los gases y una naturaleza relativamente hidrófoba en comparación con otros polímeros naturales.

## **LÍPIDOS**

Otro grupo de materiales que se utilizan para las elaboraciones de películas biodegradables son los lípidos. Los compuestos de naturaleza lipídica usados como recubrimientos son: monoglicéridos acetilados, ceras naturales y surfactantes. Las sustancias lipídicas más efectivas son las ceras de parafina y la cera producida por las abejas. La principal función de las cubiertas lipídicas es obstruir el transporte de humedad, debido a su baja polaridad. Por el contrario, la hidrofobicidad característica de los lípidos da lugar a la formación de películas gruesas y frágiles. Consecuentemente, las películas elaboradas a base de lípidos deben combinarse con proteínas o derivados de celulosa. Generalmente, la permeabilidad al vapor de agua disminuye cuando la concentración de los materiales hidrofóbicos incrementa. Las películas a base de lípidos son a menudo soportadas sobre una matriz polimérica, usualmente un polisacárido que le proporciona resistencia mecánica.

## **CERAS**

Las ceras son los compuestos más eficientes para ser usados como barrera a la humedad. Además, sirven como barrera para los gases y para mejorar la apariencia superficial de varios alimentos. Si se aplican como una capa gruesa, como en los quesos, deben ser removidas antes de su consumo; cuando se aplican como capas delgadas, como en las frutas y vegetales crudos, son consideradas comestibles.

### **1.5 POLIMEROS DE ORIGEN SINTETICO BIODEGRADABLES.**

Los polímeros de origen sintético biodegradables son resultado de la fermentación de polímeros primarios (celulosa, almidón, proteína, pectina, entre otros), utilizados como sustratos por diferentes microorganismos, obteniendo diferentes productos finales tales como el Poli ácido láctico (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), entre otros.

#### **POLIHIDROXI ALCONATO (PHA).**

Los Poli hidroxialcanoatos son polímeros de origen microbiano producidos por una gran cantidad de bacterias como la pseudomonas aeruginosa. Estos polímeros son sintetizados en los cuerpos de las bacterias alimentadas con glucosa. Son polímeros extremadamente versátiles, completamente biodegradables, cristalinos que, pueden ser manipuladas para proporcionar una amplia gama de propiedades mecánicas y de barrera. En algunos casos se comportan como termoplásticos de ingeniería. Pueden ser degradados con una hidrólisis simple, sin requerir enzimas que la catalicen.

La producción industrial de PHA, se realiza extrayendo el polímero de las bacterias mediante el rompimiento mecánico o químico, de la pared celular. En la década de los 1980, Imperial Chemical Industries desarrollo el poli (3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) obtenido por fermentación que fue nombrado "Biopol". Actualmente se encuentra disponible en el mercado bajo el nombre de "Biopol" y distribuido en los EE.UU. por Monsanto y Metabolix [10].

### **1.6 POLÍMEROS COMPOSTABLES**

El término compostable es definido por la ASTM como un material "Capaz de experimentar descomposición biológica en compost la cual produce dióxido de carbono, agua, compuestos inorgánicos, y biomasa, a una rapidez consistente con otros materiales compostables (por ejemplo, celulosa), sin residuos distinguibles visualmente" [4].

Los polímeros compostables son aquellos polímeros biodegradables que, sometidos a una degradación controlada bajo condiciones de compostaje industrial o comercial, cumplen

además con unas especificaciones o criterios de calidad como no generación de residuos visibles, eco toxicidad, tamaño y espesores pequeños sin contenido de metales pesados. Estos son definidos como parámetros de calidad del compost.



Figura 1.6 Degradación de una botella por 6 semanas bajo composta [12].

Para que un polímero sea considerado como biocompostable debe cumplirse lo siguiente:

- Al menos el 90% de la parte orgánica del material debe convertirse en CO<sub>2</sub>, en menos de 6 meses de contacto con un medio biológicamente activo y
- El material resultante debe pasar exámenes agrónomicos (comportamiento sobre las plantas) y de ecotoxicidad.

Entre los beneficios de los polímeros compostables son:

- Materias primas provenientes de fuentes vegetales renovables.
- 100% compostables en 180 días bajo ambiente de compost.
- 100 % biodegradables.
- Disminuyen huella de Carbono.
- Disminuyen residuos en vertedero.
- Certificaciones de compostabilidad aprobadas.

## 1.7 POLÍMEROS OXO BIODEGRADABLES.

La tecnología del proceso llamado oxo-degradación se basa en la adición de una pequeña cantidad, típicamente 3%, del aditivo pro-degradante durante el proceso de fabricación convencional, otorgando propiedades de degradabilidad al material [10].

Bajo condiciones aeróbicas (en presencia de oxígeno), el carbón se oxida biológicamente a CO<sub>2</sub> dentro de la matriz y libera generando energía que es aprovechada por los microorganismos para su proceso vital. Bajo condiciones anaeróbicas, se producen CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> [10].

La degradación comienza inmediatamente después de la fabricación del producto plástico y se acelera cuando el material se expone al calor, a la luz o es sometido a esfuerzos. El proceso es irreversible y continuo hasta que todo el material se reduce a CO<sub>2</sub> y agua, sin dejar residuos sólidos en el suelo, aunque esto último no se ha comprobado del todo.



Figura 1.7 Biociclo de una bolsa oxo biodegradable [13].

Los plásticos oxo-biodegradables también son consumidos por las bacterias y los hongos. Una vez que el aditivo fracciona la cadena del polímero y genera grietas en su superficie, el acceso a micro organismos. Con este tipo de materiales, los desechos orgánicos generados en lugares como hogares, restaurantes y hospitales, pueden ser colocados en bolsas de plástico oxo-biodegradable y ser enviados directamente a las plantas de compostaje sin vaciar dichas bolsas. Incluso si este tipo de materiales es ingerido, la temperatura y las bacterias encargadas de la digestión realizarán de manera rápida la degradación del material, sin causar daño alguno.

En resumen, la oxo-biodegradación ocurriría en dos fases:

1. Aparición de la oxidación / fragmentación bajo la acción combinada de:
  - Luz
  - Calor
  - Estrés mecánico y oxígeno
2. Biodegradación
  - Caracterizada por la medida del CO2 emitido.

Los plásticos oxo-biodegradables producidos con resinas poliolefínicas se caracterizan por contener aditivos formados por sales metálicas como hierro, magnesio, níquel, cobalto que provocan la fragmentación del polímero. En teoría, estos aditivos pueden incorporarse en un rango de 1 a 4%, en formulaciones de plásticos convencionales: esto facilita el proceso de oxidación del polímero y rompe las cadenas en pequeñas moléculas, las cuales culminarían su degradación por acción biológica [10].

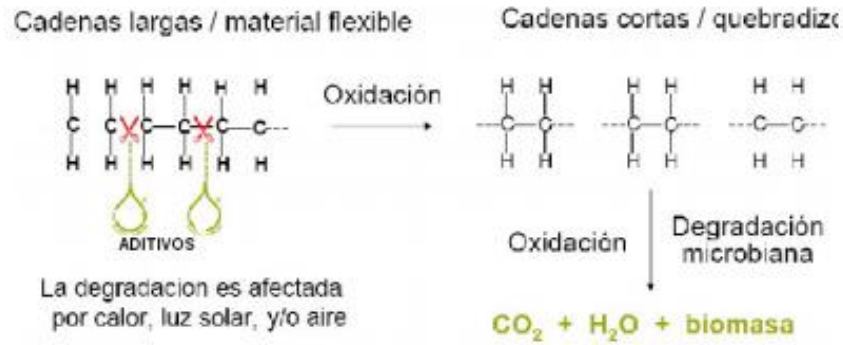


Figura 1.8 Esquema de actuación de los aditivos oxo-biodegradables [12].

### 1.8 POLÍMEROS HIDRO-BIODEGRADABLES.

La diferencia principal entre los aditivos oxo biodegradables y los hidro-biodegradables, radica en los residuos post-degradación. El proceso mediante el cual se produce este tipo de biodegradación es a través del hidrólisis (La hidrólisis, es una reacción química entre agua y otra sustancia la cual, al ser disueltas en agua, sus iones constituyentes se combinan con los iones hidronio, oxonio o bien con los iones hidroxilo). Originalmente este tipo de degradación sólo se encontraba en los llamados biopolímeros como los polisacáridos y poliésteres alifáticos; sin embargo, estudios sobre la aditivación que permita que polímeros sintéticos se conviertan en compostables se están llevando a cabo a nivel mundial. Los residuos post degradación están destinados, en este caso, a convertirse en compost, para formar parte de la cadena alimenticia de los microorganismos [14].

Sin embargo, los plásticos hidro-biodegradables se hacen generalmente de los cultivos y son hasta 400% más costosos que el plástico ordinario, muchos de ellos no son lo suficientemente resistentes como para ser empleados en la fabricación de bolsas de supermercado. Los plásticos compostables sólo son viables económica y ambientalmente en el caso de que existieran instalaciones industriales de compostaje disponibles para procesarlos en grandes cantidades.

## LÁMINAS DE POLIETILENO (FILMS)

Las láminas de polietileno son aquellas que están hechas principalmente de polietileno, el Polietileno es un polímero sintético termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno (Fig. 1.9) Es un material parcialmente cristalino y parcialmente amorfo, de color blanquecino y translucido. Los diversos tipos de Polietileno que se encuentran en el mercado son el resultado de las diferentes condiciones de operación, llevadas a cabo en la reacción de polimerización.

Los plásticos que se encuentran en el grupo de las poliolefinas (polímeros de etileno propileno y butileno) son termoplásticos semicristalinos. Se destacan, en general, por una buena resistencia química, alta tenacidad y elongación en la rotura, así como buenas propiedades de aislamiento eléctrico.

Pueden ser procesados en prácticamente todos los procesos usuales, son económicos y, por ello, han encontrado una amplia aplicación.

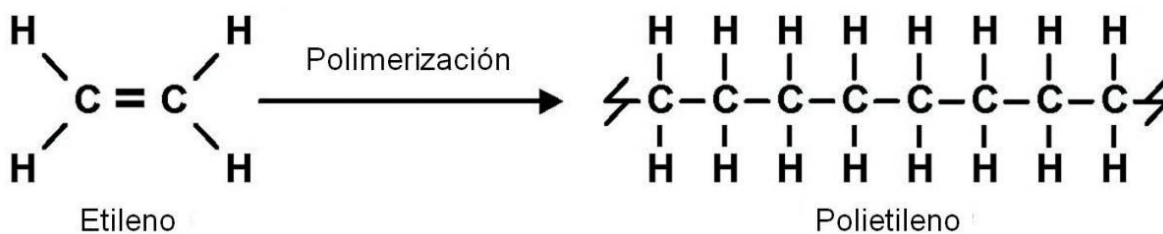


Figura 1.9 Síntesis del Polietileno

En forma general se puede clasificar dos tipos diferentes de Polietileno de acuerdo a la densidad que presentan ya que esta es un buen indicativo del tipo de estructura que posee el polímero.

- Polietileno de baja densidad (PE-BD)
- Polietileno de alta densidad (PE-AD)

La tabla 1.2 muestra una comparación de las propiedades más importantes del polietileno de baja densidad (PE-BD) y polietileno de alta densidad (PE-AD).

Parámetros de comparación	PE-BD	PE-AD
Grado de cristalización [%]	40 a 50	60 a 80
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	0.915 a 0.94	0.94 a 0.965
Módulo de Cizallamiento [N/mm <sup>2</sup> ]	+/- 130	+/-135
Rango de fusión cristalina [°C]	105 a 110	130 a 135
Resistencia química	buena	mejor

Tabla 1.2 Comparación de las propiedades mecánicas del polietileno.

Los polímeros basados en etileno se producen en amplia variedad, por ello se obtiene un muy variado cuadro de propiedades, a ello hay que agregarle posibilidades de modificación por medio de la fabricación de co-polimerizados y aleaciones poliméricas (polyblends).

El alto grado de cristalinidad de los polietilenos genera el fenómeno de transición vítrea y les proporciona un módulo de elasticidad alto con gran flexibilidad y alta resistencia al impacto a temperatura ambiente.



# ***CAPÍTULO 2***

## ***MATERIALES COMPUESTOS.***

Un material compuesto consiste en la combinación a nivel macroscópico de dos o más componentes no solubles entre ellos que se unen sinérgicamente, obteniéndose un material con una mayor capacidad estructural que la de sus constituyentes cuando actúan por separado.

La importancia ingenieril de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos o más fases, una matriz continua que rodea a las demás fases que se denominan fases dispersas y que se clasifican en función de su microestructura o geometría. La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas [15].

### **2.1 COMPONENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS.**

Para comprender qué son los materiales compuestos y por qué los necesitamos, debemos estudiar qué características poseen y cómo se relacionan la matriz y el refuerzo.

#### **MATRIZ**

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda embebido. Materiales metálicos, poliméricos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo.

Las funciones principales de la matriz son:

- Definir las propiedades físicas y químicas
- Transmitir las cargas al refuerzo
- Protegerlo y brindarle cohesión.
- Soportar las fibras manteniéndolas en su posición correcta
- Transfiere la carga a las fibras fuertes

Así como también permitirá determinar algunas características del material compuesto como la conformabilidad y el acabado superficial, es decir, de las propiedades de la matriz dependerá la capacidad que posea el material compuesto para ser conformado con geometrías complejas en procesos que, generalmente, no involucrarán posteriores etapas de acabado.

La matriz, por lo general, es responsable del control de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto. Las matrices poliméricas son las más comúnmente utilizadas. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables están disponibles en el mercado con el agregado de fibras de vidrio cortas como refuerzo. Los compuestos de matriz metálica incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos de matriz metálica se cubre una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. La matriz metálica permite que el compuesto funcione a altas temperaturas, pero, a menudo, la producción de una pieza de este tipo de materiales compuestos es más costosa que la de una pieza de compuestos de matriz polimérica [16].

## MATERIAL DE REFUERZO.

Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánica, pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra. En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, éstas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta.

## 2.2 CLASIFICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS.

Basados en el criterio de la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa para la clasificación de los materiales compuestos se pueden establecer tres grandes grupos: 1) compuestos reforzados con partículas, 2) compuestos reforzados con fibras, 3) compuestos estructurales. A su vez, estos grupos presentan subdivisiones (Fig. 2.1)



Figura 2.1. Clasificación de los materiales compuestos.

Este proyecto presenta únicamente los materiales compuestos reforzados con partículas.



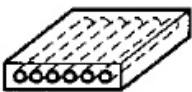

Estructura	Refuerzo	Material compuesto	Propiedades
	Partículas	Particulado	Isotrópico
	Fibras cortas	De fibra discontinua	Aleatorio - isotrópico alineado - anisotrópico
	Fibra continua	De fibra continua	Ortotrópico
	Láminas o capas	Laminados	Anisotropía en todo el espesor; isotropía/anisotropía en el plano

Figura 2.2 Comparación de las estructuras de los diferentes refuerzos en materiales compuestos

### 2.3 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS.

Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en reforzados con partículas grandes y consolidados por dispersión.

Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento. El término "grande" se utiliza para indicar que las interacciones matriz partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula [17].

El reforzamiento es tanto más efectivo cuanto más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz. Además, la fracción de volumen de las dos fases influye en el comportamiento; las propiedades mecánicas aumentan al incrementarse el contenido de partículas. Es importante que el dispersante tenga baja solubilidad en la matriz

y no reaccione químicamente con ella, aunque un pequeño grado de solubilidad puede ayudar a mejorar la unión entre los componentes.

Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son mucho más pequeñas: los diámetros tienen de 10 a 100 [μm]. Las interacciones matriz-partícula que conducen a la consolidación ocurren a nivel atómico o molecular. Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones. De este modo se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza.

En la conformación de un material compuesto hay muchas opciones diferentes al momento de elegir materiales de refuerzo, cada uno de ellos con su conjunto de propiedades únicas tales como resistencia, rigidez, tenacidad, resistencia térmica etc. Sin embargo, las propiedades finales de una pieza de material compuesto producida a partir de estos distintos materiales no dependen sólo de las propiedades individuales de la matriz y el refuerzo sino, también, del modo mediante el cual se diseñan y procesan dichos materiales [15].

## **2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN EN COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA.**

Cuando las matrices utilizadas en la fabricación de un material compuesto son polímeros termoplásticos, las técnicas empleadas para su procesamiento son, principalmente, aquellas mediante las cuales se procesa la matriz individualmente para llegar a una pieza final: inyección, extrusión, moldeo por compresión.

Para la obtención de láminas plásticas compuestas de este trabajo, se procederá a explicar de manera general el proceso de fabricación por el método de extrusión y la maquinaria con la cual se fabrican dichas láminas.

## EXTRUSIÓN.

Hoy en día existe el proceso de extrusión de láminas, el cual es el método más común para la fabricación de láminas, películas, tubos perfiles etc. De manera general se utiliza para fabricar bolsas de plástico y recubrimiento de empaques de alimentos, básicamente la extrusión de láminas plásticas es la producción de manera continua de piezas con sección transversal constante (Fig. 2.3).

Este proceso consta en forzar un polímero reblandecido a pasar a través de una boquilla o dado con la forma adecuada para el perfil plástico que se desee obtener. La máquina tiene como propósito suministrar un flujo uniforme y constante de material reblandecido a través del dado para la obtención de perfiles plásticos.

Como se aprecia en la siguiente figura, el sistema de alimentación más habitual es una tolva, en la que el material a procesar se alimenta en forma de gránulos, El dispositivo de plastificación y mezclado está constituido por un husillo que gira en el interior de un cilindro o cañón calentado, generalmente mediante resistencias eléctricas.

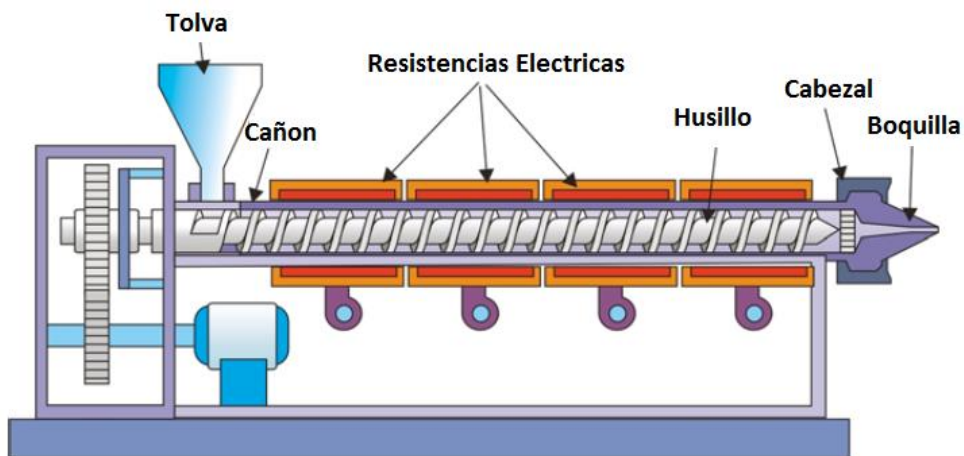


Figura 2.3 Representación gráfica de una máquina de extrusión [18]

## 2.4 COMPONENTES DE UNA EXTRUSORA

### HUSILLO DE EXTRUSIÓN.

El husillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal (Fig. 2.4). Es una de las partes más importantes, ya que contribuye a realizar la función de transportar el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del husillo. Los parámetros más importantes en el diseño del husillo son su longitud ( $L$ ), su diámetro ( $D$ ), el ángulo del filete ( $\theta$ ) y el paso de rosca ( $w$ ) [19].

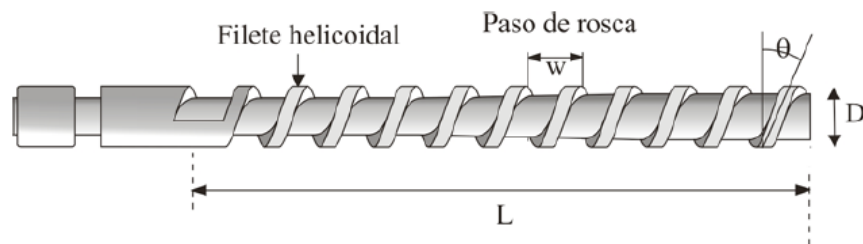


Figura 2.4 Husillo de una extrusora [18]

Los materiales termoplásticos que se usan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, el calor específico, el coeficiente de fricción, la temperatura de fusión, la viscosidad del fundido, etc., cubren un amplio rango de valores, es importante revisar la hoja de especificaciones técnicas de cada material a procesar para conocer temperaturas, presión y velocidad de extrusión.

### CAÑÓN DE CALEFACCIÓN.

El cañón de calefacción alberga en su interior al husillo. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cañón suele construirse de aceros muy resistentes, y en algunos casos, viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una mayor resistencia. [19].

El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas de anillo localizadas en toda su longitud (Fig. 2.5) y también, aunque es menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres, con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

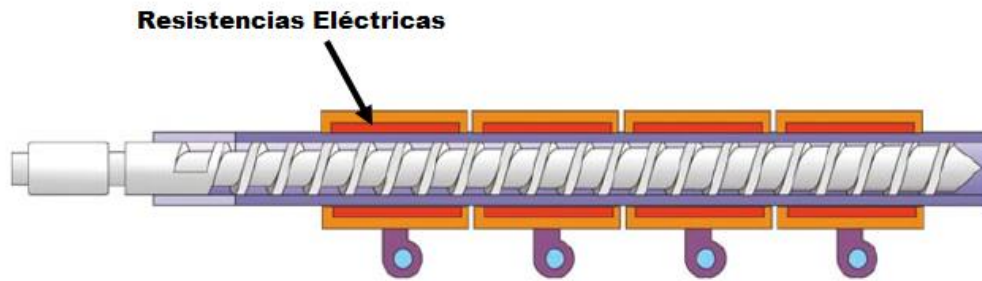


Figura 2.5 Cañón de calefacción de una extrusora [18]

Hay que tener en cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cañón, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles.

#### **GARGANTA DE ALIMENTACIÓN.**

La garganta de alimentación se sitúa debajo de la tolva. Suele estar provista de un sistema de refrigeración, para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja para que los gránulos no se adhieran a ella.

#### **TOLVA.**

La tolva es el contenedor que se utiliza para introducir el material en la máquina (Fig. 2.6). La tolva junto con la garganta de alimentación debe de estar diseñadas de manera que proporcionen un flujo constante de material. Se diseñan con un volumen que permita



albergar material para aproximadamente 2 horas de trabajo, igual manera dependiendo de la velocidad del husillo utilizado.

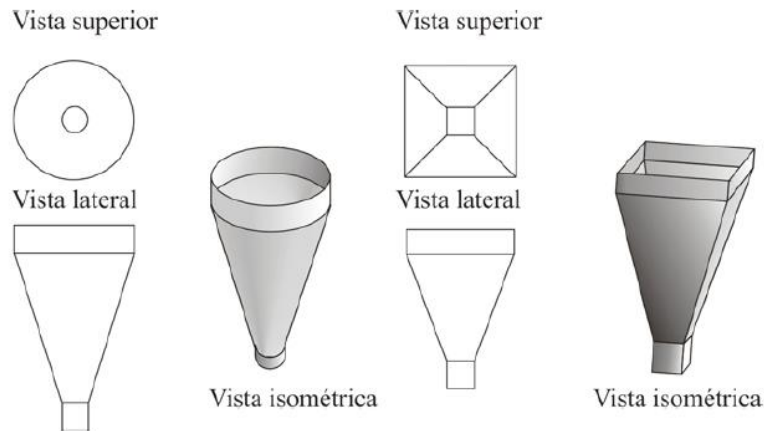


Figura 2.6 Vistas de una tolva de una máquina de extrusión [18].

### PLATO ROMPEDOR

El plato rompedor se encuentra al final del cañón. Se trata de un disco de metal con agujeros (Fig. 2.7). El propósito del plato es fragmentar el flujo, homogenizar y mejorar el mezclado del fluido, además de atrapar los contaminantes para que no salgan en el producto extrudido.

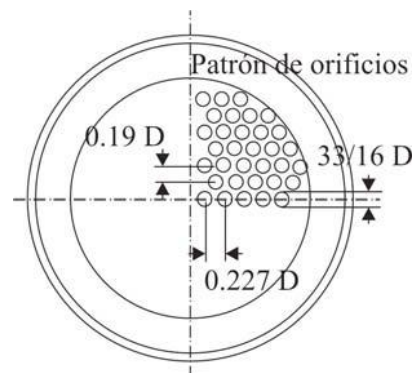


Figura 2. Diseño genérico del plato rompedor [18].

## CABEZAL Y BOQUILLA.

El cabezal es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando a la boquilla y por lo general conteniendo el plato rompedor. Generalmente va atornillado al cañón. El perfil interno del cabezal debe facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. En la figura 2.8 se muestra un sistema cabezal-boquilla de forma anular [18]. La función de la boquilla es la de moldear el plástico. Las boquillas se pueden clasificar por la forma del producto, teniendo así boquillas anulares, planas y circulares.

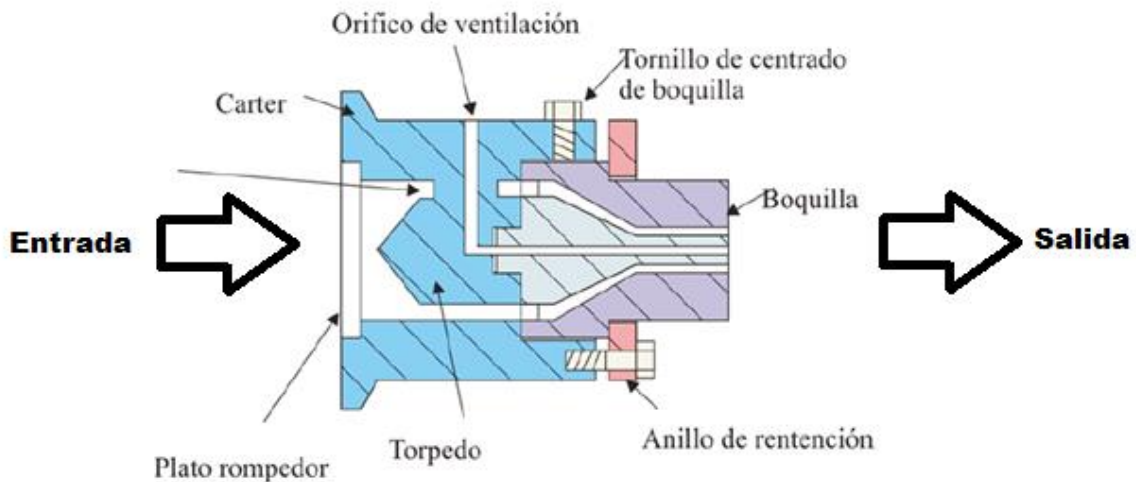


Figura 2.8 Vista lateral de una boquilla de una máquina de extrusión [18].

En la parte del cilindro más alejada de la tolva de alimentación se acopla un cabezal cuya boquilla de salida conectada a un dado, el cual da la geometría final del perfil plástico obtenido.

Las extrusoras se dividen en tres zonas: alimentación, compresión y dosificación (Fig. 2.9), junto con la evolución de la presión a lo largo de la extrusora.

La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del husillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el material y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada de procesamiento.

La zona de compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye gradualmente. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación.

La zona de dosificación se sitúa al final en la parte más cercana a la boquilla, en esta zona el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión el dado de conformado.

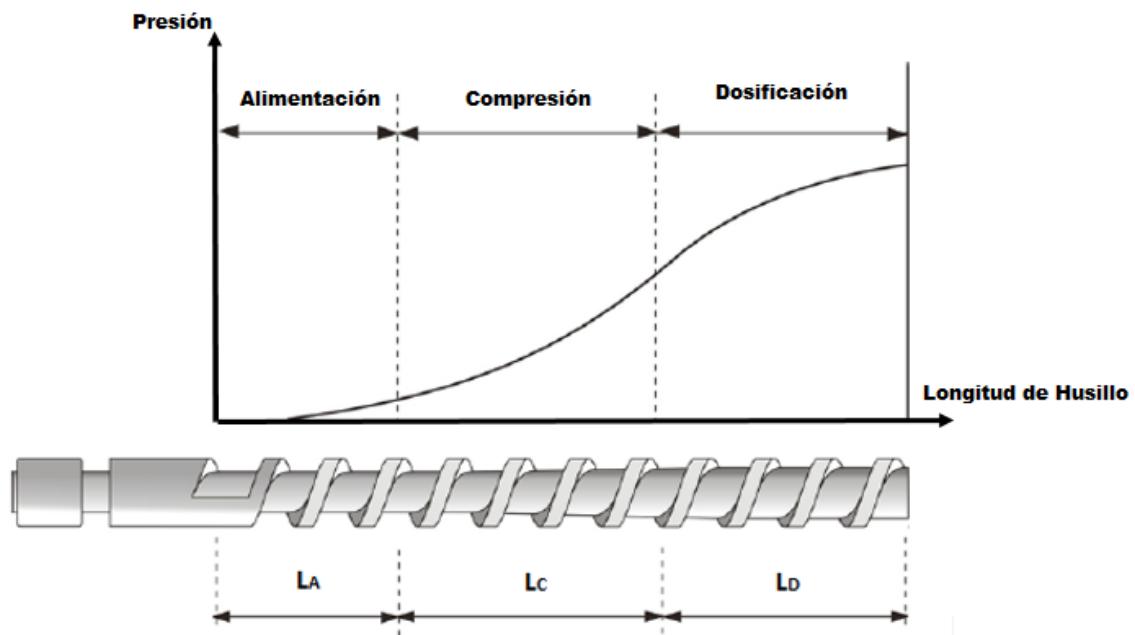


Figura 2.9 Zonas de una extrusora y longitudes representativas a lo largo de un husillo [18]

Además, existen otras variantes de extrusoras como son las multi-husillo que, como su nombre indica, poseen más de un husillo. Entre éstas, las más importantes son las de dos husillos, entre lo cual destaca el tipo de giro que llegase a presentar como puede ser giro contrario o paralelo.

