



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EXTRUSION DE PERFILES
DE MATERIALES
NANOCOMPUESTOS A BASE
DE POLITEREFTALATO DE ETILENO (PET)

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

P R E S E N T A:

CLAUDIA JOCELYN MANCHINELLY CANO



MEXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M en C. Eduardo Guillermo Ramón Marambio Dennett

Vocal: Dr. Francisco López Serrano Ramos

Secretario: Dr. Antonio Sánchez Solís

1^{er.} Suplente: Dr. Ernesto Rivera García

2^{do.} Suplente: José Guadalupe Pérez Ramírez

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Reología y Mecánica de Materiales
Instituto de Investigaciones en Materiales

Asesor

Dr. Antonio Sánchez Solís

Sustentante

Claudia Jocelyn Manchinelly Cano



Agradecimientos

AGRADECIMIENTOS.

Quiero dedicar está tesis a Dios y a mi mamá.

Gracias Dios, por permitirme tener esta aventura tan maravillosa que es vivir, por los momentos buenos y malos que me permiten aprender a ser mejor, por elegir y guiarme siempre por el mejor camino nunca te equivocas, por mis virtudes, defectos y crearme con amor, gracias por bendecirme con una mamá y una familia como la que me diste.

Mamá, gracias por darme la vida. Gracias por tantos esfuerzos, angustias, preocupaciones y sacrificios, para sacarnos adelante a mí y mi hermano siempre me demuestras que solo falta voluntad para lograr lo que queramos, por querer y desear siempre lo mejor para nosotros, por comprendernos, escucharnos y nunca juzgarnos. Gracias por darme una vida tan feliz, tranquila y sin angustias. Gracias por tu ejemplo de lucha constante, por los valores y principios que me enseñaste que me ayudan y ayudaran a salir adelante en la vida con rectitud, tenacidad, con paso firme y con la cara siempre en alto. Gracias por creer y confiar en mí, apoyarme para llegar hasta este punto con la beca completa y en lo personal. Gracias por que nunca me dejaste rendir y solo ver hacia adelante, por tu paciencia en mis momentos de debilidad, gracias por tus sabios consejos, por las llamadas de atención. Este triunfo también es tuyo, es el reflejo de tu esfuerzo por mí y excelente ejemplo. Tu eres mi mejor amiga, gracias por estar siempre conmigo sosteniéndome incondicionalmente, ayudarme, reírte conmigo, comprenderme en cualquier momento y situación, gracias por tus oraciones....

De todo corazón, GRACIAS por ser mamá, compañera, amiga y ejemplo.

Te amo.

A mi hermano, gracias por preocuparte por mi y motivarme, se que siempre podre contar contigo, gracias por cuidarme siempre desde que éramos chiquitos, gracias por tantos momentos felices y las mejores carcajadas que he tenido en la vida, parte de lo que soy es gracias a ti. Te quiero mucho.

Agradecimientos

Abuelita, gracias por ser tan maravillosa eres un gran ejemplo de vida, me muestras que siempre se puede salir adelante sin importar lo difícil que sea. Gracias, por esos ratos de charla donde me compartes tus vivencias y experiencia de los que he aprendido y reído tanto. Gracias por el ejemplo de tranquilidad, fortaleza, alegría y voluntad. Gracias por tus cuidados desde que era niña, los momentos de juegos y risas. Gracias por tu preocupación e interés en mi educación y la alegría que compartes en este triunfo. Gracias por tenerme siempre en tus oraciones que me iluminan el camino y por darme un gran ejemplo de Fe enseñándome a confiar en la voluntad de Dios.

Tía Nati, te quiero tanto, gracias por preocuparte siempre en mí, por tu interés en mi bienestar y tu alegría en todos mis triunfos. Gracias por tu ejemplo de generosidad y bondad, por enseñarme que alegría es dar sin pedir nada a cambio, gracias por tu confianza, siempre te traigo en mi corazón, mi otra mamá.

Bere, mi primita gracias por tu apoyo y ayuda tanto académica como personal. Gracias por escucharme, por tantas risas y momentos felices son invaluable, eres como mi hermanita.

Gracias a toda mi familia tío Enrique, tío Martin, tía Linda, tía Marlen, Kenia, han sido parte muy valiosa para mi formación, cada uno me ha aportado algo, ya sea compartiendo alegrías, consejos, su preocupación o interés en mi educación.

Gracias a mi Asesor, por asignarme este tema, por el interés en mi aprendizaje tanto teórico como práctico y darme la oportunidad de adquirir conocimientos invaluable.

Gracias a mis sinodales, por el interés de mejorar mi trabajo, por los consejos, críticas, correcciones y aportaciones.

UNAM, mi casa por tantos años, gracias por la oportunidad de tener una formación académica de primer nivel. Gracias por guardarme en tus instalaciones llenándome de su esencia de conocimientos. Llevo orgullosa en el corazón el nombre y escudo de la UNAM.

Quiero agradecer especialmente a mi querida Facultad de Química, gracias por ayudarme a crecer, gracias por todas las oportunidades brindadas para que siguiera adelante con mi educación, gracias por ser el escenario de tantas aventuras, preocupaciones, cansancio, tristezas, decepciones, sorpresas y miles de alegrías. Gracias a mis profesores que no solo me enseñaron materias sino que también una manera diferente de pensar y desarrollar un criterio. Gracias a todo el personal que siempre me trato con respeto y entusiasmo haciendo muy agradable mi estancia, gracias en especial a Robert por su interés en el desarrollo

Agradecimientos

deportivo y académico. Gracias a todos los laboratoristas que siempre me brindaron un servicio excelente y también una amistad para las largas horas en los laboratorios.

Gracias al IIM por darme los recursos y oportunidad de desarrollar mi tesis, gracias por todas las donas de los miércoles, gracias a los trabajadores, investigadores y profesores que siempre me apoyaron. Gracias a Lupita, Alex, Fausto, Arturo, Jair, que siempre me apoyaron cuando tenía dudas y me compartían sus conocimientos.

Gracias a todas esas innumerables personas de la Facultad de Química y de otras facultades que se cruzaron en mi camino, ya sea que me conocieran como Bob, Joce, Jocy, Joys, Manchinelly, Manchi o Claudia, con las que compartí clases, miradas, horas y lugares de dormir, momentos en la biblioteca, jardinera o mesas para comer, equipos de trabajo, amistades cortas, compañerismo y dejaron en mí una huella, una aventura, un recuerdo y sobretodo muchas risas.

Gracias a los amigos siempre los recuerdo con mucho cariño ya sea que conviviéramos años o solo unos meses, cada uno sigue en mi mente y corazón. BereNice sabes lo especial que eres para mí gracias por tantas risas, clases divertidas, platicas, somos la fiesta, Raúl mi gran amigo y mi apoyo; no olvides nuestro trato cuando tengamos 40 años, Dulce gracias por mi primer trabajo en el EAZ y todas las aventuras que tuvimos, Tany como da vueltas la vida pero siempre está llena de buenos recuerdos, Tere, toda la banda de los gatos, Elsa, Carmen, Hola Tú gracias por todo y muchos más disculpen si no los menciono. La banda futbolera gracias por tantas vivencias, triunfos y alegrías que no terminaría de numerar: Ale Piña, Dianita, Isis, Kika, Gisela, el equipo representativo UNAM y el equipo representativo de la Facultad.



INDICE

AGRADECIMIENTOS..... I

ÍNDICE..... III

RESUMEN..... 1

I. INTRODUCCIÓN..... 3

II. GENERALIDADES..... 5

1. POLÍMEROS..... 5

1.1. DEFINICIÓN..... 5

1.2. QUÍMICA DE LOS POLÍMEROS 7

1.3. TIPOS DE POLÍMEROS 7

1.4. CLASIFICACIÓN..... 7

1.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES 8

1.5.1. COMPORTAMIENTO..... 8

1.5.2. ESTRUCTURA: CRISTALINO Y AMORFA..... 9

1.5.3. PESO MOLECULAR DE LOS POLÍMEROS..... 11

1.5.4. PROPIEDADES TÉRMICAS..... 12

1.5.4.1. TEMPERATURA DE T_g Y T_m 12

1.5.4.2. TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN..... 14

1.6. PET(POLITEREFTALATO DE ETILENO)..... 14

1.6.1. HISTORIA..... 14

1.6.2. ESTRUCTURA..... 15

1.6.3. PROPIEDADES..... 16

1.6.3.1. PROPIEDADES FÍSICA..... 17

1.6.3.1.1. DENSIDAD.....	17
1.6.3.1.2. ÍNDICE DE FLUIDEZ.....	17
1.6.3.1.3. ABSORCIÓN AL AGUA.....	17
1.6.3.1.4. CONTRACCIÓN POR MOLDEO.....	17
1.6.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	18
1.6.3.3. PROPIEDADES TÉRMICAS.....	18
1.6.3.4. OTRAS PROPIEDADES.....	19
1.6.4. USOS.....	19
1.7. PEAD (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD).....	20
1.7.1. HISTORIA.....	20
1.7.2. ESTRUCTURA.....	21
1.7.3. PROPIEDADES.....	22
1.7.3.1. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS....	22
1.7.4. USOS.....	23
2. MODIFICACIÓN PARA POLÍMEROS.....	23
3. NANOCOMPUESTOS.....	26
3.1. DEFINICIÓN.....	26
3.2. CLASIFICACIÓN.....	26
3.2.1. NANOPARTÍCULAS.....	26
3.2.2. NANOCOMPUESTOS.....	27
3.3. CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPUESTOS.....	28
4. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN.....	29
4.1. PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	30
4.1.1. TIPOS MÁS COMUNES DE EXTRUSORAS.....	30
4.1.2. PARTES ESENCIALES DE EXTRUSORES.....	31

4.2.	PROCESO DE INYECCIÓN.....	33
4.2.1.	MOLDEO.....	33
4.2.2.	PARTES ESENCIALES DE INYECTORAS.....	34
4.3.	PRUEBAS MECÁNICAS.....	36
III.	ANTECEDENTES.....	41
1.	PROCESOS DE RECICLADO DEL PET.....	41
1.1.	RECICLADO QUÍMICO.....	41
1.2.	RECICLADO MECÁNICO.....	42
2.	BASES DE LA COMPATIBILIZACIÓN Y FUNCIONALIZACIÓN.....	43
2.1.	EXTENSIÓN DE CADENA.....	43
2.2.	EXTENSIÓN DE CADENA DEL PET.....	44
2.3.	MECANISMO DE REACCIÓN DEL INJERTO MAH EN POLIETILENO USANDO BPO COMO INICIADOR.....	46
3.	EXTRUSIÓN DE PERFILES.....	48
IV.	PARTE EXPERIMENTAL.....	52
1.	MATERIAS PRIMAS Y REACTIVOS QUÍMICOS.....	52
2.	EQUIPO UTILIZADO.....	53
3.	DIAGRAMA DE PROCESO.....	54
3.1.	DESCRIPCIÓN DE PROCESO.....	55
4.	DESCRIPCIÓN, INDICACIONES Y PRECAUCIONES EN LA EXPERIMENTACIÓN.....	54
4.1.	SECADO DE MATERIAL.....	57
4.2.	INJERTO DEL MAH EN PEAD	58

Índice

4.3. EXTRUSIÓN REACTIVA	59
4.4. INYECCIÓN.....	59
4.5. PRUEBA MECÁNICA DE TENSIÓN.....	61
4.6. PRUEBA DE IMPACTO.....	61
5. PRUEBAS REALIZADAS, PROPORCIONES Y CONDICIONES.....	62
5.1. PRUEBAS REALIZADAS.....	63
5.2. CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	64
6. DISEÑO DADO-EXTRUSOR.....	68
6.1. MATERIALES.....	68
6.2. DIBUJOS DEL DISEÑO.....	67
6.3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO.....	71
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	77
1. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA PET- PEAD.....	77
2. RESULTADOS DE LA EXTRUSIÓN DEL PERFIL TUBULAR.....	86
VI. ANÁLISIS ECONOMICO PRELIMINAR.....	89
VII. CONCLUSIONES.....	103
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	105
IX. ANEXO.....	108



RESUMEN

Uno de los mayores problemas que se tienen en el reciclaje de PET es la contaminación con otros plásticos, el 78% del PET reciclado es contaminado por toda la variedad de plásticos. ^[1]

El PET-R no se destina a nuevos envases para bebidas o alimentos en contacto permanente (al menos no el PET reciclado mecánicamente) debido a que las temperaturas implicadas en el proceso no son lo suficientemente altas para asegurar la esterilización del producto. De manera que el uso del PET-R no reduce la necesidad de nuevas cantidades de PET virgen necesaria para los recipientes de alimentos, lo que constituye un problema ya que la producción del PET utiliza grandes cantidades de petróleo, una fuente valiosa y no renovable. Bajo las tecnologías de reciclado existentes, conocidas como reciclado mecánico, la mayoría de los residuos del PET no pueden reciclarse debido a que contienen cantidades significativas de impurezas como tintes y metales que interfieren con el procesado. Tales materiales, como películas de poliéster metalizado que se emplean como cubiertas de ventanas, compuestos electrónicos y material fotográfico, están excluidos de este reciclado mecánico.

En esta tesis se lleva a cabo toda una investigación y experimentación de una gama de compuestos para optimizar y caracterizar la mezcla y posteriormente procesarla en un producto específico y se busca obtener una mezcla nueva o aleación de PET reciclado-Polietileno con propiedades mecánicas eficientes para poder procesarlo por los métodos de transformación tradicionales, ya que no es posible determinar teóricamente las composiciones óptimas para esta mezcla.

Se llevó a cabo la modificación química de PEAD por medio del injerto de Anhídrido Maléico. Este injerto, a la cadena principal del PEAD, facilitará la

Resumen

compatibilización con el PET. El proceso reactivo de injerto se realizó en un extrusor de doble husillo para garantizar una óptima dispersión de las fases constituyentes del compuesto. Para la caracterización se moldearon probetas por inyección. La morfología fue analizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). También, se diseñó un dado para la obtención de tubos o perfil hueco, determinando el perfil de temperatura adecuado para hacer la extrusión de tubos con la mezcla PET reciclado-PEAD.

Además de obtener una mezcla con mejores propiedades, el uso de materiales reciclados para procesar objetos de uso diario disminuirá los costos y dependiendo de su uso final sustituirá o complementará otros mercados.



INTRODUCCIÓN.

Muchas personas han olvidado la importancia de cuidar el medio ambiente, generalmente nos enfocamos en nuestras necesidades y no volteamos a ver el daño que se causa. En nuestros días debido a la demanda, competencia y el ritmo de vida, no podemos detener la producción de objetos para la vida cotidiana, ya que, no se puede vivir sólo con lo que nos proporciona la naturaleza, existe la manera de disminuir el impacto ambiental que se está ocasionando. Por ejemplo, uno de los sistemas ecológicos más contaminados por la producción de botellas de PET y envases de polietileno y polipropileno son los ríos, los cuales no sólo nos proporcionan un bello paisaje también dependen de ellos plantas, hortalizas, ganado, peces y hasta la fuerza para generar energía.

Ningún otro grupo de sustancias químicas ha tenido un impacto tan grande sobre nuestra vida cotidiana como los polímeros sintéticos. Estamos rodeados por polímeros, como alfombras, envases, botellas, prendas de vestir o vasos térmicos para tomar café.

Un polímero es tan sólo una molécula grande, a veces muy grande, formada por el enlazamiento repetitivo de muchas moléculas menores, denominadas *monómeros*. Por ejemplo, el polietileno está formado por moléculas enormes de alcano de cadena larga, enlazando varios miles de moléculas de etileno.

Sólo en Estados Unidos se fabrican más de 100 millones de toneladas anuales de plástico y en México más de 60 millones de toneladas y se espera que en los años siguientes aumente hasta 80 millones de toneladas de plástico. En el caso del PET, México ocupa el segundo lugar en la producción y el consumo de refrescos, después de Estados Unidos, el PET representa el 3% del peso de la

basura generada a nivel nacional, lo que puede traducirse en el 10% del volumen total de basura.^[1]

El peso de las botellas de refresco de 2 litros se ha reducido a la mitad: originalmente pesaba 90 g y actualmente pesa solo 48 g, además ya no tiene la base de polietileno que servía de apoyo a la botella. Ya que el PET y polietileno son incompatibles entre sí, al mezclarlos disminuyen sus propiedades mecánicas, para reciclar las botellas de PET es necesario separarlos, pero ahora imaginemos toda la cantidad de PET que no es posible reciclar debido a la contaminación con otros materiales como aluminio y plásticos como PVC, aun así no está exento de contaminarse con polietileno, que es el material con el que se hacen las tapitas de refresco y la mayoría de envases.

En México, el PET reciclado se ocupa para la elaboración de fibra poliéster, cinta para flejar y otros productos, el resto se exporta. Pero aun así es muy poca la cantidad que es reciclada, además hablando de resistencia al impacto las propiedades de PET virgen son muy pobres reduciendo su uso al envasado de bebidas.

Una alternativa para utilizar el plástico reciclado de PET es hacerlo un material procesable y utilizarlo para: Botellas para productos no comestibles, tubería sanitaria, laminados lisos y acanalados, perfiles para cercas, perfil sustituto de palos de escoba, varas de siembra para jitomate, frijol, plátano, etc.

Por esta razón el objetivo principal de este estudio es demostrar que es posible extrudir un perfil con una mezcla de PET-Polietileno para la aplicación final en objetos comunes, al igual que se analizará el impacto económico que se tendría y en segundo lugar la compatibilización de estos dos polímeros PET-Polietileno.

**GENERALIDADES****1. POLÍMEROS****1.1. DEFINICIÓN**

Un polímero (del griego poly, muchos; meros, parte, segmentos) es la unión de cientos de miles de moléculas pequeñas denominadas monómeros que forman enormes cadenas de las formas más diversas ^[2]. Ver **Figura II.1**

Un polímero no tiene la necesidad de constar de moléculas individuales todas del mismo peso molecular ni la composición química, ni la estructura molecular.

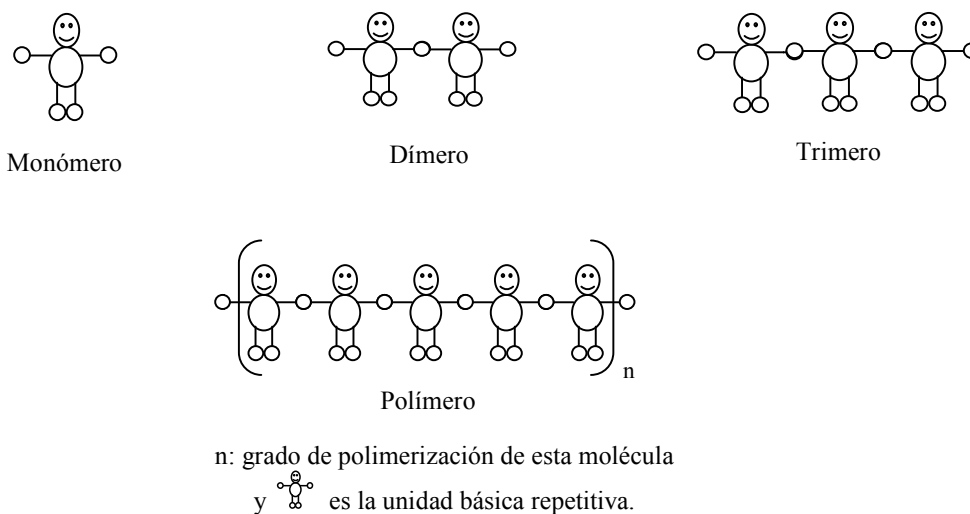
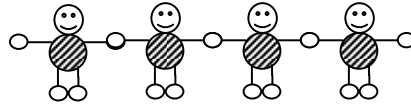


Figura II.1 Representación de un polímero.

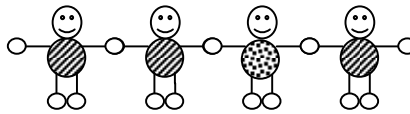
Los polímeros que tienen el mismo tipo de unidad estructural se le conoce como homopolímero, ver **Figura II.2**. Cuando se tienen diferentes tipos de acomodados se forman diferentes tipos de copolímeros, como se muestran en la Figura II.3:



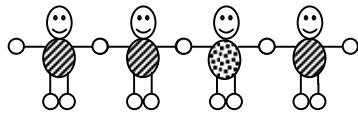
Homopolímeros (todas las unidades son iguales)

Figura II.2 Representación de un homopolímero.

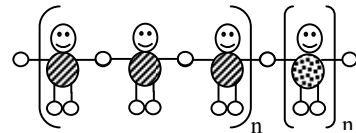
Clasificación de los copolímeros:



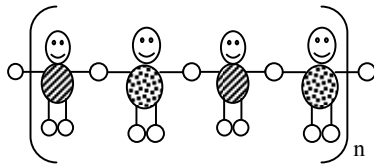
Copolímeros (Al menos una unidad diferente)



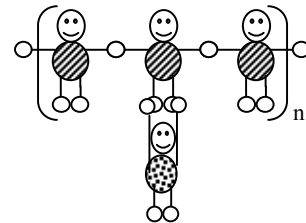
Copolímeros estadísticos (al azar)



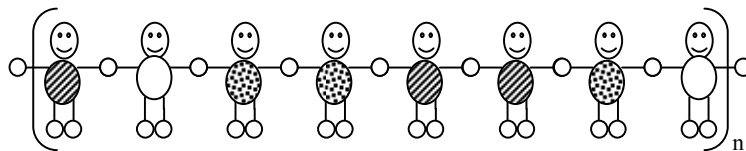
Copolímeros en bloque



Copolímeros alternados



Copolímeros de Injerto (ramificado)



Terpolímero al azar

Figura II.3 Representación de los diferentes Copolímeros.

* Dibujos de M en C. Patricia Ponce Peña

1.2. QUÍMICA DE LOS POLÍMEROS ^{[3]. [4]}

Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas, estos tienen una gran resistencia mecánica debido a la atracción entre las cadenas poliméricas. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases. Todas éstas fuerzas son las que hacen fuertes a muchos polímeros en materiales como plásticos, pinturas, elastómeros y compósitos. Las fuerzas intermoleculares determinan el estado de agregación del sistema bajo condiciones determinadas de presión y temperatura; así como sus propiedades físicas tales como volatilidad, tensión superficial, miscibilidad y solubilidad. ^[3]

1.3. TIPOS DE POLÍMEROS

Existen varios tipos de polímeros:

- Naturales

Estos tienen gran significado comercial como el algodón, formado por fibras de celulosa, la celulosa que se encuentra en la madera. La seda es otro polímero natural muy apreciado y es una poliamida semejante al nylon. La lana, proteína del pelo de las ovejas, es otro ejemplo. El hule de los árboles de hevea y los arbustos de Guayule, son también polímeros naturales importantes.

- Sintéticos

Casi la mayoría de los polímeros son sintéticos, gracias a sus propiedades mecánicas, aislantes y térmicas. Los polímeros sintéticos permiten la producción industrial de numerosos materiales: bolsas, botellas, pinturas, adhesivos.

1.4. CLASIFICACIÓN

La clasificación de polímeros no tiene fin, puede ser de muchas maneras diferentes, ya sea por su método de polimerización, su constitución química, su estructura o sus aplicaciones.

De acuerdo a su importancia comercial por sus aplicaciones en el mercado, se encuentran dentro de los denominados “COMODITIES” o polímeros de gran producción, los cuales son ^[6]:

Tabla II.1 Clasificación de polímeros basados en sus aplicaciones.