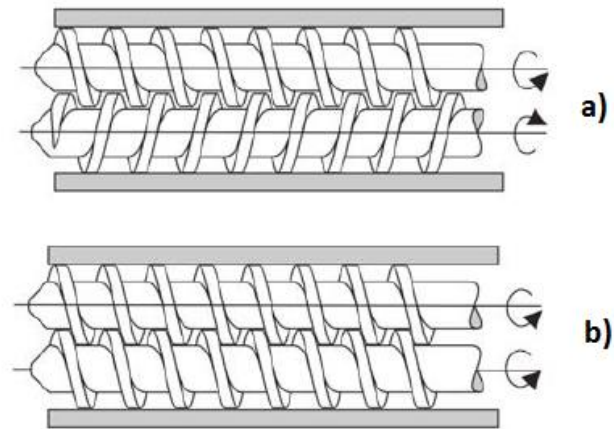


Figura 2.10 Doble husillo en una extrusora con diferente tipo de giro a) contrario y b) paralelo [18].

## 2.6 DATOS DE EXTRUSIÓN DE LÁMINA PLANA

En el diseño de dados de extrusión se consideran tres puntos primordiales:

- Equilibrio en el flujo de material reblandecido a través de la uniformidad en el flujo del material por la geometría del dado integro.
- Obtener dicho equilibrio de flujo de material haciendo que las caídas de presión a través del dado sean mínimas.
- Mantener una velocidad en el flujo capaz de permitir siempre el desplazamiento del mismo evitando estancamientos. El material estancado puede ocasionar la degradación del material, debido a la exposición prolongada de la masa fundida a altas temperaturas.

En la Figura 2.12 pueden observarse cuatro zonas principales en los dados de extrusión de láminas planas:

- 1 Canal central de entrada.
- 2 Colector. Distribuye el polímero reblandecido hacia toda la geometría del dado, la zona del colector, tiene como propósito dirigir el material desde la salida del cañón a la zona de percha en el dado, con base en la configuración geométrica del cañón y el caudal volumétrico en el extrusor.
- 3 Distribuidor. Junto con el colector, ofrece una caída de presión uniforme, esta zona se encargará de darle la dirección final al material hacia la salida del dado
- 4 Borde de salida. Salida de la lámina a través de la geometría final en el borde del dado.

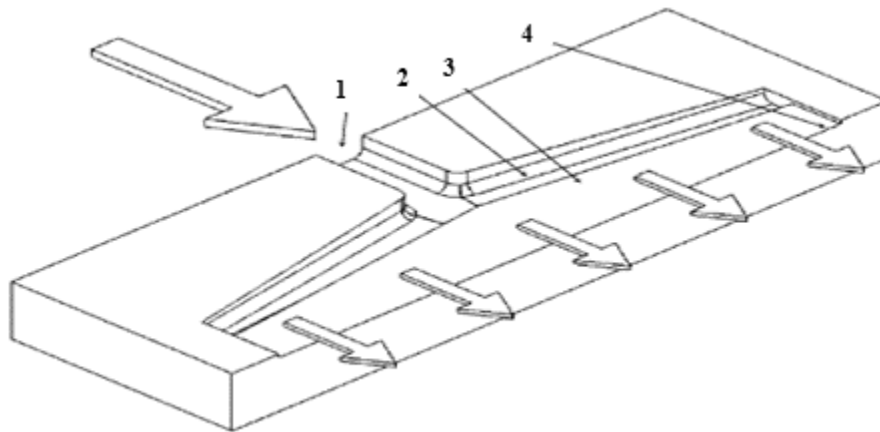


Figura 2.11 Dado plano de extrusión de láminas planas [20].

Como medida práctica, se añaden dispositivos de control de flujo durante el diseño de los dados, para permitir un ajuste más preciso en cuanto a las dimensiones finales requeridas. El diseño de dados de extrusión se ve afectado principalmente por dos comportamientos únicos de los plásticos fundidos:

- Comportamiento pseudoplástico. La viscosidad disminuye a medida que se incrementa la velocidad de corte durante el proceso. Este tipo de comportamiento provoca que el flujo volumétrico sea muy sensible a ligeros cambios en la geometría del dado. Por ejemplo, el flujo de polímero fundido a través de una ranura variará con el espesor de la hendidura. Por lo tanto, un pequeño cambio en la apertura del dado en el contorno de salida puede causar un cambio considerable en el flujo del material.
- Comportamiento viscoelástico. Este comportamiento es el responsable de cierto “hinchamiento” (expansión del material en dirección ortogonal a la dirección del flujo) del material a la salida del dado [20].

# ***CAPÍTULO 3***

## ***CARACTERÍSTICAS DE LA CASCARILLA DE CEBADA.***

### **3.1 CLASIFICACIÓN Y CULTIVO**

La Cebada (*H.vulgare* L.) es un grano de cereal perteneciente a la familia Poaceae (También conocido como Gramineae), del género *Hordeum*. Los granos de cebada (Fig. 3.1) son generalmente más grandes y más acentuados que los del trigo, tienen un color amarillo brillante si son reflejados en la luz [1].



Figura 3.1 Granos de cebada [1]

La estructura anatómica del grano de cebada se presenta en la figura 3.2, se compone de la cáscara que rodea al grano formado a partir del lema (dorsal cáscara o casco) palea (cáscara ventral o casco), testa, capa de aleurona, endospermo y el germen o embrión.

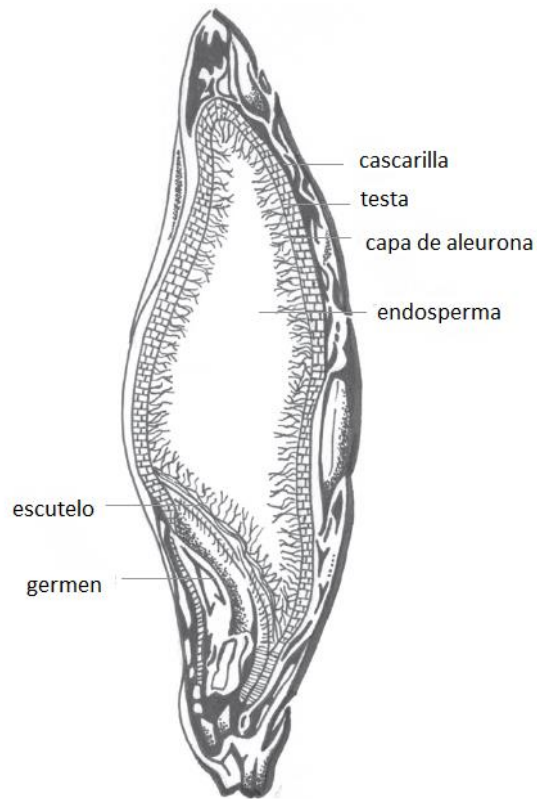


Figura. 3.2 Núcleo cebada en sección transversal longitudinal [1].

La cascarilla consiste principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina, lignanos, y una pequeña cantidad de polifenoles, sustancias amargas, también contiene una cantidad alta de minerales.

La capa de aleurona (Fig. 3.3) rodea el endospermo y consta de células ricas en proteínas y a su vez contienen enzimas. La aleurona juega un papel crítico en la regulación de enzimas degradadoras de endospermo durante la germinación de otras sustancias, tales como grasas, polifenoles y materiales colorantes.

Hasta aproximadamente el 75% del grano de cebada el endospermo es una masa de almidón incrustado en una matriz de proteína y es una fuente de nutrientes para el embrión en desarrollo. El embrión representa aproximadamente el 2.5%, en peso, del grano de cebada y es rico en proteínas (34%), lípidos (14-17%) y cenizas (5-10%) además de ser muy rica en azúcares (sacarosa, 15 y fructosanos 10%).



Las células de las paredes del escutelo se componen principalmente de hemicelulosa y proteínas (17-20%) y también contienen algunos compuestos fenólicos (ácido ferúlico principalmente) minerales, fitina y azúcares (incluyendo sacarosa, rafinosa, estaquiosa, y fructanos) [1].

Este tejido secreta hormonas que estimulan la liberación de enzimas y la síntesis de proteínas. Las enzimas hidrolizan almidón y proteínas y así producen nutrientes para el crecimiento del grano.

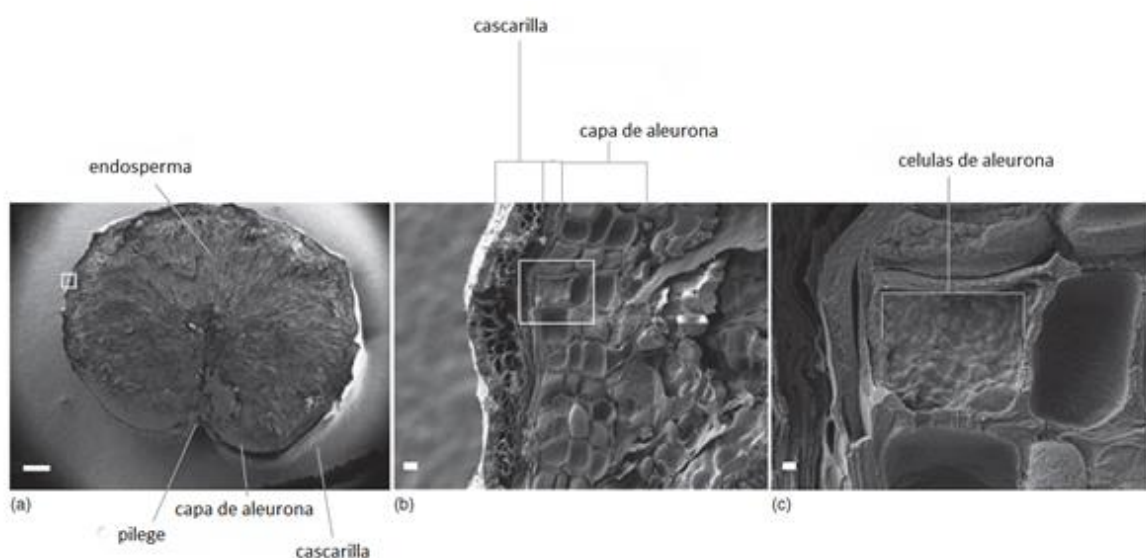


Figura. 3.3 Estructura del grano de cebada seccionado transversalmente (a) con la cáscara detallada (b) endospermo amiláceo (c) 5000 × magnificación [1].

### 3.2 COMPOSICIÓN DE CARBOHIDRATOS DE LA CEBADA Y PROPIEDADES

El almidón, la fibra y las proteínas constituyen la porción más grande del grano de cebada y la variación en uno de estos componentes influye en las cantidades de los otros dos. Por otra parte, el nivel de almidón se correlaciona inversamente con la proteína.

CONSTITUYENTE	CONTENIDO (% PESO EN SECO)
CARBOHIDRATOS	78-83
ALMIDÓN	60-68
CELULOSA	1.4-5
GLUCOSA	0.41-2.9
FRUCTOSA	0.16-1.18
LÍPIDOS	2.02-3
PROTEÍNAS	8.01-17
MINERALES	1.5-3
OTROS	5.1-6

Tabla 3.1 composición de la cebada [1]

### ALMIDÓN

En general, el almidón es el más abundante en la fracción del endospermo del grano de cebada. Los gránulos de almidón se componen principalmente de dos fracciones poliméricas distintas, con claras diferencias en el peso molecular y la organización estructural. La cebada tiene almidón con niveles inusualmente altos de amilosa (hasta 70%).

### PROTEÍNAS

Los contenidos de proteína de la cebada oscilan entre 7 y 25% y pueden ser separados en cuatro grupos de solubilidad: (fracción soluble en agua) albúmina, globulina, proláminas o hordeína (fracción soluble en alcohol) y glutelinas (fracción soluble en álcali) [1].

### LÍPIDOS

Los granos de cebada contienen bajos niveles de lípidos (aproximadamente 2-4% del total peso del grano). La distribución de los lípidos en las principales partes anatómicas del grano de cebada es concentrada en el embrión, mientras el 70% restante se encuentra en el endospermo [1].

## VITAMINAS

Las vitaminas son componentes nutricionales producidos por las plantas. Los granos de cereales son bien conocidos por ser buenas fuentes de ciertas vitaminas, de los principales cereales, la cebada contiene la mayor cantidad de solubles en grasa vitamina lo que representa un importante antioxidante en alimentos.

## MINERALES

La cebada contiene entre 2 y 3% de minerales. Los minerales se clasifican en dos grandes grupos, macro y microelementos, sobre la base de su concentración en los alimentos, los elementos minerales en la cebada se concentran principalmente en el embrión y aleurona. Los más abundantes macro-elementos encontrados en la cebada son P, K y Si, mientras que, entre los microelementos, Fe, Mn y Zn son los principales representantes, los silicatos se producen abundantemente en la cáscara, pero también están presentes en almidón. [1].

Las composiciones químicas de la cascarilla de cebada se presentan en la Tabla 3.2 Se puede observar que el contenido de celulosa en la cáscara de la cebada es 39%. El otro material estructural es el almidón, cuyo contenido es del 11% en la cáscara de la cebada. El resto de las composiciones de fibras son, contenidos extractivos y cenizas inorgánicas.

Composición (%)

Celulosa	39
Hemicelulosa	12
Lignina	22
Almidón	11
Proteína	4
Grasas	4

Tabla 3.2 Composición química cascarilla de cebada [1]

# ***CAPÍTULO 4***

## ***PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.***

### ***DESARROLLO DE UN MATERIAL COMPUESTO DE POLIETILENO(PE) CON UNA MATRIZ DE CASCARILLA DE CEBADA Y SU CARACTERIZACIÓN.***

En el presente capítulo se describe el proceso experimental que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto de investigación. Con el fin de determinar las mejores condiciones con las que se trabaja el material compuesto, se han llevado a cabo diferentes estudios previos para obtener y conocer los parámetros adecuados para procesar el material compuesto.

#### **CASCARILLA DE CEBADA (CC).**

La cascarilla de cebada fue proporcionada por la empresa INDUSTRIAL DE ALIMENTOS COMPLEMENTOS ALIMENTICIOS, S.A. de C.V. el material es considerado como un desecho agroindustrial del proceso de obtención de harina de cebada (Fig. 4.1).

La cascarilla de cebada tiene una composición orgánica de superficie rugosa destacando porosidad y fragilidad en su estructura, además de ser higroscópica.



Figura 4.1 Cascarilla de cebada proporcionada por INDUSTRIAL DE ALIMENTOS COMPLEMENTOS ALIMENTICIOS S.A. de C.V.