Nombre	Abreviatura (opcional)	Número de identificación
Polietilentereftalato	PET ó PETE	1
Polietileno de alta densidad	PEAD ó HDPE	2
Policloruro de vinilo o Vinilo	PVC ó V	3
Polietileno de baja densidad	PEBD ó LDPE	4
Polipropileno	PP	5
Poliestireno	PS	6
Otros	Otros	7

(El código de Identificación es adoptado en México el 25 de Noviembre de 1999 en la NMX-E-232-SCFI-1999 basado en la identificación de Europa y países de América)

1.5. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

1.5.1. COMPORTAMIENTO

➤ **Termoplásticos:**

Son macromoléculas lineales o ramificadas, unidas por fuerzas intermoleculares. Son flexibles, es decir, pueden ser manejados y moldeados con facilidad y dependiendo de su estructura a temperatura ambiente pueden ser blandos o duros, frágiles y rígidos, son reciclables. Se disuelven o hinchan al contacto con disolventes. Como: silicón (sólido), PET, PE.

➤ **Termofijos:**

Materiales entrecruzados que no funden, es decir, se mantienen rígidos y sólidos a temperaturas elevadas, no son moldeables, resistentes a las temperaturas, no se disuelven, su gran característica es que son reticulados.

➤ **Elastómeros:**

Se puede estirar y éste luego vuelve a su tamaño original, requieren poca energía para estirarlos, es decir no resisten mucho la deformación. Caucho natural, poliisopreno, polibutadieno.

1.5.2. ESTRUCTURA: CRISTALINA Y AMORFA ^{[7], [8], [9]}.

Todos los materiales sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su estructura molecular en *cristalinos* y *amorfos*. Ver **Figura II.4**. Se distinguen regiones de dos clases: las cristalinas, en la que las cadenas dobladas varias veces en zigzag están alineadas formando las agrupaciones llamadas *cristalitos*; y otras regiones amorfas, en la que las cadenas se enmarañan en un completo desorden.

El grado de cristalinidad de los polímeros, que por su estructura *regular* y por la flexibilidad de sus cadenas tienen mayor tendencia a cristalizar, depende de las condiciones de la cristalización. Si el polímero cristaliza a partir del material fundido, habrá más imperfecciones porque las cadenas se enredan y el medio es muy viscoso, lo cual dificulta el ordenamiento de ellas. En cambio, si el polímero cristaliza de una solución diluida, es posible obtener cristales aislados, con estructuras bien definidas como en el caso del polietileno, de donde se distinguen las llamadas *lamelas* formada por cadenas dobladas muchas veces sobre sí mismas.

La cristalización a partir del polímero fundido conduce a la situación descrita anteriormente, en la que se tendrán dos fases: cristalina y amorfa, con algunas cadenas participando en varios cristalitos, actuando como *moléculas conectoras*. También es frecuente que los cristalitos se agrupen radicalmente a partir de un punto de *nucleación* y crezcan en él en forma radical, formando *esferulitas*. Un enfriamiento muy rápido puede reducir considerablemente el grado de cristalinidad.

Los cristalitos también pueden agruparse de otras maneras, generando *fibrillas*; la formación de fibrillas en lugar de esferulitas, dependerá de factores tales como la flexibilidad de la cadena y las interacciones entre ellas, el peso molecular del polímero, la velocidad del enfriamiento y en muchos casos del tipo de esfuerzo del cual se somete al material durante el procesamiento.

Los cristales fibrilares pueden producirse en los procesos de inyección o de extrusión, o durante el proceso de estirado de algunos materiales que se emplean en la industria textil (nylon y poliésteres).^[10]

Los polímeros amorfos tienen cadenas no dispuestas según un ordenamiento cristalino, sino que están esparcidas en cualquier ordenamiento, aún en estado sólido. En la **Tabla II.2** se muestran las claras diferencias entre un termoplástico cristalino y otro amorfo.

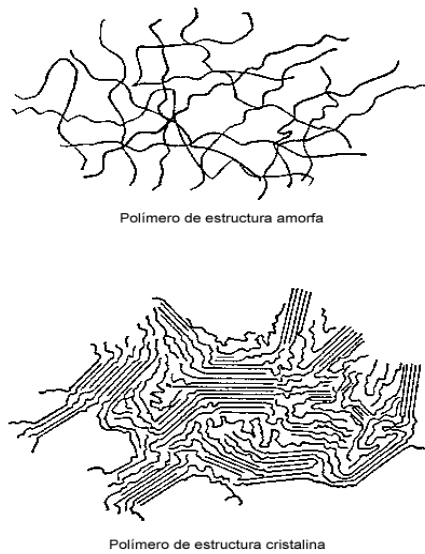


Figura II.4 Clasificación de polímeros basados en su estructura.

Fuente: <http://pslc.ws/spanish/blend.htm>

Tabla. II.2 Diferencias entre termoplásticos cristalinos y amorfos.

AMORFOS	CRISTALINOS
Normalmente transparentes	Opacos
Resistencia mecánica media	Resistencia mecánica alta
Poca resistencia a la fatiga	Alta resistencia a la fatiga
T_g	Intervalo de fusión muy definido y estrecho (3-4°C)
Bajas contracciones de moldeo	Altas contracciones de moldeo

Fuente: <http://mein2000.com/tutoriales/tutorial-inyeccion-de-plasticos/los-termoplasticos-amorfos-y-cristalinos.html>

1.5.3. PESO MOLECULAR DE LOS POLÍMEROS

El peso molecular de los polímeros es una propiedad de fundamental importancia para su aplicación.

Polímero PM > 10,000 g /mol

La utilidad y las propiedades mecánicas, asociadas a los materiales poliméricos, son consecuencia de su peso molecular del cual dependen de forma considerable. Así, en la mayoría de los casos, es únicamente para un determinado intervalo de pesos moleculares, donde una propiedad dada de un polímero será óptima para una aplicación particular. Debido a las características propias de los polímeros, en cuanto a su formación y a diferencia de los compuestos formados por moléculas pequeñas, una muestra de polímero está constituida por una mezcla de polímeros homogéneos, pero con distinta longitud de cadena y en consecuencia, de diferente peso molecular, por lo que se consideran materiales polidispersos. El peso molecular se puede determinar de manera experimental. Ver. **Tabla II.3**

Tabla II.3 Métodos para la determinación del peso molecular de un polímero

Fenómeno	Método	Mi	Limites
Análisis de grupos terminales	Análisis Químico	\bar{M}_n	< 3.000
	Análisis radioquímico	\bar{M}_n	Muy altos
	Métodos físicos	\bar{M}_n	Muy altos
Métodos termodinámicos en solución	Presión de vapor	\bar{M}_n	< 1.000
	Ebulloscopia	\bar{M}_n	< 30.000
	Crioscopia	\bar{M}_n	< 30.000
	Destilación isotérmica	\bar{M}_n	< 20.000
	Presión osmótica	\bar{M}_n	< 10 ⁶
Propiedades de transporte	Osmometría de presión de vapor	\bar{M}_n	< 25.000
	Viscosidad	\bar{M}_v	> 20.000
	de Ultracentrifugación	Varios	> 300
	Difusión	\bar{M}_d	> 20.000
	SEC	Varios	> 1.000
	Dispersión de luz	\bar{M}_w	> 300

Fuente: Ernesto Rivera, Patricia Ponce P, "Apuntes Química de los Procesos Industriales", 2008

1.5.4. PROPIEDADES TÉRMICAS

1.5.4.1. TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA Y TEMPERATURA DE FUSIÓN. [11],[12],[13]

La transición vítrea es una transición que se manifiesta en los polímeros *amorfos*; hay una cierta temperatura (distinta para cada polímero) llamada *temperatura de transición vítrea*, o T_g . Cuando el polímero es enfriado por debajo de esta temperatura, se vuelve rígido y quebradizo, igual que el vidrio, esto sucede porque al disminuir la temperatura el polímero se contrae y sus cadenas se mueven menos, atrayéndose más y volviéndose a un estado vítreo, es decir frágil.

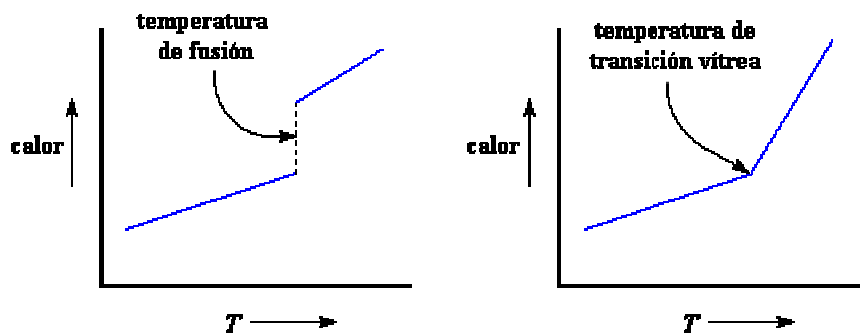


Figura II.5

Gráficos calor vs. temperatura para un polímero cristalino (izquierda) y un polímero amorfo (derecha).

En la **Figura II.5** se puede observar la diferencia entre fusión y transición vítrea. Cuando se calienta un polímero cristalino a velocidad constante, la temperatura aumentará a velocidad constante.

Sin embargo, la temperatura seguirá aumentando hasta que el polímero llegue a su punto de fusión. Cuando esto sucede, la temperatura se mantendrá constante por un momento, aún cuando se suministre más calor. Se mantendrá constante hasta que todo el polímero haya fundido completamente. Luego, la temperatura del polímero comenzará a ascender nuevamente. El aumento se detiene porque la fusión requiere energía. Una vez que el polímero fundió, la

temperatura comienza a ascender de nuevo, pero ahora lo hace a una velocidad más lenta. El polímero fundido tiene mayor capacidad calorífica que el polímero cristalino en estado sólido, de modo que puede absorber más calor con incrementos de temperatura más pequeños.

Pero cuando se calienta un polímero amorfo hasta su T_g , la temperatura sigue aumentando, no se detiene. No hay calor latente de transición vítrea. La temperatura se sigue incrementando. Pero por encima de la T_g ya no lo hace a la misma velocidad que por debajo. El polímero experimenta un incremento en su capacidad calorífica luego de alcanzar la transición vítrea. Puesto que la transición vítrea involucra un cambio en la capacidad calorífica pero no un calor latente, esta transición se denomina *transición de segundo orden*.

Los polímeros semicristalinos tiene otro comportamiento, ver **Figura II.6**, cuando cristaliza y cuando se vuelve vítreo, entre estos comportamientos es plástico o huloso de esta manera a temperatura mayor a la T_g su deformación es mayor y dependiente del tiempo, porque tienen más posibilidades las moléculas de cambiar de posición.

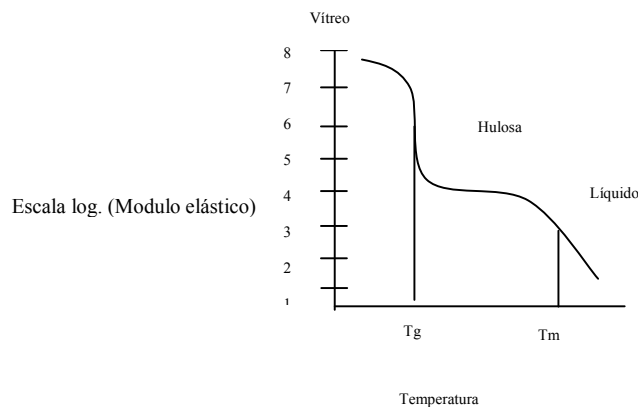


Figura II.6 Esquema de variación de módulo elástico con respecto a la temperatura para un polímero de cadena larga.

Fuente: Ureta Ernesto. Polímeros: estructura, propiedades y aplicaciones. Ed. Limusa 1989.

1.5.4.2. TEMPERATURA DE CRISTALIZACIÓN ^{[14], [15]}

Por encima de la transición vítrea, las cadenas de los polímeros poseen una gran movilidad. Cuando alcanzan la temperatura adecuada, han ganado la suficiente energía como para adoptar una disposición sumamente ordenada, que obviamente llamamos cristales.