## POLIETILENO (PE)

El polietileno es un plástico sintético de la marca PEMEX (PX-20020X) grado extrusión, de 1.8 - 2.3 [g/10 min de índice de fluidez] (Fig. 4.2), apto para su uso y aplicación en artículos y componentes que estén en contacto con alimentos. Este material viene en una presentación de pequeños gránulos o “pellets” y listo para su conformado en el proceso de extrusión, cuyo costo en México es de aproximadamente 1.42 USD por kilogramo.



Figura 4.2 Polietileno (PE) de baja densidad.

En la siguiente tabla se mencionan las principales propiedades del polietileno empleado en este estudio.

Propiedades	Unidad	PE-BD
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0.92
Tensión en el límite de fluencia	N/mm <sup>2</sup>	8.0 a 10.0
Elongación en el límite de fluencia	%	20
Resistencia al impacto	mJ/mm <sup>2</sup>	n.r
Dureza con penetrador de bola	N/mm <sup>2</sup>	20
Módulo de elasticidad (tracción)	N/mm <sup>2</sup>	200
Coefficiente de dilatación térmica	1/K	20X10 <sup>-5</sup>
Temperatura de ablandamiento	°C	45
Absorción al agua	%	<0.1

Tabla 4.1 Principales propiedades del Polietileno PE-BD.

## ANHÍDRIDO MALEICO (MA).

Para lograr el anclaje mecánico entre la cascarilla de cebada y el polietileno, se utilizó un anhídrido maleico Resalloy 255 como agente de acoplamiento, proporcionado por la empresa RESIRENE, el Resalloy, es un aditivo que cuando se añade a la mezcla de materiales inmiscibles, tiene como fin promover la adherencia en materiales compuestos fibrosos, y la emulsificación de fases dispersas para mejorar las propiedades mecánicas, se recomienda una dosis del 5-10 % basada en el peso total de la mezcla a una temperatura máxima de 235°C.

Si se descartara el uso de un agente acoplante entre la mezcla de polietileno con cascarilla de cebada las fuerzas repulsivas de los dos materiales harían que la adherencia entre ellos fuera muy pobre e incluso sin adherencia (Fig. 4.3)

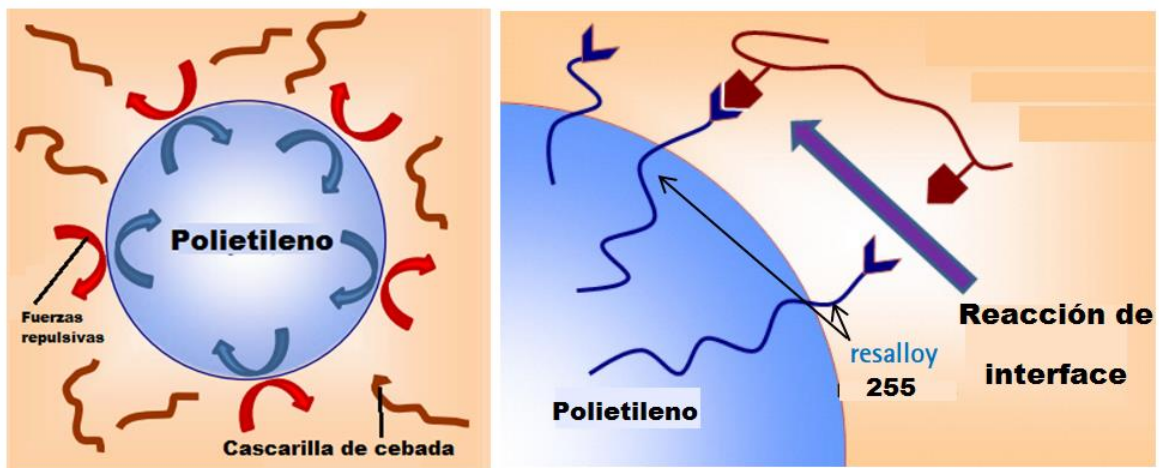


Figura 4.3 Representación de la mezcla de polietileno con cascarilla de cebada sin y con agente acoplante.

Para lograr la adhesión entre el polietileno y la cascarilla de cebada se necesita, que la cascarilla sea miscible con el polietileno, es así como el agente acoplante actúa como grupo reactivo para mejorar la adhesión entre los dos compuestos.

#### 4.1 DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE DENSIDAD DE LA CASCARILLA DE CEBADA

Para obtener la densidad del material compuesto fue necesario determinar la densidad de la cascarilla de cebada, dado a que en la literatura no fue posible encontrar un valor acerca de esta, se procedió a determinar la densidad de manera experimental, los materiales y el procedimiento fueron los siguientes:

- 1 bureta graduada 50ml
- Hexano (ALDRICH CHEMICAL COMPANY INC, Hexane, anhydrous, 95%)
- Cascarilla de cebada sin cribar



Figura 4.4 Materiales usados para determinar la densidad de la cascarilla de cebada.

Primeramente, se pesó y se colocó 1 gramo de cascarilla de cebada en 10 recipientes hechos de hoja de papel (Fig. 4.5), en la bureta graduada se añadió por cada experimento, 10 mililitros de hexano (con una densidad de  $0.6548 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ ) en la bureta graduada.



Figura 4.5 Proceso experimental de obtención de la densidad de la Cascarilla de Cebada.

Posteriormente se añadió un gramo de cascarilla a la bureta teniendo un aumento gradual de volumen en un rango de  $0.8$  a  $1.3 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  en los 10 experimentos, al finalizar se obtuvo un promedio de  $1.03 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  con una desviación estándar de  $0.14$ .

Partiendo de la ecuación:

$$\rho_{\text{cascarilla}} = \frac{m}{v} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Donde:

- $m$  = masa de la cascarilla
- $v$  = diferencia de volúmenes.



Se obtuvo la densidad de la cascarilla y posteriormente la densidad del compuesto. En la tabla 4.3 se presentan los valores experimentales cuyo promedio es de 0.98 [g /cm<sup>3</sup>] con una desviación estándar de 0.15.

Volumen Inicial [g/cm <sup>3</sup> ]	Volumen Final [g/cm <sup>3</sup> ]	dV [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho = m/v$ [g/cm <sup>3</sup> ]	m= 1[g]
28.8	27.7	1.1	0.90	
30.6	29.6	1	1	
30.4	29.2	1.2	0.83	
36.4	35.4	1	1	
31.4	30.5	0.9	1.11	
34.3	33.5	0.8	1.25	
36.2	34.9	1.3	0.76	
35.5	34.6	0.9	1.11	
40.2	39.1	1.1	0.90	
37.7	36.7	1	1	
		Promedio	0.98	

Tabla 4.2 Resultado de la obtención de la densidad de la cascarilla de cebada.

## 4.2 PROCESO DE CRIBADO.

El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas, o “finos”, y retiene las de tamaños superiores, o “rechazos”.

Para el proceso de cribado se utilizó una agitadora industrial marca RO-TAP de 6 tamices estandarizados bajo la norma ASTM E11-09, ISO 565 3310-1 (Fig. 4.6), esta norma tiene por objeto establecer las dimensiones nominales y las variaciones admisibles para la malla del tamiz en milímetros y en micrómetros.

Se obtuvo 2 diferentes cribados los cuales se les denominó cribado fino y cribado burdo, se partió de un tamaño de cascarilla de cebada de entre 4 a 14 [mm] de longitud. Cada tipo de cribado fue realizado con diferentes aperturas estandarizadas de mallas de precisión, cada malla contiene un diferente tejido específico por el cual pasa el material para obtener el tamaño de grano en micrómetros. Es así que tamaños menores a 500 micrómetros se le consideró cribado fino y a su vez tamaños superiores son cribados burdos, en la siguiente tabla se muestran los diferentes tamices y sus aperturas en micrómetros utilizados para el cribado.

# Criba	Apertura [ $\mu\text{m}$ ]
8	2380
10	2000
12	1680
14	1410
30	595
35	500
40	420
50	300
70	212
100	149
140	106
200	74
325	44
400	37

Tabla 4.3 Cribas utilizadas con sus respectivas aperturas.



Figura 4.6 **A)** Tamices de cribado burdo (#8, #10, #12, #14, #30, #35) **B)** Tamices de cribado fino (#40, #50, #70, #100, #140, #200, #325, #400) bajo la norma ASTM E11-09, ISO 565 3310-1, **C)** Agitadora industrial RO-TAP.

La cantidad total de cascarilla de cebada cribada fue de 4kg, Una vez concluido el cribado solo se utilizó el 85% del producto considerado, los resultados del proceso de cribado se muestran en la siguiente tabla. Las cribas marcadas en oscuro fueron las utilizadas para la obtención de la lámina plástica (Tabla 4.4), esto debido a que el dado para la obtención de lámina plana del laboratorio de procesamiento de plásticos tiene una ranura por donde el material tiende a salir de 300 micrómetros de apertura, aunado a esa consideración, el tamaño máximo de partículas de material que el dado permite trasladar y evitar así la ranura de salida se tape, forzosamente tendrán que ser menores al valor mencionado, es por eso que se emplearan los números de criba 70, 100, 140 y 200 pues son los únicos valores que no rebasan la condición previamente establecida.

✓ **Cribado Fino**

# Criba	Apertura [ $\mu\text{m}$ ]	Apertura [mm]	Retenido [g]
40	420	0.41	205.6
50	300	0.29	161.2
70	212	0.21	264.1
100	149	0.14	302.3
140	106	0.10	323.2
200	74	0.07	444.2
325	44	0.04	130.2
400	37	0.03	3.6

✓ **Cribado Burdo**

# Criba	Apertura [ $\mu\text{m}$ ]	Apertura [mm]	Retenido [g]
8	2380	2.37	4
10	2000	2.18	31.5
12	1680	1.67	69.8
14	1410	1.27	202.5
30	595	0.59	1260.4
35	500	0.5	82.3

Tabla 4.4 Resultados del proceso de cribado.

## RETENIDOS.

En los diferentes cribados realizados se observa que a medida que el material cruza por las diferentes cribas, las fibras de cascarilla de cebada van disminuyendo gradualmente su tamaño, hasta llegar a un tamaño de partículas diminuto. De las figuras 4.7 y 4.8 Se muestran los tamaños obtenidos en el retenido.



Figura 4.7 **A)** Muestras de cascarilla de cebada sin cribar, **B)** Malla # 8, **C)** Malla #10, **D)** Malla #12, **E)** Malla #14, **F)** Malla #30, **G)** Malla #35.

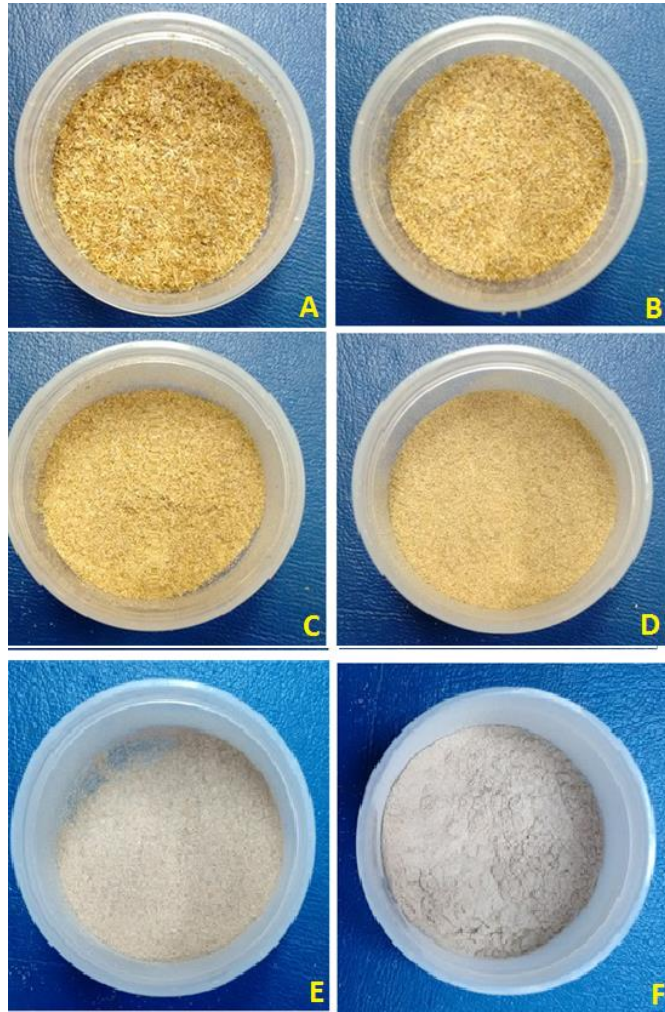


Figura 4.8 **A)** Malla #40, **B)** Malla #50, **C)** Malla #70, **D)** Malla #100, **E)** Malla #140, **F)** Malla #200.

### 4.3 MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO.

Se obtuvieron micrografías a través de un microscopio de la marca Philips SEM 505 de las muestras de cascarilla de cebada a procesar de las escogidas de acuerdo a la apertura del dado. Se observaron las muestras para conocer su morfología y tamaño de grano que se obtuvieron del cribado, con el propósito de obtener el tamaño de partícula adecuado para así incorporarlo al polietileno.

Dado que la cebada no es un material conductor, se hicieron ajustes de voltaje y exposición rápida al haz de electrones del microscopio, con el fin de obtener la mejor imagen. Con los disparos o tomas rápidas se evitó quemar la cascarilla de cebada, algunas partes de las micrografías se visualizan opacas debido a que hay planos separados, como medida a este problema se implementaron imágenes rápidas a bajos voltajes sacrificando un poco la resolución de la imagen.

A continuación, se presentan imágenes de la superficie de las fibras de la cascarilla de tres diferentes tamaños, para conocer su morfología, tamaño y orientación, destacando una forma no regular, una ligera curvatura y una microestructura porosa en la mayoría de las fibras de la cascarilla, además se observa que las fibras están ligeramente dispersas y no se encuentran bien distribuidas. Los retenidos seleccionados se muestran en la siguiente tabla.

<b>Muestra</b>	<b># Criba</b>
1	200
2	40
3	30

Tabla 4.5 Retenidos seleccionados para las micrografías.

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran las imágenes mencionadas, en cada figura se observan el tamaño de fibras; sin embargo, de la figura **A** hasta la figura **F**, la longitud es representativa y medible como tal (Tabla 4.6), de la figura **G** hasta la figura **J**, las fibras tienden a aglomerarse provocando visualizaciones individuales poco medibles.

# de criba	Longitud promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Diámetro promedio [ $\mu\text{m}$ ]	Espaciamiento entre fibras [ $\mu\text{m}$ ]
30	397.32	42.28	48.57
40	224.73	33.47	12.61
200	56.6	4.52	7.69

Tabla 4.6 Longitud, diámetros, espaciamentos de fibras promedios.