Cuando los polímeros se disponen en esos ordenamientos cristalinos, liberan calor. Esta caída en el flujo de calor puede verse como una gran depresión en la curva de flujo de calor versus temperatura **Figura II.7:**

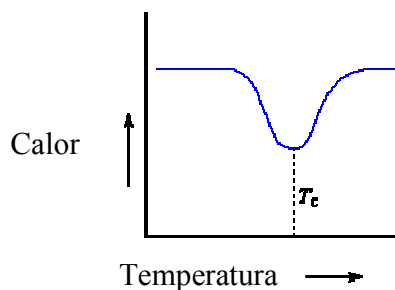


Figura. II.7 Representación grafica de la temperatura de cristalización.

Fuente: <http://pslc.ws/spanish/dsc.htm>

La temperatura en el punto más bajo de la misma, se considera generalmente como la temperatura de cristalización del polímero, o T_c , decimos que la cristalización es una transición *exotérmica*.

1.6. PET(POLITEREFTALATO DE ETILENO)

1.6.1. HISTORIA

En 1929 Carothers fue uno de los primeros en el estudio sobre la condensación de compuestos bifuncionales, consiguiendo la síntesis de los polímeros lineales, de esta manera impulsó la fabricación de los poliésteres.

A partir de los años 50's hace su aparición por primera vez en el mercado mundial el poliéster, en la elaboración de fibras sintéticas, que sería a su vez, la materia

prima para la fabricación de telas. En la década de los 60's, el poliéster continua su desarrollo y se emplea exitosamente en la fabricación de películas flexibles para empaques de diversos productos y cintas de sonido. Finalmente, a mediados de los 70's, gracias a los avances tecnológicos en la fabricación de polímero de alta pureza, conjuntamente con el desarrollo del proceso de inyección- estirado soplado, aparecen en el mercado de E.U.A los envases de 2 L para bebidas carbonatadas. La década de los 80's se caracterizó principalmente por la diversificación en los tamaños, colores y aplicaciones de resina PET. ^[16]

1.6.2. ESTRUCTURA ^{[17], [18]}

El PET es obtenido a partir de dos reacciones básicas, esterificación directa de la reacción del ácido tereftálico y el etilenglicol produciendo el Ester tereftálico "monómero" y agua. Posteriormente una policondensación a condiciones de alto vacío para obtener un polímero de cadena larga, Ver **Figura II.8**, produciendo el crecimiento de la cadena un aumento de viscosidad, proporcionando mayor resistencia química.

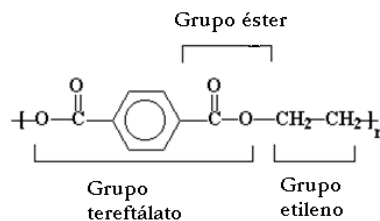


Fig. II.8 Molécula de PET

Cuando la longitud de cadena es lo suficientemente larga, el PET se extruye a 280°C a través de un dado de orificios y enfriado en agua desmineralizada a 25-28°C y cortado en la peletizada ora.

Para el PET grado de botella se requiere un proceso en la fase final que es polimerización en fase sólida (calentar el granulado final en una atmósfera inerte) mejorando así las propiedades del polímero amorfo.

1.6.3. PROPIEDADES

El PET por su baja velocidad de cristalización y en función a las condiciones de operación de transformación, se puede encontrar en estado amorfo ó semicristalino 30 a 40 % de cristalinidad.

PET semicristalino, es un termoplástico blanco y opaco, posee resistencia mecánica media, rigidez y dureza elevadas, baja resistencia al impacto y gran resistencia a la abrasión. El PET cristalino resiste ácidos diluidos, hidrocarburos alifáticos y aromáticos, aceites, grasas y alcoholes. No resiste agua caliente, ácidos y bases concentradas, hidrocarburos, halogenados y cetonas. El PET amorfo, es transparente y presenta menor rigidez y dureza, pero posee mejor resistencia al impacto es resistente a hidrocarburos clorados, posee propiedades químicas similares a las del cristalino, si se requiere mayor resistencia al impacto se recomiendan aleaciones con policarbonatos o elastómeros.^[19]

El PET es uno de los polímeros más utilizados para el envasado debido a las ventajas de sus propiedades como: Bajo peso (ahorro en fletes), alta resistencia al impacto (bajo % mermas), facilidad de manejo (línea de producción/llenado, transporte, tiendas/ anaqueles, casa), excelente transparencia (tan buena como el vidrio), aprobación de FDA (inerte y puro), excelentes propiedades de barrera (oxígeno, CO₂), flexibilidad de diseño, prácticamente irrompible, económico.^[16]

Otro factor a tener en cuenta durante el procesamiento es su carácter higroscópico y que en su estado fundido presenta una alta sensibilidad a la degradación hidrolítica, de ahí que sea práctica común en la industria realizar ciclos previos de secado a temperaturas mayores a su T_g (entre 140-160°C) por períodos de hasta 6 horas antes de cualquier etapa de procesamiento.^{[18], [20]}

Otro factor que limitó en sus inicios el moldeo por inyección fue su inherente baja viscosidad del fundido, que es altamente sensible a la temperatura y que

gotea en la boquilla. Parte de este inconveniente ha sido solucionado al diseñar los equipos tal que incorporen sistemas que controlen el flujo libre a través de la boquilla. ^[20]

Las propiedades del PET se describen de manera general no importando si es amorfo o cristalino, se tienen:

1.6.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS ^{[21], [22], [23]}

1.6.3.1.1. DENSIDAD:

Es útil para determinar la cantidad de materia prima presente que se va a utilizar en la fabricación de un artículo determinado, a mayor densidad menor rendimiento en producción; 1.33-1.38 g/cm³ para un material amorfo, hasta aproximadamente 1.45-1.51 g/cm³ para el caso semicristalino.

1.6.3.1.2. ÍNDICE DE FLUIDEZ:

Determinar la elección del grado del material de acuerdo al proceso, también es una medida indirecta del peso molecular del material. A medida que el índice de fluidez es elevado, el peso molecular es menor y se facilita la inyección en piezas de diseños complicados. ^[21]

1.6.3.1.3. ABSORCIÓN DE AGUA:

Absorbe la humedad. El contenido de humedad en el polímero promueve la degradación durante el procesamiento y conlleva a la reducción del peso molecular, que a su vez afecta las propiedades del producto final. Todo poliéster tiene que ser secado a fin de evitar pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005 %

Absorción de agua- equilibrio (%) <0.7

Absorción de agua- en 24 horas (%) 0.1

1.6.3.1.4. CONTRACCIÓN DE MOLDEO:

Depende principalmente de temperatura del molde, temperatura del fluido y tiempo de sometimiento. Si una muestra amorfa es calentada cerca de 80°C se induce la

cristalización en frío que genera una considerable distorsión dimensional, contracción y opacidad, por lo que limita la temperatura de servicio.

1.6.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS, Ver. Tabla II.4

Tabla II.4 Propiedades mecánicas del PET virgen.

POLIETILENTEREFTALATO				PET
PROPIEDADES MECÁNICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECÍFICO	g/cm ³	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESIÓN (1 Y 2 %DEF)	kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MÓDULO DE ELASTICIDAD (TRACCIÓN)	kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTÁTICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINÁMICO S/ACERO		D-1894		0.20
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA
RESISTENCIA AL IMPACTO	J/m			40-50

1.6.3.3. PROPIEDADES TÉRMICAS, Ver. Tabla II.5

Tabla II.5 Propiedades térmicas del PET virgen.

PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECÍFICO	Kcal/kg °C	C-351		0.25
TEMP. DE FLEXIÓN B/CARGA (18.5kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
TEMP. DE USO CONTÍNUO EN AIRE	°C			-20 a 110
TEMP. DE FUSIÓN	°C			255
COEF. DE DILATACIÓN LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
COEF. DE CONDUCCIÓN TÉRMICA	Kcal/m h °C	C-177	52612	0.25

Debido a la presencia de los anillos aromáticos en su cadena, el PET presenta una moderada flexibilidad molecular que se refleja en que su temperatura

de transición vítrea se encuentra en torno a los 70-80°C. Esto hace que su capacidad para cristalizar sea controlada por las condiciones de enfriamiento.

1.6.3.4. OTRAS PROPIEDADES, ver Tabla II.6

Tabla II.6 Otras propiedades químicas del PET virgen.

PROPIEDADES QUÍMICAS	OBSERVACIONES
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS	BUENA
RESISTENCIA A ÁCIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A ÁLCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A PROD. QUÍMICOS DEFINIDOS	CONSULTAR
EFFECTO DE LOS RAYOS SOLARES	ALGO LO AFECTAN
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS	SI
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTIÓN	ARDE CON MEDIANA DIFICULTAD
PROPAGACIÓN DE LLAMA	MANTIENE LA LLAMA
COMPORTAMIENTO AL QUEMARLO	GOTEA
COLOR DE LA LLAMA	AMARILLO ANARANJADO TIZNADO
OLOR AL QUEMARLO	AROMATICO DULCE

Fuente tablas: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/dtecnicos.htm>

Los valores arriba indicados son de referencia. Pueden utilizarse como orientación para el diseño, pero se deja a criterio la necesidad de validar esos valores en función del uso que se dará al producto final.

1.6.4. Usos

El PET se puede modificar para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Se tienen diferentes grados de PET, como se ve en la **Tabla II.7**, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad.

Tabla II.7 Grados PET, clasificados de menor a mayor peso molecular.

Grado de PET	Tipo	Aplicaciones
Fibra	PET	En la industria textil, la fibra de poliéster sirve para confeccionar gran variedad de telas y prendas de vestir.

Película y lámina	PET copoliéster	Empaque de alimentos, base para películas laminadas termosellables o metalizadas, láminas de aluminio recubiertas en ambos lados, cintas magnéticas de computación.
Envase y empaque	PET copoliéster	Fabricación de botellas, tarros y frascos para envasar bebidas, alimentos, productos cosméticos y farmacéuticos.
Ingeniería	PET/PBT	Partes industriales.

FUENTE de aplicaciones: "Enciclopedia del Plástico 2000"; Centro Empresarial del Plástico.

1.7. POLIETILENO

1.7.1. HISTORIA ^{[24], [25]}

Su historia comienza en 1932 en Gran Bretaña, en los años que siguieron a la profunda recesión del desplome de Wall Street en 1929. No obstante los obstáculos que tenían que vencerse para encontrar dinero para la investigación, la Imperial Chemical Industries, ICI, trabajaba sin cesar en la búsqueda de nuevas reacciones bajo presión extrema. Después de varios intentos y resultados fortuitos, en 1935 se descubrió el polietileno (PE).

El primer uso para el PE fue para recubrir a los cables submarinos de telecomunicación, lo cual justificó una planta de producción que inició su marcha en septiembre de 1939, el mismo día que Alemania invadió Polonia. Este producto fue considerado como un secreto de guerra, ya que ofrecía una gran ventaja técnica al Reino Unido. Al poco tiempo el PE surgió como producto comercial, aunque sus aplicaciones eran aún limitadas.

Fue hasta el año de 1953 cuando Karl Ziegler, en Alemania, descubrió la forma de organizar las moléculas de etileno durante la polimerización, mediante el uso de un catalizador, logrando además utilizar menor presión y menor temperatura en la reacción. De ese modo apareció el Polietileno de Alta Densidad, PEAD.

1.7.2. ESTRUCTURA

Antiguamente llamado "Polimetileno", el Polietileno pertenece al grupo de los polímeros de las Poliolefinas, que provienen de alquenos (hidrocarburos con dobles enlaces). Son polímeros de altos pesos moleculares y poco reactivos debido a que están formados por hidrocarburos saturados. El polietileno es un polímero vinílico, hecho a partir del monómero etileno.

- El polietileno ramificado se hace por medio de una polimerización vinílica por radicales libres.
- El polietileno lineal se sintetiza por medio de un procedimiento más complicado llamado polimerización Ziegler-Natta.
- El UHMWPE se fabrica empleando la polimerización catalizada por metallocenos. Gracias a catalizadores, ahora es posible controlar el peso molecular del material, de manera que se tienen disponibles desde medio hasta ultra alto peso molecular.

Los Polietilenos se clasifican principalmente en base a su densidad (de acuerdo al código ASTM) como ^[26], ver **Figura II.9**:

- Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE)
- Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD o LLDPE)
- Polietileno de Alta Densidad (PEAD o HDPE)
- Polietileno de Alta Densidad Alto Peso Molecular (HMW-HDPE)
- Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)

Si la densidad del polietileno aumenta, aumentan también propiedades como la rigidez, dureza resistencia a la tensión, resistencia a la abrasión, resistencia química, punto de reblandecimiento e impacto a bajas temperaturas. Sin embargo, este aumento significa una disminución en otras propiedades como el brillo, resistencia al rasgado y la elongación. ^[2]

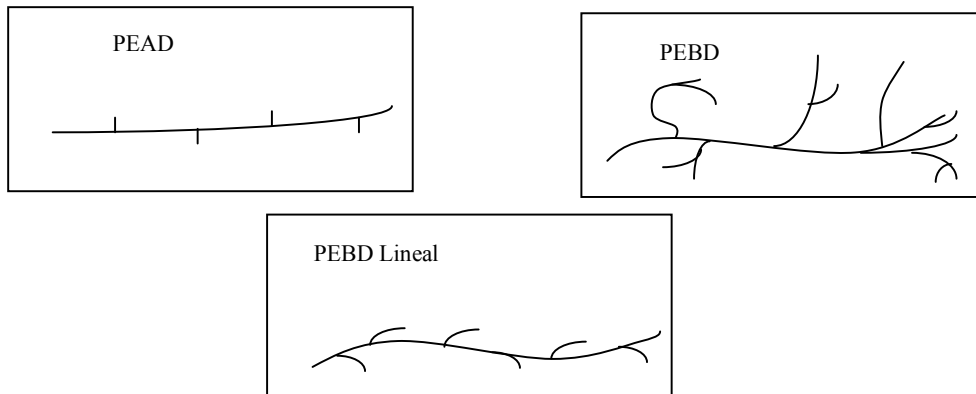


Figura II.9 Comparación entre las estructuras de PEAD, PEBD y PEBD lineal

Reference: A.V. SHENOY Advisor consultant Pune, India. THERMOPLASTIC MELT RHEOLOGY AND PROCESSING. Pag.9

1.7.3. PROPIEDADES. POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) [24], [25], [27], [21]

1.7.3.1. PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS. Ver *Tabla II.8*

Tabla II.8 Propiedades mecánicas y térmicas del PEAD

PROPIEDADES	UNIDADES	PEAD
Cristalinidad	%	80-90
Resistencia a la tensión	kg/cm ²	210-380
Elongación	%	100-200
Módulo Elástico (10³)	kg/cm ²	5.6-10
Resistencia a la flexión (10³)	kg/cm ²	1.0-1.2
Dureza(Shore)		60-70 D
Conductividad térmica (10⁴)	cal cm/s cm ²	11- 12.5
Temperatura de Vicat	°C	120-130
Temperatura de fusión	°C	130-140
Índice de fluidez, 190°C; ISO 113325	g/10min	2.16
Absorción de agua	-----	Casi nula

1.7.4. Usos. Ver *Tabla II.9*

Tabla II.9 Características y aplicaciones del Polietileno dependiendo de su clasificación.

Clasificación	Características	Aplicaciones
PEBD o LDPE	Material traslúcido, inodoro, con un punto de fusión promedio de 110°C. Tiene conductividad térmica baja.	Dentro del sector del envase-empaque y como aislante.
PELBD	Buena resistencia a la tracción, al rasgado y a la perforación o punción, buena resistencia al impacto a temperaturas muy bajas (hasta -95°C) y en películas excelente elongación.	Película encogible, película estirable, bolsas grandes para uso pesado, acolchado agrícola, etc.
PEAD o HDPE	Mejores propiedades mecánicas que el PEBD y el PELBD, debido a su mayor densidad. Presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión. No resiste a fuertes agentes oxidantes como ácido nítrico, ácido sulfúrico fumante, peróxidos de hidrógeno o halógenos	Sector de envase y empaque, en la industria eléctrica (aislante para cable), sector automotriz (recipientes para aceite y gasolina, tubos y mangueras), bandejas, botes, tapicerías juguetes, etc.
HMW-HDPE	Buena resistencia al rasgado, amplio rango temperaturas de trabajo (de -40 a 120°C), impermeabilidad al agua y no guarda olores.	Película, bolsas, empaque para alimentos, tubería a presión, etc.
UHMWPE	Altamente cristalino con una excelente resistencia al impacto, aún en temperaturas bajas de -200°C, tiene muy bajo coeficiente de fricción, no absorbe agua, reduce los niveles de ruido, resistencia a la fatiga y a la abrasión (aproximadamente 10 veces mayor que la del acero al carbón).	En partes y refacciones para maquinaria. Fibras que son tan fuertes que sustituyeron al Kevlar para su uso en chalecos a prueba de balas. Grandes láminas de éste se pueden utilizar en lugar de hielo para pistas de patinaje.

2. MODIFICACIÓN PARA POLÍMEROS. ^{[28],[29]}

Los polímeros necesitan aditivos para incrementar la facilidad de procesamiento y mejorar sus propiedades, obteniendo nuevas aplicaciones.

Algunos de los aditivos que se utilizan son:

- **Agentes Nucleantes:** Cuando se tiene un material cristalino, en el que un porcentaje significativo del tiempo de enfriamiento en el molde, corresponde a tiempo requerido para la formación de cristales, al añadir agentes nucleantes mejoran las propiedades mecánicas del polímero, reducen los ciclos de moldeo y ayudan a la cristalización en el moldeo sin necesidad de enfriamientos rigurosos. Actualmente existen investigaciones para el uso en PE y aumentar su transparencia.
- **Antiestáticos:** Cuando el material es susceptible a desarrollar cargas estáticas después de remover el producto moldeado, éstas pueden llevar largo tiempo en disiparse, además de atraer partículas de polvo en suspensión, las cuales se depositan en forma imperceptible en la superficie del producto. Un agente antiestático incorporado como aditivo en el material permite una descarga de la carga estática en forma rápida.
- **Antioxidantes:** Su función es inhibir o retardar el mecanismo de degradación, provocado por las altas temperaturas de procesamiento, que van desde los 200 a 280°C, proporcionando estabilidad al polímero.
- **Clarificantes:** Los agentes Clarificantes se encuentran en el mercado en forma de polvo y concentrados, cuando son adicionados correctamente proporcionan de manera general una gran transparencia, alta relación costo-beneficio, versatilidad, reducen tiempos de ciclo incrementan la productividad y mejoran las propiedades físicas y mecánicas.
- **Lubricantes:** Tienen como función disminuir el esfuerzo del husillo para transportar y comprimir los gránulos, así como minimizar la fricción de la masa fundida con la maquinaria. El lubricante empleado es estearato de zinc, ya que lubrica a nivel molecular y superficial, se aplica en cantidades de 0.25 % a 1.0 %. Para fabricar películas se utilizan como lubricantes externos el mono estearato de glicerol y los ésteres montánicos.

- **Modificadores de Impacto:** Aumentan la resistencia al impacto del polímero, ya que proporcionan características de elasticidad, absorbiendo golpes que recibe el producto.
- **Retardante a la flama:** Inhiben las características inflamables de los plásticos. Sus principales características son liberación de Bromo gaseoso, variedad de grados conforme a la temperatura de procesamiento, desventajas, gases altamente tóxicos, baja estabilidad a la luz.
- **Cargas y refuerzos:** Para modificar las propiedades mecánicas y físicas. El añadir cualquier material que ocupe espacio originará un incremento en el volumen, puesto que la materia prima se compra en base a peso y el terminado en base volumen, por eso además de reforzar se usa también como relleno.
 - **Fibra de vidrio:** Incrementa la resistencia a la tensión, temperatura de fatiga y rigidez. Se pueden utilizar dos tipos de fibras largas y cortas. La fibra de vidrio corta imparte buena rigidez y la larga aumenta la resistencia a la tensión a elevadas temperaturas. Su desventaja, es que presenta efectos de orientación, reduce la resistencia al impacto e incrementa el desgaste de la maquinaria durante el proceso de transformación.
 - **Carbonato de calcio:** Está disponible en variedad de tamaño de partícula. Es un polvo blanco, no tóxico, que se dispersa fácilmente en los sistemas poliméricos y puede utilizarse en concentraciones elevadas. Existen partículas más finas pero artificiales como la calcita-aragonita; pero más costosas. El

carbonato de calcio tiene un efecto significativo en la resistencia al impacto.

3. NANOCOMPUESTOS.

3.1. DEFINICIÓN ^{[30], [31]}

Son aquellos materiales que presentan una combinación de dos o más fases que contienen diferentes composiciones o estructuras, donde al menos una de las fases está en escala nanométrica. Lo más importante en la elaboración de un Nanocompuesto además de presentar una dispersión homogénea, es lograr una buena compatibilización entre las fases. Comparado con el comportamiento de materiales a escala micrométrica, su comportamiento es único y este se debe a la relación superficie- volumen y el tamaño tan pequeño de la partícula. Se caracterizan por ser materiales con un tamaño de grano (partícula o fase) de menos de 100 nm, en resumen, láminas o filamentos con menos de 100 nm.

La innovación de los Nanocompuestos ha llegado al desarrollo de materiales avanzados con nuevas y propiedades mejoradas. La interacción interface influye en el comportamiento del material. Los factores que más tienen que ver con la mejora del comportamiento y que se deben de tomar en cuenta para su preparación son: morfología, distribución, composición química de las fases, composición y pureza de las fases, estequiometría en la combinación, número y naturaleza de las interacciones entre las fases constituyentes.

3.2. CLASIFICACIÓN

3.2.1. NANOPARTÍCULAS

- Lamelares (mejoran propiedades mecánicas y de barrera)
- Fibrilares (mejoran propiedades mecánicas y de barrera)

- Esféricas
- Otras

3.2.2. NANOCOMPUESTOS

Dependiendo de la naturaleza de su matriz se pueden clasificar en tres grupos principales:

- Poliméricos
- Metálicos
- Cerámicos

Nanocompuestos poliméricos.

La estructura de los Nanocompuestos depende del grado en el cual los componentes orgánicos e inorgánicos son transformados en compatibles. Teniendo interacciones más fuertes entre polímero y silicato (arcilla) se producen, por lo tanto, materiales con propiedades mecánicas superiores. ^[13]

Las arcillas son usadas porque son materiales que están compuestos por placas de silicato que pueden ser intercaladas por moléculas orgánicas. En la mezcla de polímeros y arcillas, la falta de afinidad entre el silicato hidrofílico y el polímero hidrofóbico hacen difícil de alcanzar una mezcla homogénea. La solución a este problema de compatibilidad entre las capas de la arcilla y el polímero se alcanza a través de reacciones de intercambio iónico, lo que incrementa la organofilicidad de la superficie de la capa de la arcilla; como consecuencia, disminuye la energía de superficie de la arcilla y se mejora el mojado con la matriz polimérica. ^[32]

Los silicatos que han sufrido intercambio catiónico son fácilmente dispersables en matrices orgánicas y pueden formar Nanocompuestos de dos tipos: a) estructuras intercaladas en las cuales la separación entre las capas de silicato se incrementa pero es relativamente constante, o b) Nanocompuestos

exfoliados en los cuales capas de silicato y apilamientos están dispersos a través de todo el polímero, con orientación al azar, ver **Figura II.10**

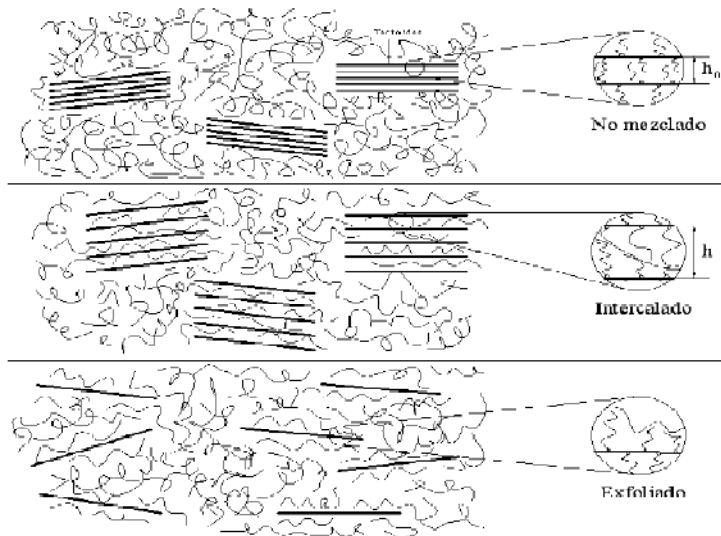


Figura II.10 *Dispersión de la arcilla en la matriz polimérica*

En los Nanocompuestos intercalados, las cadenas extendidas del polímero están intercaladas entre las capas de silicato, de una manera cristalográficamente repetitiva lo que produce un compuesto bien ordenado, aunque estas estructuras ordenadas tienen un ancho de pocas capas moleculares. Las capas de silicato de un Nanocompuesto exfoliado están dispersas en la matriz continua del polímero, donde las capas de la arcilla están separadas por distancias promedio que dependen de la concentración de la misma. ^[31]

3.3. CARACTERIZACIÓN DE NANOCOMPUESTOS^[31]

- **Microscopia Electrónica de barrido**

El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto y dado que estos tienen una longitud de onda mucho menor que la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. Disponen de un cañón que emite electrones que chocan contra el espécimen, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones.