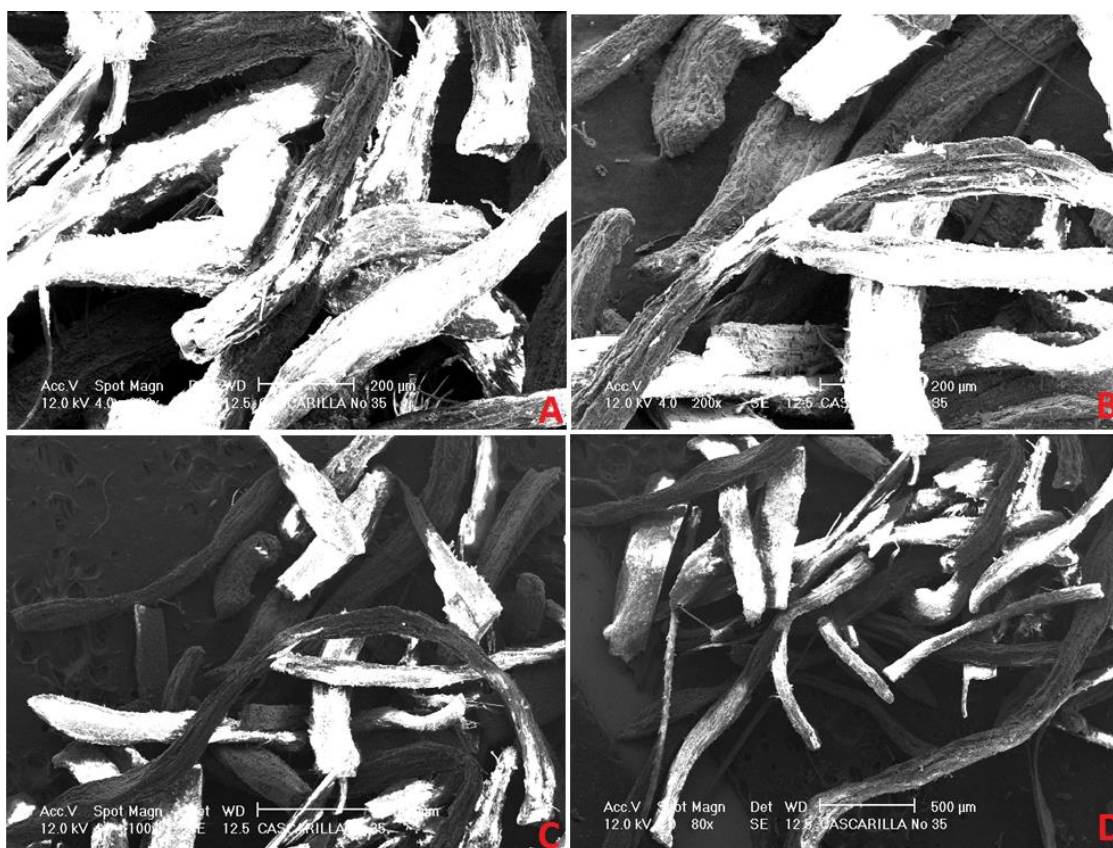


Figura 4.9 Micrografías SEM de la cascarilla de cebada **A)** Criba #30, al 200x de aumento. **B)** Criba #30, al 200x de aumento. **C)** Criba #30, al 100x de aumento. **D)** Criba #30, al 80x de aumento.



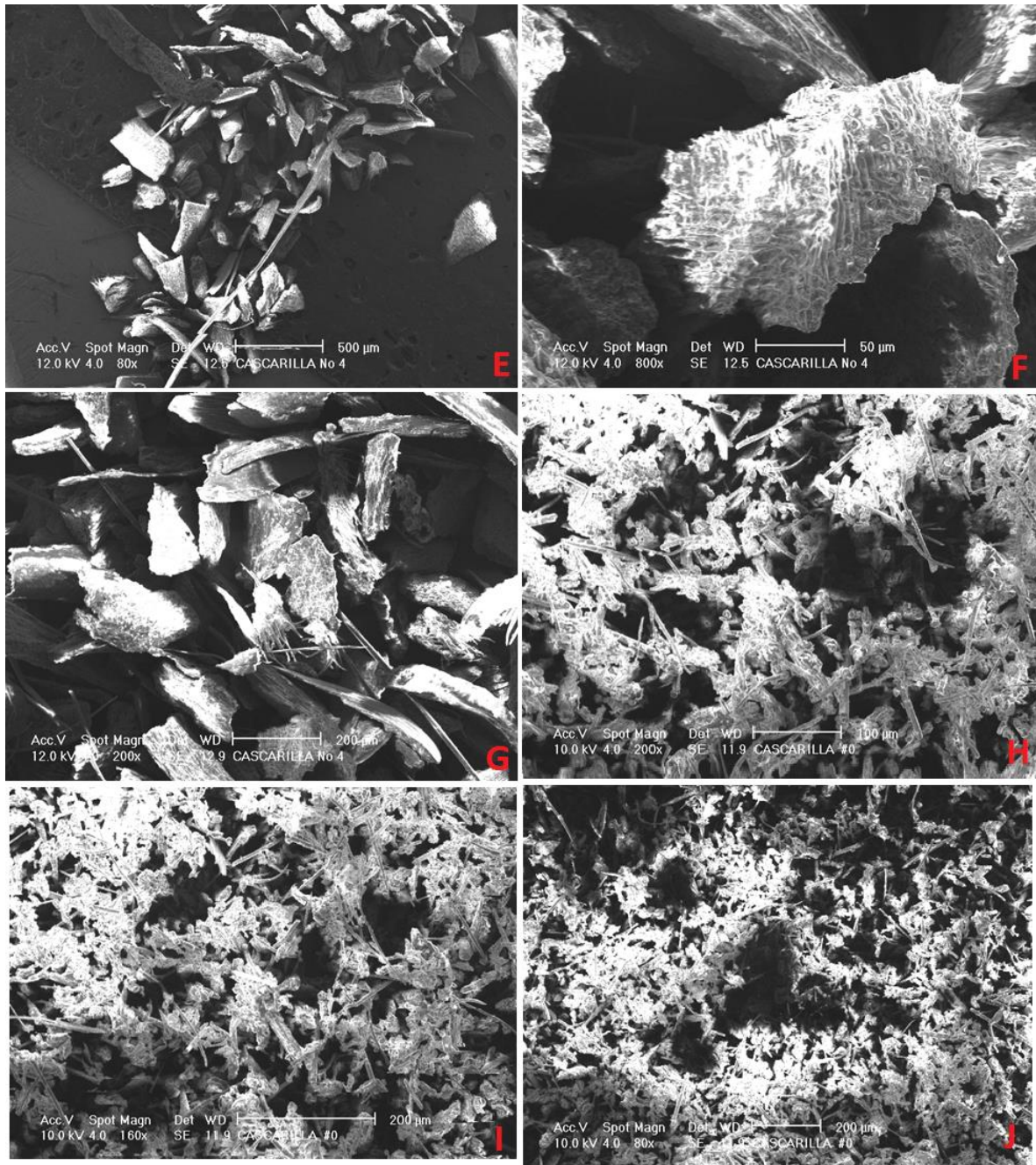


Figura 4.10 Micrografías SEM de la cascarilla de cebada **E)** Criba #40, al 80x de aumento. **F)** Criba #40, al 800x de aumento. **G)** Criba #40, al 200x de aumento. **H)** Criba #200, 200x de aumento. **I)** Criba #200 al 160x de aumento. **J)** Criba #200, al 80x de aumento.

En las imágenes anteriores se observa que:

- La cascarilla de cebada no lleva una orientación ni una longitud uniforme.
- Se nota una superficie porosa e irregular en la mayoría de las imágenes.
- Destaca una forma semi-curveada en las fibras, donde se visualiza diversas fibras disgregadas no continuas con poco espacio entre las mismas.
- Hay fibras aglomeradas en los tamaños de grano más pequeños.

#### 4.4 REGLA DE LAS MEZCLAS PARA MATERIALES COMPUESTOS.

Se recurrió a el uso de la regla de las mezclas para obtener las diferentes concentraciones de material (fibra y polietileno) de las diferentes muestras del material cribado anteriormente.

De acuerdo a la literatura las propiedades de un material compuesto se determinan por tres factores:

1. Los materiales usados como fases componentes en el compuesto
2. La forma geométrica de los componentes y la estructura resultante del sistema compuesto
3. La manera en la cual las fases interactúan entre si

Ciertas propiedades del material compuesto pueden calcularse por medio de la regla de las mezclas, la cual implica el cálculo promedio ponderado de las propiedades de los materiales constituyentes.

La densidad del material compuesto se calcula como:

$$\rho_c = \rho_{Polietileno} + \forall_{Polietileno} + \rho_{Cascarilla} + \forall_{Cascarilla}$$

Donde  $\forall_{Polietileno} + \forall_{Cascarilla} = 1$

La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso al incorporar refuerzos resistentes y rígido, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

Sin embargo, existe otro tipo de refuerzos que miden la resistencia al impacto si la matriz es frágil. Las proporciones en las cantidades del refuerzo y la matriz muchas veces se determinan por la aplicación buscada o generada.

Respecto a la matriz, ésta soporta las fibras y las mantiene en una posición adecuada; transfiere la carga a las fibras, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso y evita la prolongación de grietas a todo lo largo del compuesto. La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, del comportamiento químico y del uso a temperaturas elevadas del compuesto.

La determinación de las propiedades mecánicas de los compuestos a partir de sus constituyentes es comúnmente más laboriosa, la regla de las mezclas funciona en algunos casos.

Si la fibra funciona como material de refuerzo más resistente que la matriz, la regla de las mezclas para determinar la rigidez del material es:

$$E_{Compuesto} = E_{Polietileno} V_{Polietileno} + E_{Cascaquilla} V_{Cascaquilla}$$

Para otras circunstancias donde las fibras contribuyen poco a la rigidez global excepto por su efecto de relleno. La regla de las mezclas puede estimarse usando la siguiente ecuación.

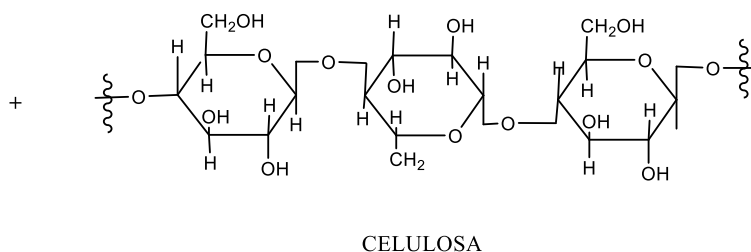
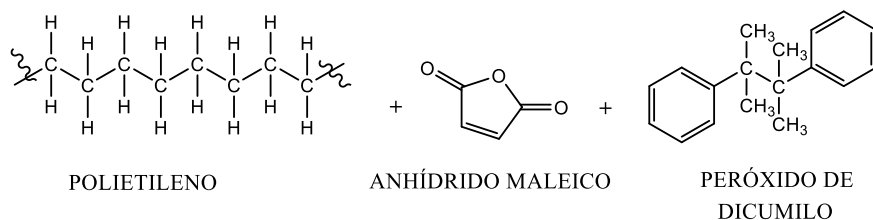
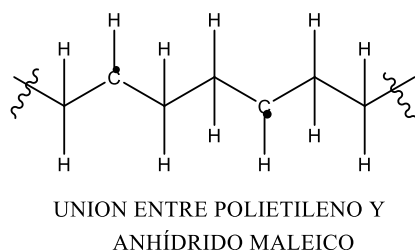
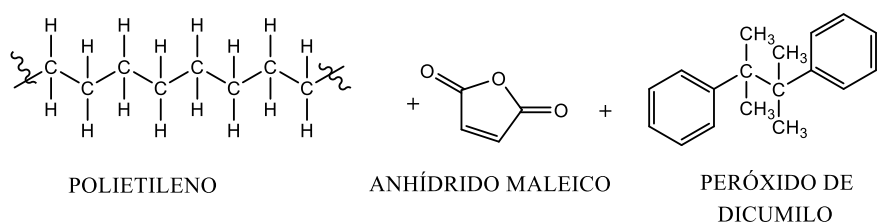
$$E_{Compuesto} = \frac{E_{Cascaquilla} E_{Polietileno}}{f_{Cascaquilla} E_{Polietileno} + f_{Polietileno} E_{Cascaquilla}}$$

Donde:

$E_{compuesto}$ ,  $E_{Cascaquilla}$  y  $E_{Polietileno}$  SON módulos de elasticidad del compuesto

$f_{Cascaquilla}$  y  $f_{Polietileno}$  son fracciones volumétricas de la matriz y de la fase de refuerzo, respectivamente.

Para obtener las diferentes fracciones en peso de los materiales a utilizar, la cascarilla de cebada, al tener en gran mayoría celulosa, hace que sea una fibra frágil: para su procesamiento es necesario utilizar un material que le sirva como refuerzo, a la concentración de cascarilla se añadirá una cantidad importante de polietileno que sirva como matriz, para lograr la adhesión entre ambos materiales. Debido a que el polietileno es hidrofóbico y la cascarilla hidrofílica, es necesario el uso de un reactivo llamado agente acoplante, que combinado con ambos materiales logra una adhesión de las interfaces y mejora las propiedades finales del material compuesto. El agente acoplante usado en este trabajo es un compuesto orgánico llamado anhídrido maleico, el cual es el mejor agente para este tipo de mezclas (fibra natural-polímero) usándolo en una sola cantidad al 5% de concentración, en la siguiente figura se muestra químicamente lo que pasara dentro del extrusor.