El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio ya que los electrones pueden ser desviados por las moléculas de aire.

Hay dos tipos básicos de microscopios electrónicos: el microscopio electrónico de transmisión (Transmission Electron Microscope, TEM) y el microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope, SEM).

En el microscopio electrónico de barrido el haz de electrones realiza un barrido en rejilla. El lente objetivo enfoca el haz al espécimen, cuando el haz toca la muestra durante unos microsegundos ocurren interacciones que son detectadas antes de que se mueva el haz al siguiente punto. El proceso se lleva a cabo hasta que se realiza el barrido completo de la rejilla y luego se repite. El barrido se puede llevar a cabo 30 veces por segundo.

4. PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN.

El hombre, desde las más remotas civilizaciones, ha moldeado materiales naturales como el barro y vidrio. En 1862 el descubrimiento del celuloide con la búsqueda de un sustituto de marfil, en 1872 se fabrica la primera máquina manual de inyección para plásticos y unos años después aparece la “Bakelita” para moldeado, para 1929 el primer molde de desenrosque automático para 24 cavidades y en 1930 aparece el “Polietileno” y así hasta la actualidad.^[33]

Se cuenta con aproximadamente 20 procesos de transformación distintos. Existe la clasificación por cambios de estado dentro de la máquina. Ver **Tabla II.10**

Definición:

- Proceso Primario (Proceso térmico, pasa de estado líquido y finalmente sólido)
- Proceso Secundario (Proceso mecánico o neumático sin pasar por fusión)

Tabla II.10 Clasificación por cambios de estado del polímero dentro del proceso.

Primarios	Secundarios
Extrusión	Termoformado
Inyección	Doblado
Soplado	Corte
Inmersión	Torneado
Rotomoldeo	Barrenado
Compresión	

4.1. PROCESO DE EXTRUSIÓN

Proceso continuo, donde la resina se funde por temperatura y fricción, pasa por un dado proporcionando una forma definida y se enfría. Es un proceso de alta productividad, económica (maquinaria), sencillo de operar y continuo. Los productos deben tener una sección transversal constante es decir con forma regular y uniforme.

También si dos polímeros diferentes, o un polímero y un fluido, pigmento, o carga se alimentan al extrusor, la maquina lleva a cabo la función adicional de mezclado. Existe también la extrusión reactiva, proceso en el que se lleva a cabo un injerto en un polímero en estado fundido, utilizando el extrusor como reactor químico. Se pueden hacer reacciones de: acoplamiento, entrecruzamiento, injerto, polimerización en masa, funcionalización.^[34]

4.1.1. TIPOS MÁS COMUNES DE EXTRUSORAS^[35]

- *Extrusora mono husillo*: Son las más comunes, consiste, básicamente en un husillo que gira dentro del barril del extrusor, el material fluye por las paredes del husillo y el barril.
- *Extrusora de doble husillo*: Tiene dos husillos que giran en co-rotacional o contra-rotacional dentro del extrusor, ver **Figura II.11**, la forma de contacto depende de la dirección, contacto y modalidad del husillo.

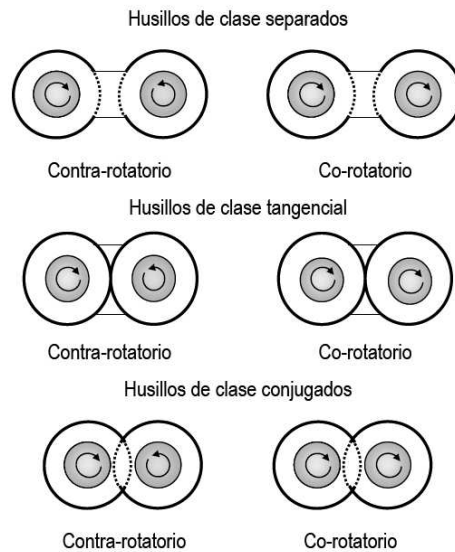


Figura II.11 Diferentes arreglos para el extrusor de doble husillo.

4.1.2. PARTES ESENCIALES EN EL EXTRUSOR [36]

Consta de un eje metálico central con alabes helicoidales llamado husillo o tornillo dentro de un cilindro metálico revestido con una camisa de resistencias eléctricas.

Cuenta con dos orificios en cada extremo del cilindro donde en uno se coloca una tolva de alimentación de forma cónica y el sistema de acondicionamiento del usillo compuesto por un motor y un sistema de control de velocidad. En el otro extremo se ubica la salida del material. A continuación se muestra un esquema básico de un extrusor, **Figura II.12**

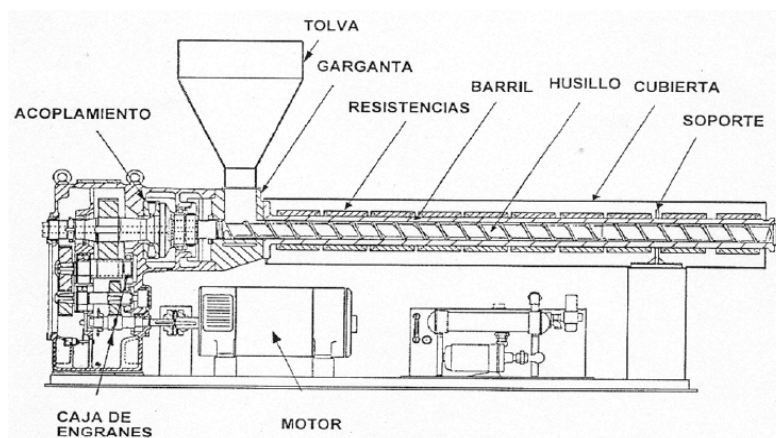


Figura II.12 Partes esenciales de un Extrusor.

Tolva:

En esta se colocan los gránulos de material plástico para la alimentación, es importante tener el diseño adecuado para que el material baje y no se estanque. La forma más común es cónica. Cuando no se tiene un buen diseño y un material que se compacta, se coloca un sistema vibratorio, o una tolva tipo Cramer con un tornillo para forzar a fluir el material.

Barril o cañón:

Cilindro metálico que aloja al husillo y un revestimiento exterior de resistencias. Es importante tomar en cuenta el material del barril para que sea compatible y resistente para aguantar el desgaste provocado por el material plástico procesado. Se debe contar con un sistema complementario de enfriamiento ya sea de agua o aire, controlado por un tablero.

Husillo:

Todo husillo, ver **Figura II.13**, debe contar con partes esenciales como se muestra en la figura. Las características y dimensiones de un husillo son muy importantes ya que estas se han adaptado al comportamiento de los polímeros. El husillo es la parte esencial del extrusor, que gira dentro del cilindro donde se calienta y empuja hacia adelante al material a una velocidad específica.^[14]

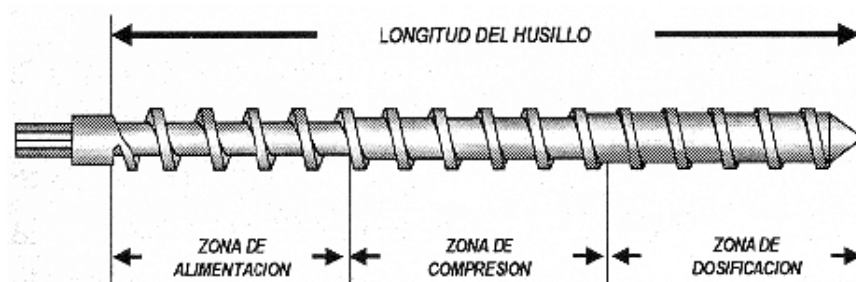


Figura II.13 Husillo (Zonas en las que se divide)

Para lograr una buena extrusión, se recomiendan perfiles de temperaturas, **Tablas II.11, II.12**, de acuerdo al grado del material que se esté trabajando, no

deben pasar un límite máximo, ya que se originaría oxidación y degradación del material.

Tabla II.11 Perfil de extrusión de PEAD

PEAD	
Relación L/D	20:1; 28:1
Relación de compresión	2.1; 3:1
Zona	Temperatura °C
Tolva	40-60
Alimentación	190-210
Compresión	200-220
Dosificación	210-225
Dado	220-225

Tabla II.12 Perfil de extrusión para una tubería de PEAD

PEAD extrusión tubería.	
Zona	Temperatura °C
Tolva	40-60
Alimentación	150-170
Compresión	170-190
Dosificación	180-200
Dado	180-200

4.2. INYECCIÓN^{[38],[39]}

En la industria el proceso de inyección transforma una cantidad considerable de termoplásticos y Termofijos. Es considerado un proceso de **moldeo** rápido y con ayuda de agentes nucleantes se incrementa la rapidez de moldeo. Se introduce el termoplástico donde se funde con ayuda de unas resistencias y la fricción provocada por el material plástico y el cilindro, posteriormente se inyecta en un molde y enfría.

4.2.1. MOLDEO

Un molde para plásticos es un arreglo de varios elementos ensamblado, fijos y móviles, que generan un espacio con la forma del producto deseado, entre una parte negativa llamada cavidad y otra positiva llamada corazón o núcleo y cuyo propósito es producir un número elevado de piezas de plástico.