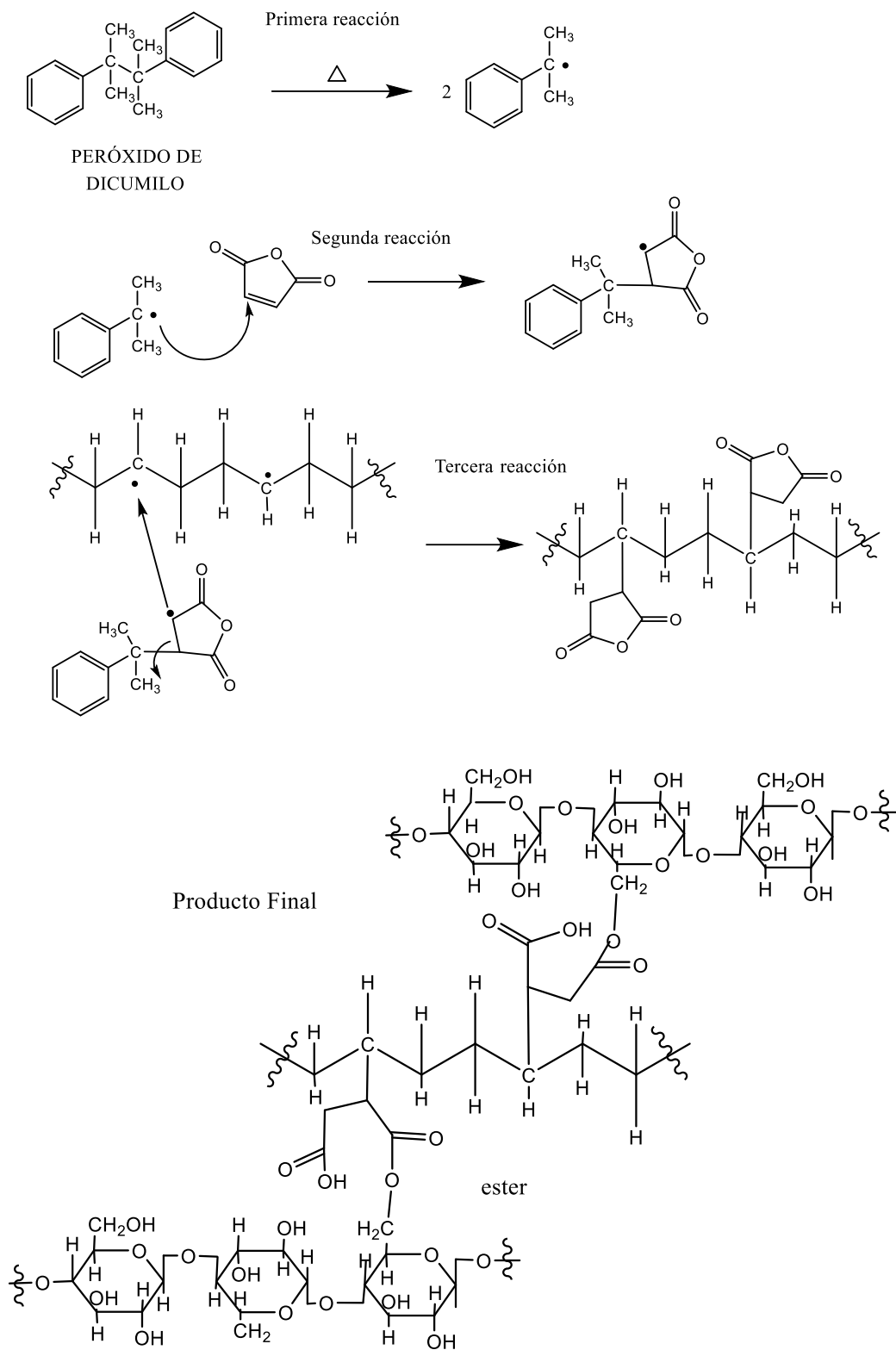


Figura 4.11 Representación química de la unión de los materiales utilizados para la elaboración del material compuesto.

En la siguiente tabla se observa los materiales utilizados para elaborar el material compuesto y los resultados del cálculo en fracción en peso para las diferentes concentraciones de material.

% Fibra	Fibra [%]	Fibra [g]	PE [%]	PE [g]
5	5.0	25.0	95.0	475.0
10	10.0	50.0	90.0	450.0
20	20.0	100	80.0	400.0
30	30.0	150	70.0	350.0
	$\Sigma$	338.9	$\Sigma$	1548.8

Tabla 4.7 Regla de las mezclas, Cascarilla de cebada + Polietileno calculado para 500 [g]

#### 4.5 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA).

Se hizo uso del análisis para conocer las principales zonas de descomposición de la cascarilla, se examinó el comportamiento termogravimétrico de la cascarilla de cebada en una velocidad de calentamiento 10°C/min en aire. Se obtuvo el registro continuo de pérdida de peso y temperatura. Los resultados del análisis termogravimétrico son presentados en la Figura 4.12.

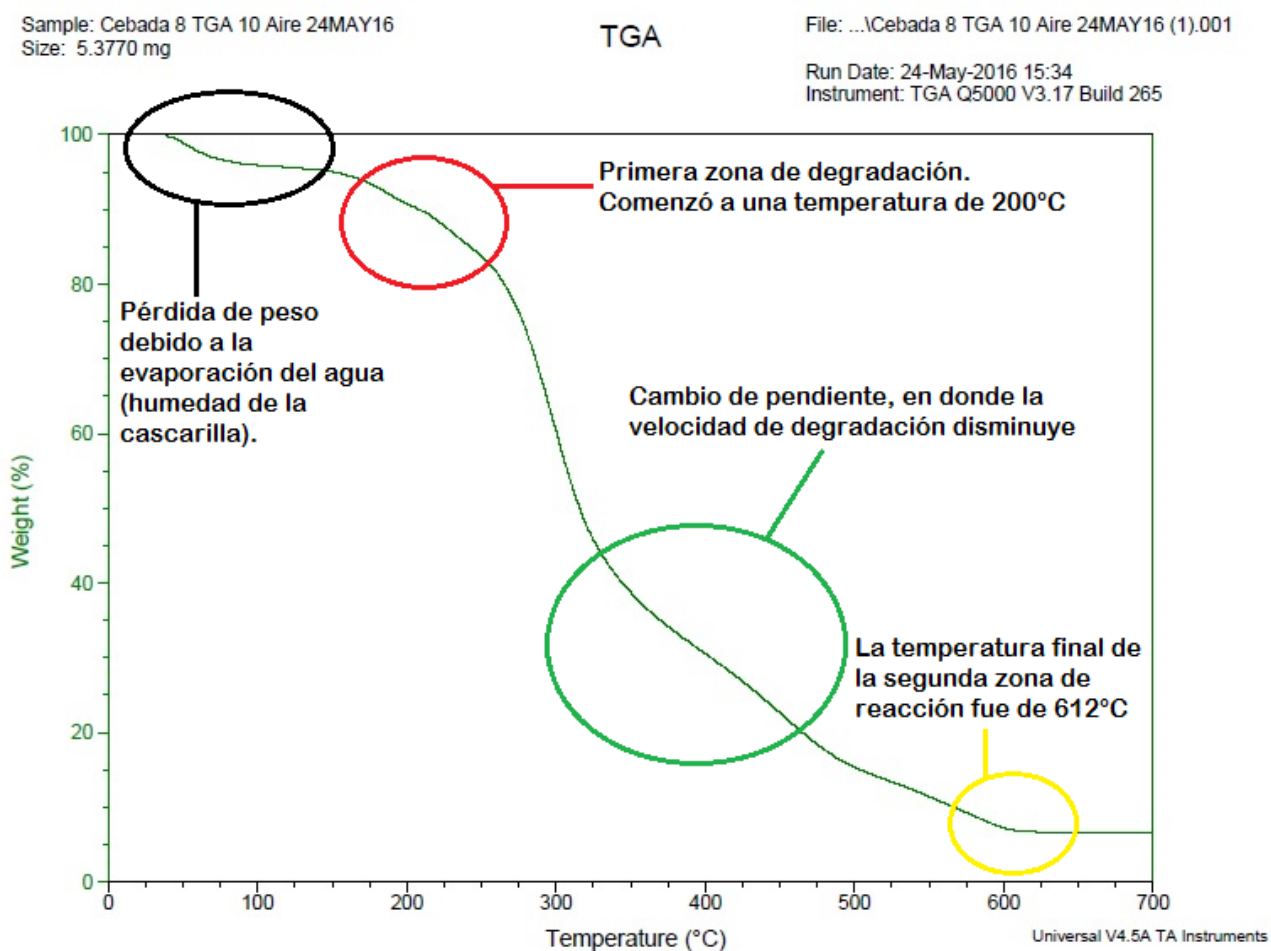


Figura 4.12 Análisis de las zonas de cambio de peso de la cascarilla de cebada con temperatura.

## TASA DE DEGRADACIÓN TÉRMICA

Durante la degradación térmica de las muestras de cascarilla de cebada se mostraron tres zonas de pirolisis, el presente análisis está restringido por una temperatura final máxima de 670°C, una vez que se alcanzó la temperatura de descomposición térmica se muestra una caída en el peso de las muestras hasta los 200°C, se denomina una zona de pirolisis activa, es decir; comienza la degradación inicial de la fibra; a partir de entonces, la pérdida de peso fue decreciendo gradualmente con respecto a la temperatura.

Una zona de pirolisis pasiva se observa a partir de los 612°C, es decir; la pérdida de peso de la fibra se comporta de una manera constante. estas zonas pirolíticas dependen totalmente de la duración e intensidad con las cuales se caliente la muestra dada.

Se sabe que los tres principales componentes de los materiales lingnocelulósicos (hemicelulosa celulosa y lignina) son químicamente reactivos y se descomponen en un rango de temperaturas de 150 - 500°C, sin embargo, de todos los cereales, la cebada es el cereal que contiene una proporción más baja de estos tres componentes con lo cual su temperatura inicial de degradación es más baja [21].



#### 4.6 PROCESO DE OBTENCION DE LÁMINAS PLÁSTICAS DE POLIETILENO CON CASCARILLA DE CEBADA.

Para la obtención de las láminas plásticas (cebada-polietileno) se utilizó una máquina de extrusión: es una máquina analógica marca “NIETO”, con una capacidad de procesamiento promedio de 30 [kg/hr]. Esta máquina opera con un motor de corriente alterna trifásica controlada por un variador de frecuencia, con el cual es posible modificar las velocidades de giro del husillo dentro del cañón (Fig. 4.13).

El husillo con que cuenta dicha máquina, es estándar diseñado específicamente para polietileno, con una longitud de 104.3 [cm] de longitud y un diámetro de 4.97 [cm], con un ángulo de 17° de inclinación y una relación de longitud/diámetro de 21. Además, cuenta con una disminución de profundidad de canal que va desde los 0.78 [cm] en la zona de alimentación hasta 0.3 [cm] en la zona de dosificación. Estas dimensiones en la profundidad del canal tienen como resultado una relación de compresión de 2.6 a lo largo de toda la geometría del husillo [22].



Figura 4.13 Máquina de extrusión del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos.

Las condiciones de procesamiento del material compuesto fueron modificadas con respecto al procesamiento del polietileno, dicho compuesto tiene un límite de temperatura de 200°C el cual no se debe de rebasar porque la cascarilla comienza a degradarse, tomando en cuenta esa consideración como punto de partida, se realizaron los ajustes necesarios en el perfil de temperaturas y velocidades de giro del husillo, para evitar la degradación del material y generar un perfil plástico de polietileno compuesto.

#### **4.7 ENFRIAMIENTO DE LÁMINA PLÁSTICA.**

Para la obtención del perfil final del laminado, aunado a que no se cuenta en el laboratorio con un sistema de rodillos fríos para la salida del dado, la lámina que fue esforzada mediante un sistema de enfriamiento (según patente en trámite número: **MX/a/2016/015024**) que es un sistema de aire que consiste en dos corrientes reguladas obtenidas por medio de dos tubos perforados conectados mediante válvulas a un compresor, los tubos se localizan uno arriba y otro debajo de la ranura de salida del dado. Las corrientes de aire verticales generadas por este sistema cumplen con dos propósitos; primordialmente es para disminuir la temperatura del perfil fundido que sale del dado para solidificarlo y posteriormente para que la lámina sea manipulable y dirigirla hacia el sistema de enrollamiento, a una velocidad constante.



Figura 4.14 Dado de placas planas para la obtención de la lámina en estudio.

Configuración según solicitud de patente **MX/a/2016/015024**.

#### 4.8 OBTENCIÓN DE LA LÁMINA PLÁSTICA COMPUESTA.

Tomando en consideración todo lo mencionado, se procedió a obtener el perfil plástico. La máquina de extrusión fue parametrizada a las condiciones de procesamiento definidas anteriormente, el polietileno fue integrado en la tolva del extrusor en forma de gránulos, a su vez fue reblandecido a través de su paso por el cañón de extrusión y trasladado hacia el dado por el giro del husillo.

Primeramente, se agregó una cantidad de 4[kg] de polietileno virgen, que sirvió como material tanto de purga como para obtener el mejor perfil de temperaturas y velocidades de giro del husillo para el procesamiento sin rastros de residuos sólidos y de manera uniforme.

Las temperaturas usadas para extrudir este perfil se muestran en la siguiente tabla, junto con una comparativa de las temperaturas recomendadas por la hoja de datos técnicos del fabricante.

Zona	Temperatura [°C]
Alimentación	90
Compresión	170
Dosificación	180
Dado	190

### Hoja de Datos Técnicos



Grupo: Polimeros  
Jicarándas # 100 Nivel A-2  
Fraccionamiento Rancho Alegre I  
99758 Coahuila de Zaragoza, Vir.  
Tel. (01-621) 2-11-12-00 Fax 2-11-12-94

#### Polietileno de Baja Densidad Grado 20020X

Condiciones\*: Temperatura: 160 - 190°C. Dado: 170-190°C,

Tabla 4.8 Datos comparativos entre los datos técnicos del fabricante de PE y los utilizados en la experimentación.

Como ya se mencionó, durante la salida del perfil se encuentran las corrientes de aire del sistema de enfriamiento implementado (Fig. 4.15). Esto hace que la temperatura del polímero fundido a la salida del extrusor disminuya, para poder obtener un espesor uniforme y manipularlo fácilmente hasta llevarlo a un rodillo donde la lámina obtenida se tense y se enrolla.



Figura 4.15 Montaje final dado de extrusión de láminas planas.

Bajo las condiciones establecidas anteriormente se produjo la primera lamina de material compuesto de malla con 5% de cascarilla de cebada de criba 70 con una velocidad de tiro de 11.5 [rpm], el ancho promedio de la lámina fue de 19.86 [cm] con un espesor promedio de 750 micrómetros, y una temperatura de masa fundida de 197°C (Figura 4.16).



Figura 4.16 Salida de la lámina del dado de extrusión.

Una vez obtenido el material compuesto con 5% de cascarilla de cebada, se procedió de la misma manera con los porcentajes de 10, 20 y 30 % de cascarilla y el resto de polietileno virgen. Después de la obtención de cada muestra de material, se realizaba una purga al extrusor para evitar que se acumularan residuos de la muestra anterior. Este material de purga fue aproximadamente de 2kg de polietileno virgen por muestra realizada. Una vez obtenidas las láminas de material compuesto, se procedió a medir sus anchos y en la siguiente tabla se observan los anchos y espesores de las láminas de las diferentes muestras realizadas.

Muestra	Espesor [ $\mu\text{m}$ ]	ancho [cm]
PE virgen	800	18.51
CRIBA #70, 95%PE, 5%CC	750	19.86
CRIBA #70, 90%PE, 10%CC	740	20.68
CRIBA #70, 80%PE, 20%CC	840	21.72
CRIBA #70, 70%PE, 30%CC	960	21.67
CRIBA #100, 95%PE, 5%CC	890	20.86
CRIBA #100, 90%PE, 10%CC	1190	20.27
CRIBA #100, 80%PE, 20%CC	1100	22.53
CRIBA #100, 70%PE, 30%CC	1310	20.87
CRIBA #140, 95%PE, 5%CC	970	21.94
CRIBA #140, 90%PE, 10%CC	960	22.84
CRIBA #140, 80%PE, 20%CC	1210	22.96
CRIBA #140, 70%PE, 30%CC	1200	22.72
CRIBA #200, 95%PE, 5%CC	1210	23.52
CRIBA #200, 90%PE, 10%CC	1130	23.08
CRIBA #200, 80%PE, 20%CC	1170	23.46
CRIBA #200, 70%PE, 30%CC	1220	23.91

Tabla 4.9 Anchos y espesores de las diferentes muestras de láminas obtenidas.

## 4.9 ENSAYO DE TENSIÓN DE LÁMINA DE POLIETILENO (PE) CON CASCARILLA DE CEBADA.

### PREPARACIÓN DE MUESTRAS

De las diferentes láminas obtenidas se obtuvieron muestras para ensayo de tensión, bajo la norma ASTM D1708-06a [23], la cual es el método de prueba estándar para las propiedades de tensión mediante el uso de probetas de tracción. Las dimensiones de la probeta estándar se presentan en la siguiente figura.

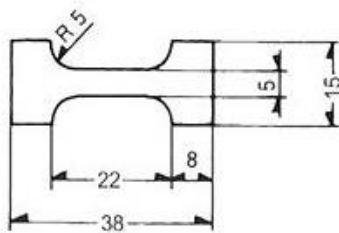


Figura 4.17 Medida estándar de la probeta de ensayos de tensión.

El método para cortar las probetas fue por medio de una prensa hidráulica y un suaje para corte, de acuerdo a la norma ASTM D1708-06a (Figura 4.18).



Figura 4.18 Proceso de corte de probetas de tensión.

A las 88 probetas preparadas se les realizó ensayos de tensión, con control de desplazamiento, en una maquina universal modelo R5500 para pruebas mecánicas de la marca INSTRON®.

La norma *ASTM D1708-06a* especifica que el número de probetas por muestra debe ser de 5, de tal manera que el número total de ensayos realizados fue de 85, más tres ensayos adicionales, uno previo para parametrizar la máquina y los otros dos restantes antes del punto de fractura de la probeta, todos los ensayos se realizaron a una velocidad de 10[mm/min] (Figura 4.19).

El primer ensayo realizado fue de la muestra de película de polietileno virgen. Los valores de este ensayo fueron tomados como parámetros de referencia para las siguientes probetas de material compuesto, para formular una comparación entre la lámina simple y las láminas compuestas. Previo a cada ensayo se tomaban tanto la temperatura ambiente (22-23°C) como la humedad (61-62 %) para así evitar rebasar los valores máximos que permite la norma.



Figura 4.19 Ensayos de tensión a las diferentes probetas

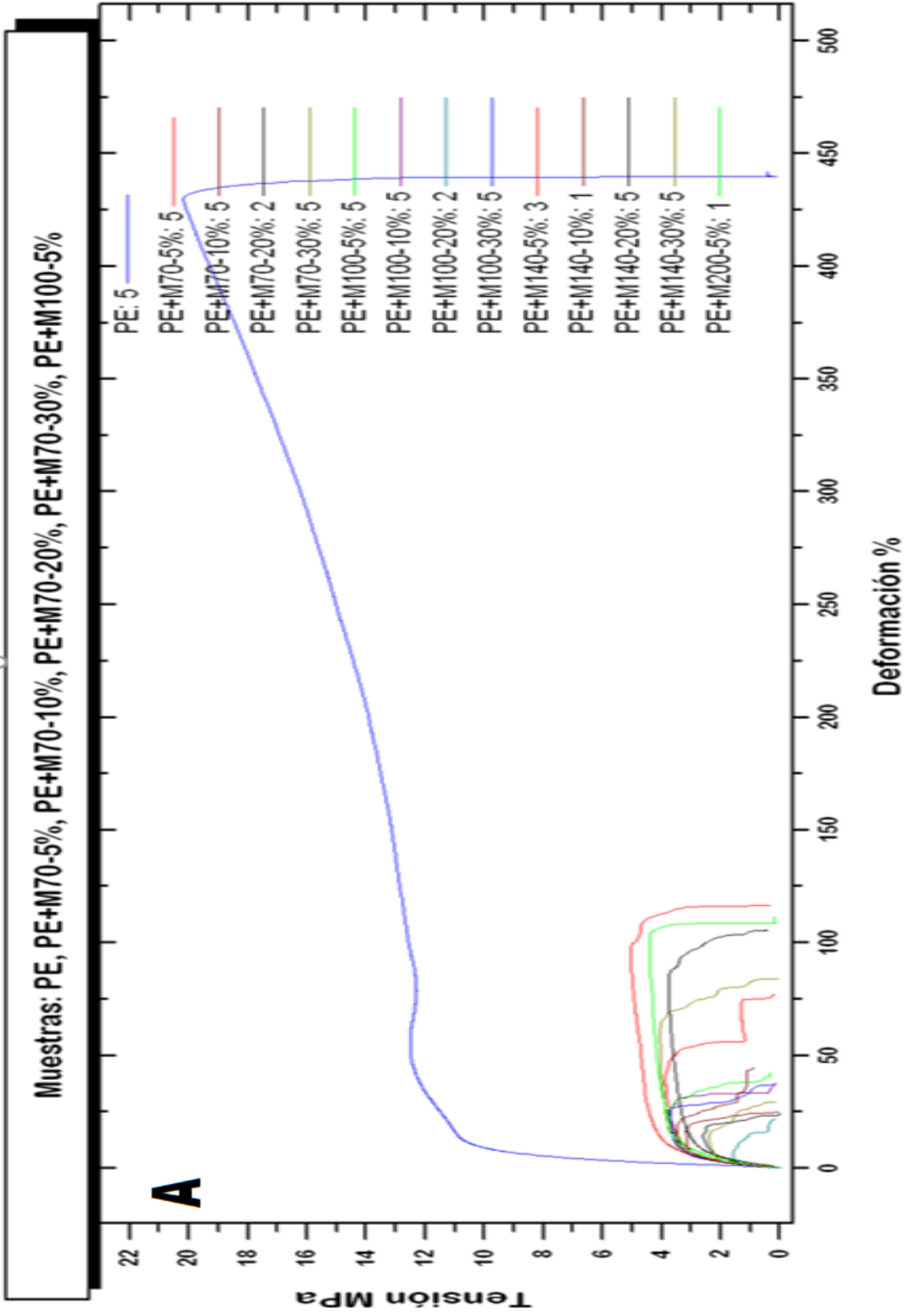
## **RESULTADOS.**

- Fue permisible establecer las condiciones de procesamiento a partir de un desecho agroindustrial para obtener un perfil plástico uniforme, por medio de un proceso de extrusión, obteniendo así diferentes muestras de láminas plásticas compuestas.
- La cascarilla de cebada fue analizada mediante termogravimetría (TGA), en el cual se obtuvieron las etapas de pérdida de peso y descomposición en función de la temperatura. La descomposición de la cascarilla de cebada ocurrió de 200 a 612 [°C]. En el TGA se observa como su temperatura de inicio de degradación fue de 200°C, con este dato se aseguró trabajar la lámina en el extrusor por debajo de esa temperatura.
- Se realizó el estudio por microscopía electrónica y se observó, que la superficie de la cascarilla es irregular, destacando fibras dispersas no continuas ligeramente curvadas y aglomeradas en tamaños de cribas más pequeñas, con un rango de longitudes de fibras que van desde los 56 [µm] a los 400 [µm], un rango de diámetros de fibras de 4 [µm] a 43 [µm], un rango de espaciamiento entre fibras de 7 [µm] a 49 [µm], todo esto bajo un rango de aumentos en las visualizaciones que van de los 50x a los 800x.
- El material compuesto de cascarilla de cebada con polietileno fue extrudido para obtener un perfil de procesamiento adecuado para la obtención de la lámina plástica compuesta, semiflexible, no transparente y rugosa, con variaciones de espesores promedio de 740 a 1220 [µm], a una velocidad constante de 11.5 [rpm].
- En cuanto a la obtención de la lámina plástica, se observó en algunas secciones, que había acumulación de fibra, esto debido a que no se cuenta con un sistema que



mezcle continuamente el material mientras pasa por el cañón de extrusión, debido a esto no se tiene una distribución uniforme en el material.

- A su vez se logró identificar una característica de las láminas ya extrudidas: esta característica es que cuando el tamaño de fibra es más fino, la lámina se comporta alrededor de un 50% más frágil, comparado cuando el tamaño de fibra es más grande y tiene 85% menos de fibra, la lámina tiene alrededor de un 70% más de resistencia a la fractura.
- En la figura 4.20 se observan los resultados de los ensayos de tracción realizados a través de un diagrama esfuerzo – deformación. Como puede observarse, a medida que se aumenta la cantidad de polietileno el material se hacía más rígido y menos elongable, con resistencia máxima que oscila entre los 245 MPa. De todas las láminas obtenidas la que obtuvo uno de los mejores resultados en apariencia, fue la lámina de criba 140 al 5% de cascarilla de cebada, la figura 4.21 muestra el aspecto físico de la lámina.
- En la sección de ANEXOS se muestra el ensayo de tracción realizado de la criba 140 al 5% y la hoja de datos técnicos de la celulosa moldeada, en las hojas se puede comparar las propiedades mecánicas de ambos materiales destacando la lámina compuesta por: la temperatura máxima de procesamiento del material con 200°C, mientras que la temperatura de la celulosa moldeada es de 130°C, otro aspecto importante a favor de la lámina plástica es el precio de venta, el precio de la lámina plástica obtenida oscila entre 20-35 MXN por kilogramo de material procesado esto en un proceso no continuo de obtención de material, mientras que el precio de la celulosa moldeada es de 14.5-29.6 MXN por kilogramo de material procesado en un proceso continuo de 24 horas de obtención de material, esto da una ventaja a la lámina compuesta puesto que si fuera un proceso de obtención de lámina continuo el precio bajaría alrededor de un 50% en su precio final.



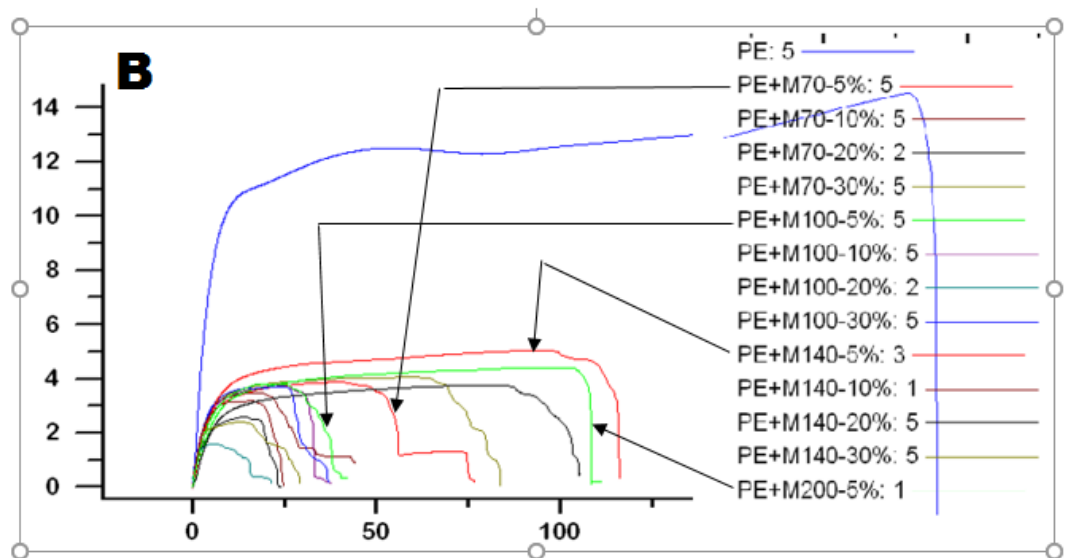


Figura 4.20 **A)** Comparativa de las muestras de material compuesto de los diferentes ensayos realizados VS la probeta de polietileno virgen. **B)** las flechas señalan las muestras al 5% de cascarilla de cebada en el ensayo tensión – deformación.



Figura 4.21 Lamina plástica Criba #140 al 5% de cascarilla de cebada, la mejor muestra de película obtenida en apariencia.

## **CONCLUSIONES.**

- Fue posible crear un material semi rígido que sirva para embalajes donde el polietileno fue un material de unión entre la cascarilla de cebada, además de proporcionarle características plastificantes y de moldeabilidad a la lámina plástica compuesta con tan solo 5% de cascarilla de cebada, la elongación del polietileno puede reducirse al agregar materiales orgánicos como la cascarilla de cebada con el propósito de inhibir la capacidad de deformación que por naturaleza presenta el polietileno.
- Mediante un proceso experimental por densitometría, se obtuvo un valor promedio de la densidad de la cascarilla de cebada el cual fue de 0.98 [g /cm<sup>3</sup>], esto debido a que en la literatura no fue posible encontrar un valor exacto acerca de la misma.
- De acuerdo al análisis termogravimétrico (TGA), se determinó la temperatura máxima de procesamiento para el compuesto de polietileno con cascarilla de cebada la cual fue de 200°C, ya que era la temperatura de degradación inicial de la cascarilla de cebada.
- Mediante un proceso de tamizado se clasificó las partículas de cascarilla de cebada, para posteriormente mediante el uso de microscopía electrónica de barrido encontrar que la cascarilla de cebada está formada por partículas con una forma semi-curvadas y con una superficie porosa e irregular, la cascarilla posee partículas disgregadas no continuas con poco espacio entre las mismas y un rango de longitud promedio que va de los 56 a los 400 [μm], un diámetro promedio con un rango de los 4 a los 45 [μm], un espaciado entre las partículas que va de los 7 a los 49 [μm], destacando que en tamaños de grano más pequeños hay fibras aglomeradas.

## ***TRABAJOS A FUTURO.***

- A futuro, es necesario realizar nuevos experimentos con porcentajes de 1-5% para determinar que la resistencia no se altere como lo visto en este trabajo
- Es posible tomar este proyecto como un avance inicial en el desarrollo de materiales de desecho agroindustrial a base de celulosa como material de empaque, esto permite suponer que a largo plazo este material pueda competir con los productos de celulosa moldeada que existen actualmente en el mercado, y orientar los siguientes avances a mejorar tanto la calidad de este material como los parámetros de procesamiento, además de la incursión de aditivos para que el material cumpla con todos los requerimientos de un empaque con funcionalidades específicas.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

- [1] E. Z. Elke Arendt, «Cereal Grains for the Food and Beverage Industries,» de *Publishing limited*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 245-260.
- [2] «Tierra Fertil,» 2015 . [En línea]. Available: <http://www.tierrafertil.com.mx/afectados-80-de-cultivos-de-trigo-y-cebada-en-tlaxcala/>. [Último acceso: 9 Julio 2016].
- [3] «Materfad,» 2010. [En línea]. Available: <http://es.materfad.com/material/1583/fibra-moldeada-hartmann>. [Último acceso: 13 Agosto 2016].
- [4] ASTM D6400-04, Standard Specification for Compostable Plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
- [5] I. & B. Kyrikou, «Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review,» de *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, 2007, pp. 125-138.
- [6] «mother nature network,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.mnn.com/>. [Último acceso: 7 septiembre 2016].
- [7] L. T. S. P. M. Kolybaba, de *Biodegradable films and composite coatings past present and future*, canada, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, 2003, pp. 144-149.
- [8] L. J. a. J. Zhang, «Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics,» PDL, 2012, pp. 326-330.
- [9] «Guia Practica del Bioplastico,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.plastico.com/temas/Bioplasticos>. [Último acceso: diciembre 2015].
- [10] E. Rudnik, de *Compostable Polymer Materials*, Oxford: Elsevier Ltd, 2007, pp. 105-109.
- [11] K. Sudesh, de *Polyhydroxyalkanoates from Palm Oil: Biodegradable Plastics*, Springer, 2013, pp. 88-91.
- [12] «Compostando ciencia lab,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.compostandociencia.com/2014/07/articulos-cientificos-revisados-en-compostando-ciencia/>. [Último acceso: enero 2016].