4.2.2. PARTES ESENCIALES DE INYECTORAS.

Primeramente hablaremos de la organización de los elementos en una inyectora, estos se clasifican en cuatro sistemas y que constituyen diversas tecnologías:

- a) Sistema de inyección.
 - Colada Caliente
 - Colada Fría
 - Colada Mixta
 - Colada Aislada
- b) Sistema de enfriamiento.
 - Jaula
 - Cascada
 - Directo
 - Circuito
 - Transferencia
- c) Sistema de expulsión.
 - Pernos
 - Placa
 - Aire
 - Desenrosque
 - Movimientos Laterales
- d) Sistema de recuperación.
 - Amortiguada / choque
 - Resortes
 - Cremalleras
 - Neumático o Hidráulico

Las características más importantes a considerar en la inyección son las de: husillo (material, L/D, zonas), boquilla (con válvula de retención o no, para evitar el regreso el material), Colchon (según el volumen dosificado y diámetro del

husillo), Capacidad de inyección (para controlar el tiempo de residencia del material). El proceso de inyección se lleva a cabo de la siguiente manera, **Figura II.14**

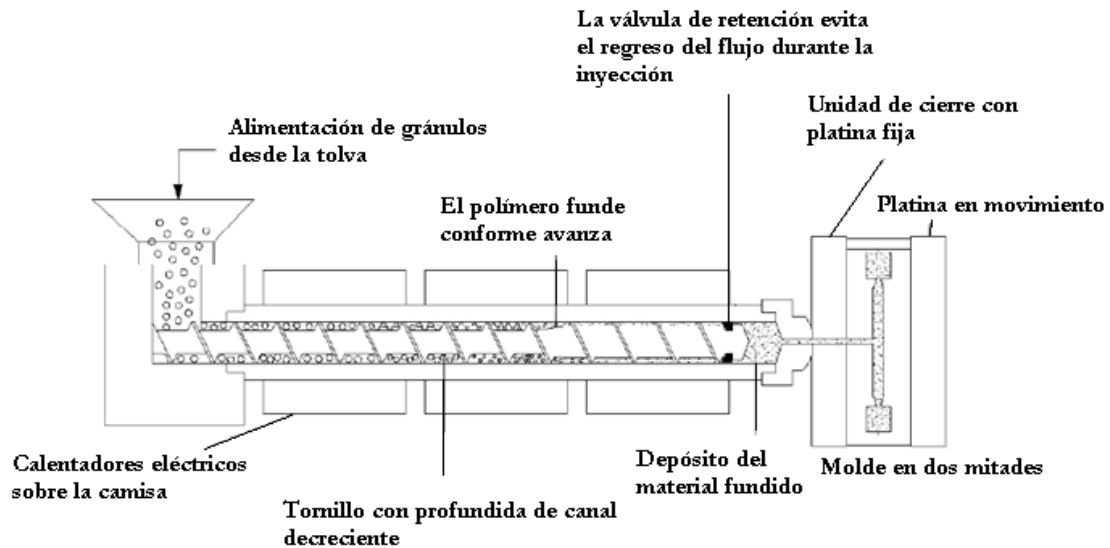


Figura II.14 Características principales del funcionamiento de cada zona de una inyectora

Al igual que en la extrusión se necesita tener un perfil de temperaturas, ver **Tabla II.13**, y una característica de enfriamiento que determinara el grado de transparencia. En la inyección se debe seguir estrictamente las indicaciones de moldeo y realizarse pruebas hasta obtener los resultados satisfactorios. Es necesario controlar el tiempo de residencia en el cilindro, para impedir que por manejar tiempos largos se degrade el polímero.

Tabla II.13 Perfil de temperaturas para inyección de PET virgen.

Inyección del PET virgen	
Velocidad Husillo [rpm]	60
Zona	Temperatura °C
Boquilla	283
Dosificación	285
Compresión	285
Alimentación	280

Se debe establecer una **presión de inyección**, se usa la presión mínima que permita llenar el molde para producir piezas de fácil desmolde, con la menor distorsión y sin tensiones internas, empleando altas velocidades de inyección. Siempre se debe cuidar que la contracción en el moldeo sea mínima, ya que la resistencia a la flexión y rigidez aumentan. Para minimizar la contracción post-moldeo, se puede aumentar la presión de inyección, evitando así los rechupes. Sin embargo esto causa un sobre empaquetamiento y probablemente cierta dificultad para extraer piezas.

La **contrapresión** se origina durante la plastificación, ya que el material fundido se acumula entre el espacio de la punta del husillo y la boquilla. La contrapresión en la boquilla tiene como función impedir el retorno de la masa fundida, mejorando la acción de mezcla del material. Así mismo aumenta el calor generado por la fricción originando degradación, para evitar este calor se debe bajar el valor de la contrapresión o la velocidad del husillo al menor posible.

Para minimizar los esfuerzos internos y la distorsión, se sugiere trabajar con **velocidad de inyección** alta, aunque en unos casos no es posible por la degradación del material. En ocasiones, manejar velocidades elevadas origina que las piezas presenten zonas brillantes y opacas, por lo que se debe procesar a velocidades bajas y temperaturas de molde altas, con sus respectivas excepciones como por ejemplo el PET necesita enfriarse en molde frío.

4.3. PRUEBAS MECÁNICAS

Si comparamos la estructura entre un metal y un plástico, se observa que el metal tiene una estructura compacta y atómica, en cambio los plásticos tienen una estructura molecular por eso son menos resistentes mecánicamente. Las propiedades mecánicas generalmente son dependientes del tiempo, para los termoplásticos dependen de la temperatura, humedad, etc.

El comportamiento de deformación y recuperación interna de los plásticos le confiere una gran propiedad llamada memoria del polímero. Y para los plásticos reforzados su comportamiento es debido a sus cargas y demás materiales que contienen. ^[40]

En todo el mundo existen instituciones o Asociaciones que regulan la forma de medir las propiedades y unificar los métodos de prueba para que cumplan la "Normalización". Algunos como: ISO (International Organization for Standardization), ASTM (American Society for Testing and Materials), DIN (Deutsches Institut für Normung), UL (Underwriters Laboratory), FDA (Food and Drug Administration).

Para medir la resistencia a la tensión de una probeta (muestra polimérica), tomamos la probeta y tratamos de deformarla. Ver **Figura II.15**



Figura II.15 Máquina prueba de tensión (IIM)

Esta máquina simplemente sujeta cada extremo de la muestra y luego procede a deformarla. Mientras dura el estiramiento de la muestra, va midiendo la fuerza (F) que está ejerciendo. Cuando conocemos la fuerza que se está ejerciendo sobre la muestra, dividimos ese número por el área transversal (A) de la muestra. El resultado es la resistencia a la *tensión* que está experimentando la muestra.

$$\frac{F}{A} = \text{tension}$$

F= fuerza [kN]

A= área transversal [m²]

T= tensión [MPa]

Luego, usando nuestra máquina, seguimos incrementando la fuerza, y obviamente la deformación hasta que la muestra se rompe. El método está regido por la norma ASTM D638, ISO 527, DIN 53 455. Esta prueba se puede combinar con el sometimiento de la probeta a temperaturas. La tensión y la resistencia son medidas en MPa. Es importante conocer la forma en que responderá un material a cualquier esfuerzo. Esto se puede conocer en un diagrama de tensión-deformación, ver **Figura II.16**

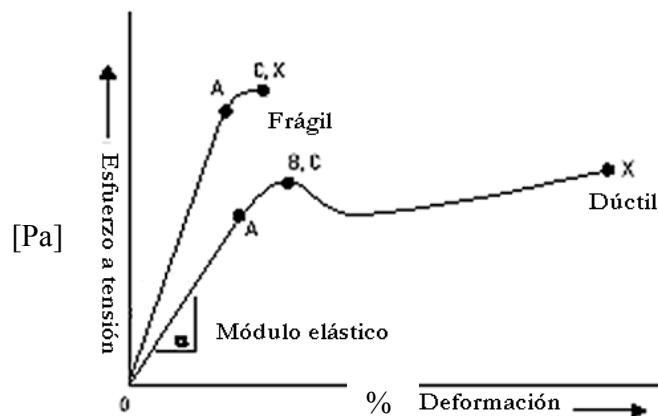


Figura II.16 *Diagrama de tensión-deformación.*

Donde:

A: límite proporcional

B: límite de deformación

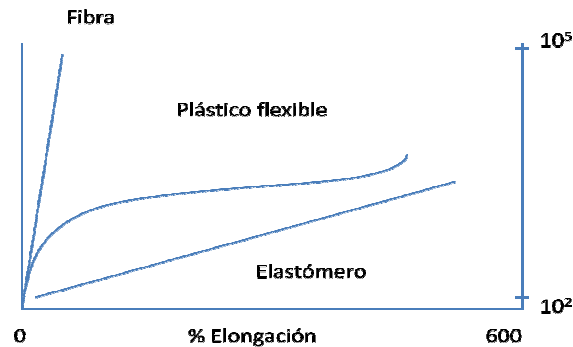
C: resistencia definitiva

X: ruptura

O a A: comportamiento elástico

Después de A: comportamiento plástico.

También existe un diagrama tensión-deformación para los diferentes tipos de polímeros dependiendo de su comportamiento. Ver **Figura II.17**



After Odian, George; Principles of polymerization, 3^{ra} Ed, NY, 1991, p.34

Figura II.17 Tensión-deformación para varios tipos de polímeros.

ELONGACION

Cuando hablamos de tensión, la muestra se deforma por estiramiento, volviéndose más larga a esto le llamamos elongación. Por lo general, hablamos de porcentaje de elongación, que es el largo de la muestra después del estiramiento (L), dividido por el largo original (L_0), y multiplicado por 100.

$$(L - L_0 / L_0) \times 100 = \% \text{ Elongación}$$

La elongación final es crucial para todo tipo de material. Representa cuánto puede ser estirada una muestra antes de su punto de ruptura. La elongación elástica es el porcentaje de elongación al que se puede llegar, sin una deformación permanente de la muestra.

RESISTENCIA AL IMPACTO IZOD CON RANURA ^[41]

Es una propiedad de los plásticos a resistir un golpe o fracturarse. Este tipo de pruebas se realizan para recrear circunstancia a las que se someterá el polímero y obtener información acerca del comportamiento.

La prueba se realiza en una maquina de impacto que se muestra en la **Figura 11.18**

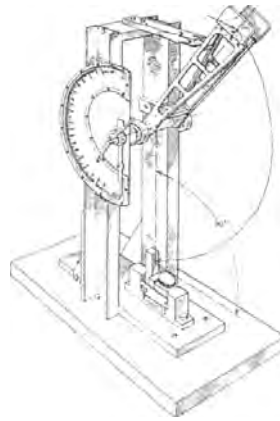


Figura II.18 Máquina para realizar las pruebas de impacto IZOD D256.

La probeta con ranura se coloca sujetándola por un extremo y se le golpea con un péndulo en el lado donde tiene la ranura, determinando así la fuerza necesaria para la, las unidades utilizadas para el impacto son J/m. Está regida por las normas ASTM D256-A, ISO 180.

La ecuación que nos permite obtener la energía que se requiere para poder fracturar la probeta, es:

$$\text{Resistencia al impacto} = \frac{L * W * g \left(\cos\left(\frac{\theta_1 * \pi}{180}\right) - \cos\left(\frac{\theta_2 * \pi}{180}\right) \right)}{S}$$

L: Longitud de la barra

W: Peso del martillo

g: gravedad

θ_1 : Ángulo de inercia

θ_2 : Ángulo de resultante

S: Espesor de la muestra



ANTECEDENTES

1. PROCESOS DE RECICLADO DEL PET

Hay dos tipos de procesos para reciclar el PET, uno es el reciclado químico y otro el reciclado mecánico.

1.1. Reciclado químico

El reciclaje químico (químolisis) del PET-R es conseguido por la total despolimerización en monómeros, o parcial en oligómeros. La estructura de los componentes resultantes de la despolimerización del PET, en comparación con las estructuras del PET está mostrada en la **Figura III.1** La principal desventaja de la químolisis del PET es su alto costo ^[42].

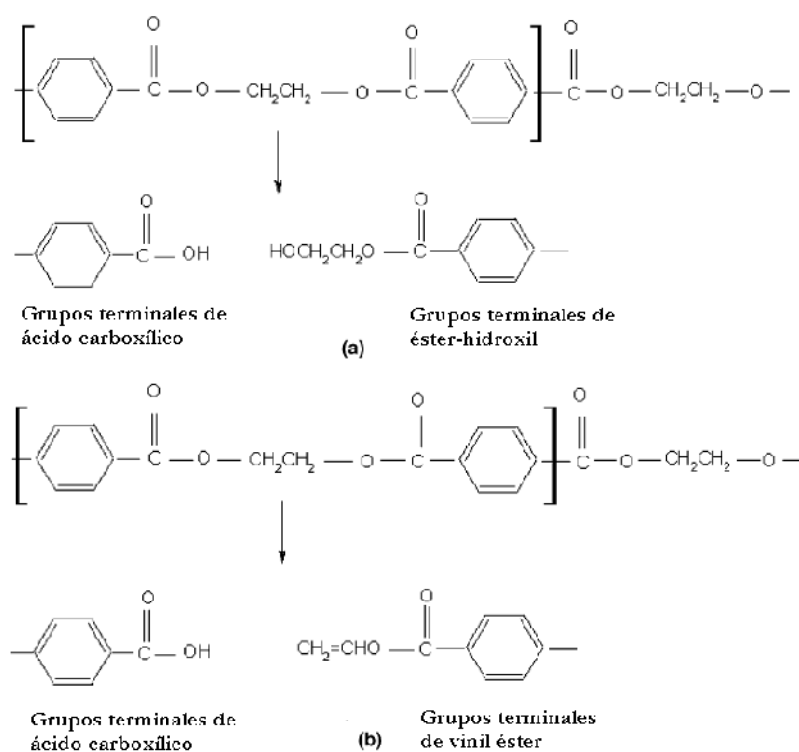


Figura III.1 Reacciones de degradación del PET, (a) reacciones de hidrólisis del PET (b) reacciones de degradación térmica.