- [13] «Superior Bolsas de aseo,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.superior.cl/bio.html>. [Último acceso: 20 marzo 2016].
- [14] C. Gerencia de Mercadeo de Poliolefinas Internacionales, «Fundamentos de los plasticos Biodegradables,» *Polinter*, vol. 1, pp. 5-8, 2011.
- [15] R. M. Christensen, de *Mechanics of Composite Materials*, Nueva York , Dover Publications, 2005, pp. 25-44.
- [16] F. Stupenengo, «Materiales compuestos,» de *Materiales y materias primas*, Argentina, Instituto Nacional de Educación Tecnológica., 2011, pp. 5-23.
- [17] J. William D. Callister, de *Introduccion a la ciencia e ingeniería de los materiales*, Barcelona, Reverté, 2007, pp. 583-590.
- [18] M. G. A. Beltrán Rico, «Tecnología de Polímeros,» España , Publicaciones Universidad de Alicante, 2012, pp. 127-133.
- [19] D. Rosato, «Extruding Plastics,» de *A practical processing handbook*, Kluwer, 1998, pp. 288-316.
- [20] C. H. V. C. Rauwendaal, de *Understanding Extrusion*, Hanser, 2010, pp. 256-268.
- [21] S. a. DeGroot, de *Pyrolytic Reactions and Products of Biomass*, Springer, 1976, p. 183.
- [22] A. V. Perez, «Análisis e implementación del proceso de fabricación para una película biodegradable empleada en empaques multicapa.,» de *Tesis Maestria UNAM*, Ciudad de Mexico, 2015.
- [23] ASTM D1708-06a, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics by Use of Microtensile Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- [24] M. B. N. M. H. Q. B. Belhadj, «Effect of substitution of wood shavings by barley straws,» *Construction and Building Materials*, vol. 1, p. 247, 2014.
- [25] P. C. K. H. A.A. Boateng, «Microstructure development of chars derived from,» *el silver*, p. 735, 2006.
- [26] A. Altan, «Effects of pretreatments and moisture content on microstructure and,» *Food Research International*, p. 126, 2013.

# ANEXOS.

## FICHA TÉCNICA DEL POLIETILENO.



### Hoja técnica de especificación

## Polietileno baja densidad grado PX-20020X

Identificación: PPQ-042

Parámetro	Unidad	Método de prueba	Valor
Índice de fluidez	g/10 min.	ASTM D-1238	1.8 – 2.3
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D-1505 ALKATHENE-25-1968	0.9195 – 0.9220

Propiedades			Valor Típico
Propiedades de la película (50 micras)			
Módulo de elasticidad en Tensión (Secante al 2%)	MPa	ASTM D-882	167/156 (1)
Resistencia a la Tensión	MPa	ASTM D-882	17.8/15.2 (1)
Resistencia a la Punción	Kg-mm	ASTM D-1306	4.4
Elongación (ruptura)	%	ASTM D-882	460/500 (1)
Resistencia al Impacto por Dardo (método Á)	g	ASTM D-1709	104.5
Resistencia al rasgado	N/mm	ASTM D-1004	65.6/90.5 (1)
Claridad	%	ASTM D-1003	98.3
Nebulosidad (en película de 0.0015 pulgadas de espesor)	%	ASTM D-1003	5
Brillo (ángulo de incidencia 60°)	--	ASTM D-2457	104
Temperatura de fusión	°C	ASTM D-3418	112

Cumplimiento FDA y EEC: Este material cumple con los requerimientos de la Food and Drug Administration de los Estados Unidos de América, Título 21.CFR177.1520 y con las Directivas Europeas 2002/72/EC, 85/572/EEC y 97/48/EC que permitan el uso y aplicación del producto en "Artículos y Componentes de Artículos que estén en contacto con alimentos".

(1) MD/TD (Dirección Máquina / Dirección Transversal)

Los valores típicos reportados son obtenidos en laboratorio bajo los métodos de prueba descritos, son una guía y no constituyen una garantía implícita o explícita para la aplicación de este producto.



**FICHA TÉCNICA ANHÍDRIDO MALEICO.**



**RESALLOY 255**

**ANHYDRIDE MODIFIED POLYPROPYLENE**

**FEATURES:**

A compatibilizer used to bond immiscible polymers used for toughened, filled and blended compounds.

- Primary use is as a coupling agent in compounding and as an adhesion promoter in a variety of other applications.
- Promotes the emulsification of dispersed phases to enhance mechanical properties.
- Eases processing in compounding operations.

**APPLICATIONS:**

Coupling agent for fiberglass and other mineral fillers.

**PROPERTIES:**

PHYSICAL	Unit	Value	Unit	Value	TEST METHOD
	g/cm <sup>3</sup>	1.05	g/cm <sup>3</sup>		
	g/10 ml	0.1	g/10 ml		
THERMAL					
	°C	60			
	°C	170			

Typical values represent average laboratory values and are intended as guides only, not as specification limits.  
Properties designated in this standard have been determined in accordance with the current issue of the specified testing methods

**CONDITIONS:**

Recommended Dose  
Recommended Maximum Temperature

5-10 % based on the total weight of the blend  
235 °C (455 °F)

→ 5% de la mezcla

**ADDITIONAL INFORMATION:**

RESALLOY 255 does not have any USA-FDA clearance for direct or indirect contact with food materials.

**WARNING:**

Combustion of this material may cause hazardous fumes and gases, that may be dangerous to one's health, especially in closed places. It should be noted that excessive heating or long residence times may cause degradation or yellowing.

**NOTE:**

The data contained herein is provided for information purposes only. By providing such information, Resirene, S.A. de C.V. makes no guarantee and does not assume any liability with respect to the accuracy or completeness of such information and the results obtained with this product in any specific instance; and hereby expressly disclaims all implied warranties of merchantability or fitness to a particular purpose. Nothing contained herein shall be construed as a license to use the products of Resirene, S.A. de C.V. in any manner that would infringe any patent.

Resirene S.A. de C.V.  
Km 15.5 carret. Fed. Puebla-Tlaxcala  
90780 Xicohtzinco, Tlaxcala, MEX  
MEX toll free 01 800 RESINAS  
USA toll free 1 866 372 3470

visit us at [www.resirene.com](http://www.resirene.com)



RESALLOY 255 Product Data Sheet: Master 2919 | Last Review: August 2012 | Printout: DEC 2013 | Version 4

\* Name and logo are trademarks of Resirene S.A. de C.V.

## Material Safety Data Sheet

MODIFIED POLYPROPYLENE GRADES



### 1. CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

Product Name/Logo:	RESALLOY® 255	
Chemical Name:	Propylene- Maleic Anhydride Copolymer	
Use of the substance/preparation:	Polymer Compatibilizer	
Supplier:	Resirene, S.A. de C.V. Km. 15.5 Carretera Federal Puebla-Tlaxcala Xicohtzinco, Tlaxcala 90780, Mexico Tel. +52 (222) 223 3101 Fax. +52 (222) 281 0130 e-mail: <a href="mailto:safety@resirene.com">safety@resirene.com</a>	
Emergency Phone Number:	Tel. +52 (222) 223 3100 (24 hrs)	

### 2. COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS

Resirene's RESALLOY® grades are proprietary products. Their composition is trade secret information of Resirene S.A de C.V. These products are not identified by CAS number. These products do not meet definition of hazardous.

### 3. HAZARDS IDENTIFICATION

Classification: Not classified

Physical/Chemical hazards Toxic fumes are released in fire situations  
Danger of burns while handling the hot product.

### 4. FIRST AID MEASURES

Inhalation:	Dust may cause irritation to upper respiratory tract (nose and throat). After inhalation of decomposition products, remove the affected person to a source of fresh air and keep calm. Provide medical aid.
Ingestion:	Rinse mouth and then drink plenty of water. Remove dentures if any. If difficulties occur: Seek medical attention. If swallowed, seek medical attention. Do not induce vomiting unless directed to do so by medical personnel. Single dose oral toxicity is considered to be extremely low. No hazards anticipated from swallowing small amounts incidental to normal handling operations.

**General information**

**Designation**

Cardboard

**Typical uses**

Packaging, electrical and thermal

**Composition overview**

**Compositional summary**

Cellulose

Form	Other
Material family	Natural
Base material	Cellulose
Renewable content	85 %

**Composition detail (polymers and natural materials)**

Natural materia	100 %
-----------------	-------

**Price**

Price	0,687 - 1,37	EUR/kg
-------	--------------	--------

**Physical properties**

Density	480 - 860	kg/m <sup>3</sup>
---------	-----------	-------------------

**Mechanical properties**

Young's modulus	3 - 8,9	GPa
Yield strength (elastic limit)	15 - 34	MPa
Tensile strength	23 - 51	MPa
Elongation	0,75 - 2	% strain
Compressive strength	41 - 55	MPa
Flexural modulus	3 - 8,9	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	* 25 - 45	MPa
Shear modulus	* 1 - 2	GPa
Bulk modulus	* 2 - 4	GPa
Poisson's ratio	* 0,3 - 0,45	
Shape factor	5,2	
Hardness - Vickers	* 4 - 9	HV
Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles	* 13 - 24	MPa
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0,05 - 0,2	

**Impact & fracture properties**

Fracture toughness	* 6 - 10	MPa.m <sup>0.5</sup>
--------------------	----------	----------------------

**Thermal properties**

Glass temperature	47 - 67	°C
Maximum service temperature	77 - 130	°C
Minimum service temperature	-273	°C
Thermal conductivity	0,06 - 0,17	W/m.°C

Values marked \* are estimates

Specific heat capacity	1,34e3	-	1,4e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	5	-	20	µstrain/°C
<b>Electrical properties</b>				
Electrical resistivity	1e13	-	1e15	µhm.cm
Dielectric constant (relative permittivity)	* 2,5	-	6	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0,015	-	0,04	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	0,2	-	0,3	MV/m
<b>Magnetic properties</b>				
Magnetic type	Non-magnetic			
<b>Optical properties</b>				
Transparency	Opaque			
<b>Durability</b>				
Water (fresh)	Unacceptable			
Water (salt)	Unacceptable			
Weak acids	Unacceptable			
Strong acids	Unacceptable			
Weak alkalis	Unacceptable			
Strong alkalis	Unacceptable			
Organic solvents	Limited			
Oxidation at 500C	Unacceptable			
UV radiation (sunlight)	Fair			
Flammability	Highly			
<b>Primary production energy, CO2 and water</b>				
Embodied energy, primary production	43,9	-	48,4	MJ/kg
Sources 45.2 MJ/kg (Ecoinvent v2.2); 46.9 MJ/kg (Ecoinvent)				
CO2 footprint, primary production	0,961	-	1,06	kg/kg
Sources 0.989 kg/kg (Ecoinvent v2.2); 1.03 kg/kg (Ecoinvent)				
Water usage	* 88,9	-	98,3	l/kg
<b>Recycling and end of life</b>				
Recycle	✓			
Embodied energy, recycling	17,9	-	19,8	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	0,925	-	1,02	kg/kg
Recycle fraction in current supply	* 68,4	-	75,6	%
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 19,2	-	20,2	MJ/kg
Combustion CO2	* 1,79	-	1,88	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✓			
<b>Links</b>				
ProcessUniverse				

**CRIBA 140, 95% POLIETILENO AL 5% CASCARILLA DE CEBADA.**

Juan Carlos  
Dr. Alfredo M  
IIM-UNAM

Operador: ELIEZER HERNANDEZ

PELICULA

Identif.de la muestra: PE+M140-5%

Fe.ensayo: Viernes, 04 de Enero de 2008

Nº. método ensayo: 10

Tipo de interfaz: 5500

PELICULA

Veloc.cruceta: 10.0000 mm/min

Segunda velocidad: 0.0000 mm/min

Tercera velocidad: 0.0000 mm/min

Frec.muestreo(pto/s): 10.0000

Temperatura: 22 C

Humedad (%): 61

Dist.ent mord: 25.4000 mm

D.I. probeta: 25.4000 mm

	Módulo {YoungAut} (MPa)	Tensión carga última (MPa)	Deform % carga última (%)	Deform % en la carga máx. (%)	Carga en punto rotur auto (kN)	Tensión en punto rotur auto (MPa)	Carga en la carga máx. (kN)	Desplazmto en la carga máx. (mm)	Deform en la carga máx. (mm/mm)
1	82.556	5.321	110.236	110.236	0.022	2.415	0.048	28.000	1.102
2	83.913	5.316	62.007	62.007	0.038	4.165	0.048	15.750	0.620
3	67.445	5.045	92.521	92.521	0.017	1.860	0.046	23.500	0.925
4	65.807	4.546	88.255	88.070	0.018	1.981	0.045	14.750	0.581
5	62.684	5.430	157.415	157.415	0.049	5.430	0.049	39.983	1.574
Media	72.481	5.132	102.087	96.050	0.029	3.170	0.047	24.397	0.960
D.E.	9.976	0.357	35.415	40.561	0.014	1.565	0.002	10.302	0.406
C.V.	13.763	6.949	34.691	42.229	49.364	49.364	3.692	42.229	42.229
Mediana	67.445	5.316	92.521	92.521	0.022	2.415	0.048	23.500	0.925
Media +2.00 DE	92.433	5.845	172.916	177.172	0.057	6.300	0.051	45.002	1.772
Media -2.00 DE	52.529	4.418	31.257	14.928	0.000	0.040	0.044	3.792	0.149
Mínimo	62.684	4.546	62.007	58.070	0.017	1.860	0.045	14.750	0.581
Máximo	83.913	5.430	157.415	157.415	0.049	5.430	0.049	39.983	1.574

	Tenacidad (MPa)	Tensión en fluen superior (MPa)	Tensión punto inf fluencia (MPa)	Deform carga última (mm/mm)	desplazmto fluencia desplaz l (mm)	Tensión fluencia desplaz l (MPa)
1	5.647	5.321	5.304	1.102	0.717	2.007
2	5.149	5.316	5.135	0.620	0.866	2.493
3	5.179	5.045	-	0.925	0.916	2.161
4	4.240	4.986	4.383	0.883	1.034	2.233
5	7.498	-	-	1.574	1.067	2.218
Media	5.542	0.000	0.000	1.021	0.920	2.223
D.E.	1.206	0.000	0.000	0.354	0.140	0.176
C.V.	21.756	0.000	0.000	34.691	15.243	7.912
Mediana	5.179	0.000	0.000	0.925	0.916	2.218
Media +2.00 DE	7.954	0.000	0.000	1.729	1.200	2.574
Media -2.00 DE	3.131	0.000	0.000	0.313	0.640	1.871
Mínimo	4.240	0.000	0.000	0.620	0.717	2.007
Máximo	7.498	0.000	0.000	1.574	1.067	2.493