1.2. Reciclado mecánico

El reciclaje mecánico del PET normalmente consiste en remover los contaminantes por lavado y clasificación, secado y fusión. La principal ventaja del reciclaje mecánico del PET es que es relativamente simple, ambientalmente amigable y requiere baja inversión. La principal desventaja del reciclado mecánico es la reducción del peso molecular (PM) durante el reprocesamiento, también se le conoce como reducción de la viscosidad debido a las reacciones de degradación térmica e hidrológica durante el procesamiento del PET-R. La presencia de agua y PVC en las hojuelas de PET-R promueven los cortes de cadenas del PET durante una extrusión normal. A la temperatura de procesamiento $\sim 280^{\circ}\text{C}$, ocurren reacciones de hidrólisis entre agua y PET dando como resultado cadenas cortas. [44]

El lado difícil de reciclar este material, como ya se mencionó anteriormente, es que contiene muchas impurezas. Muchos investigadores reportaron que con el propósito de conseguir un reciclaje del PET satisfactorio, las hojuelas del PET deben tener ciertos requerimientos mínimos [43]. Ver **Tabla III.1**

Tabla III.1 Requerimientos mínimos para las hojuelas del PET-R para ser reprocesado.

Propiedades	Valores
$[\eta]$	$>0.7 \text{ dl g}^{-1}$
T_m	$>240^{\circ}\text{C}$
Contenido de agua	$<0.02 \text{ wt } \%$
Tamaño de hojuela	$0.4 \text{ mm} < D < 8 \text{ mm}$
Contenido de tintas	$<10 \text{ ppm}$
Índice de amarillamiento	<20
Contenido de metal	$<3 \text{ ppm}$
Contenido de PVC	$<50 \text{ ppm}$
Contenido de polielefina	$<10 \text{ ppm}$

2. BASES QUIMICAS DE LA COMPATIBILIZACION Y FUNCIONALIZACION.

El injerto de un grupo funcional sobre Poliolefinas, vía radicales libres, es un método común en la funcionalización de polímeros. El injerto de anhídrido Maléico (MAH) por un precursor de radicales libres en polietileno de alta densidad (PEAD) provoca también entrecruzamiento de cadena en el polímero. Hay dos formas principales para injertar MAH en Poliolefinas buscando las mejores propiedades; la extrusión reactiva y la reacción de injerto usando disolventes.

2.1. EXTENSIÓN DE CADENA

Los extendedores de cadena son componentes de bajo peso molecular que pueden ser usados para incrementar el peso molecular de polímeros.^[45]

El extendedor de cadena obtenido por extrusión reactiva de anhídrido Maléico (MAH), peróxido de Benzoilo (BPO) y poliolefina de alta densidad (PEAD) contiene: Polietileno funcionalizado, que es el injerto de MAH en la poliolefina, polietileno sin funcionalizar y material entrecruzado. Las propiedades del extendedor de cadena se ven afectadas por las concentraciones de los compuestos mencionados anteriormente.

En el caso particular del Politereftalato de etileno (PET), la extensión de cadena se representa por una poliadición entre los grupos terminales de la cadena (grupos carboxilo e hidroxilo) y el reactivo. El método más utilizado de funcionalización sobre el sustrato de Poliolefinas por extrusión reactiva involucra el injerto de radicales libres. El proceso generalmente involucra combinar un iniciador de radicales libres, comúnmente un peróxido.^[46] Dependiendo de la estructura del extendedor de cadena usado, la reacción de adición puede estar acompañada por ramificación, o incluso entrecruzamiento.

2.2. EXTENSIÓN DE CADENA DEL PET^{[47],[48]}

La extensión de cadena del PET-R es un proceso donde un material de bajo peso molecular (PM) reacciona con los grupos terminales hidroxilo y/o carboxilos del PET para reincorporarse a las cadenas de peso molecular bajo que resultan del reprocesamiento del PET. Se cree que hay tres tipos de reacciones con el PET y el extendedor de cadena:

- Reacción en bloque, donde una molécula de extendedor de cadena reacciona con una cadena de PET.
- Reacción de acoplamiento, donde una molécula de extendedor de cadena se reincorpora a dos cadenas de PET. Esta es la meta óptima para un proceso de extensión de cadena.
- Donde no reaccionan la molécula de extendedor de cadena.

El grupo final carboxilo es uno de los principales productos de la degradación térmica del PET (oxidación), de esta manera el contenido de carboxilos del PET-R es una buena indicación de la degradación térmica durante el procesamiento, estos grupos finales son consumidos en la reacción de extensión de cadena en la fusión por medio de esterificación. La reducción de grupos carboxílicos en la extensión de cadena del PET incrementa la estabilidad termoxidativa.

La reducción de contenido de hidroxilos es asociado en un incremento de la velocidad de reacción de la extensión de cadena durante el procesamiento.

En la extrusión reactiva el iniciador es una parte importante de la mezcla que influye en el injerto y la conversión de la misma; ya que al agregar demasiado peróxido puede llegar a degradar demasiado al polímero.

Los peróxidos (peróxido de Benzoilo (BPO)), **Figura III.2**, por lo regular se volatilizan en la zona caliente del extrusor y por lo tanto disminuye su concentración, por eso hay que considerar este fenómeno para encontrar la mejor concentración de peróxido para el grado de injerto adecuado. La concentración y tipo de peróxido son importantes para un balance deseable entre la eficiencia del injerto y el grado de degradación. Además, la selección del iniciador debe considerar la vida media, la reactividad y especificidad hacia la poliolefina, la concentración y la solubilidad.

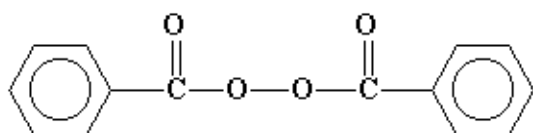


Figura III.2: Peróxido de Benzoilo.

El peróxido de Benzoilo funciona como iniciador, porque posee la habilidad de escindirse; cuando lo hace, el par de electrones del enlace que se rompen se separa y forma radicales libres.

La estructura del BPO es muy inestable porque las moléculas de oxígeno son muy electronegativas y se repelen. Este radical libre hace que se quiera aparear con cualquier posible electrón. Al tener la ruptura del enlace oxígeno-oxígeno se crean los radicales libres necesarios para el injerto de anhídrido Maléico, molécula de MAH ver **Figura III.3**, los radicales libres son inestables y finalmente van a encontrar una forma de aparearse sin generar un nuevo radical (terminación de la reacción), es entonces cuando se empezará a detener la reacción.

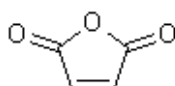


Figura III.3: Molécula del monómero (MAH).

Los inconvenientes en la reacción de injerto pueden ser reacción de degradación, baja conversión de los reactivos y la baja velocidad de reacción, debido al tiempo de residencia no adecuado, diferencia de viscosidades entre los polímeros, elección de los reactivos, compatibilidad, etc. Segundo se debe considerar la concentración del monómero, la solubilidad en la poliolefina fundida, la volatilidad, el método de introducción (absorbida por los gránulos, en disolvente, directo a polímero fundido, la reactividad hacia con el iniciador y polímero derivado de radicales, y la susceptibilidad a la homopolimerización.

Los factores interdependientes a optimizar para maximizar la eficiencia de injerto, reducir al mínimo las reacciones indeseadas o secundarias, y controlar la naturaleza del producto injertado, son ^[46]:

Eficiencia de mezclado, Temperatura, Presión, Tiempo de residencia, Tipo de Poliolefinas, Monómeros, Iniciador, Diseño del Husillo/Extrusor.

2.3. MECANISMO DE REACCIÓN: INJERTO DE ANHÍDRIDO MALEICO (MAH) EN POLIETILENO USANDO BPO COMO INICIADOR.

Las Figuras III.4, III.5, III.6 y III.7 representan esquemáticamente las reacciones que se llevan a cabo en el injerto de MAH.

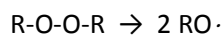


Figura III.4: Descomposición del peróxido

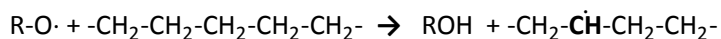


Figura III.5: Iniciación

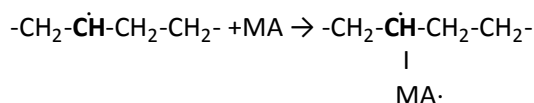


Figura III.6: Propagación

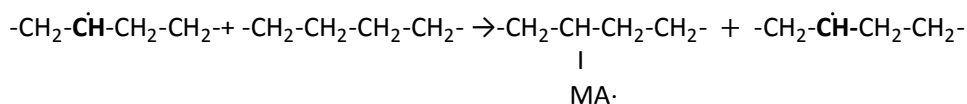
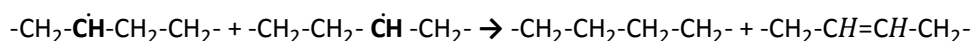
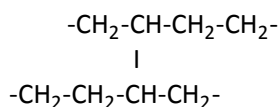


Figura III.7: Transferencia de cadena

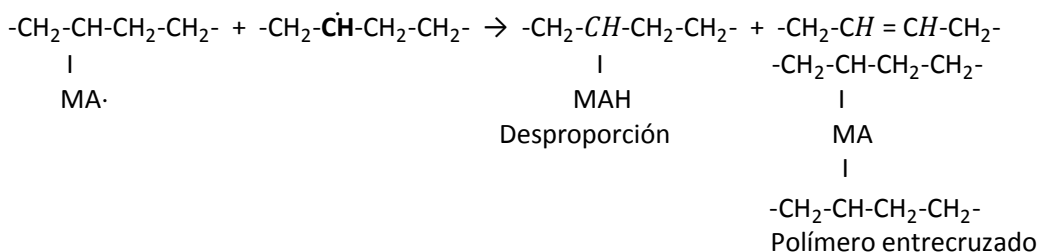
Las reacciones siguientes muestran las reacciones secundarias y de terminación del injerto de MAH. Ver. **Figura III.8**



Desproporción



Polímero entrecruzado

**Figura III.8:** Terminación.

Las reacciones de injerto se realizan generando sitios activos (radicales) en las cadenas de polietileno y así permitiendo que estos sirvan para injertar el monómero deseado. Este método es ampliamente utilizado debido a que no sólo es una forma simple de funcionalizar el polietileno a gran escala, sino que también se obtienen niveles de injerto suficientemente altos sin los inconvenientes de la copolimerización directa.

3. EXTRUSIÓN DE PERFILES

Tubos y perfiles son el segundo lugar con respecto a la cantidad de extrusión de termoplásticos. Esta producción se puede dividir en ^[49].

- Tubos conductores (PVC, PEAD)
- Tubos a presión (PVC, PEAD)
- Cables y tubos para corriente eléctrica (PVC, PEAD, PEBD)
- Tubos para drenaje (PVC, PEAD)
- Tubos industriales (PVC, PEAD, PP)
- Tubos para drenaje domestico (PVC, PP)
- Canales y drenajes para industria y agricultura (PVC)
- Tubos para gas (PVC, PEAD)

Es extremadamente difícil clasificar los perfiles. Sin embargo, con un simple perfil, **Figura III.9**, es relativamente fácil mostrar las diferentes influencias en el tipo del perfil con el diseño del dado, zona de calibrado y métodos de enfriamiento usado. Otro parámetro del proceso involucrado en la producción de semejantes combinaciones es la sección transversal y el grado del material. ^[50]

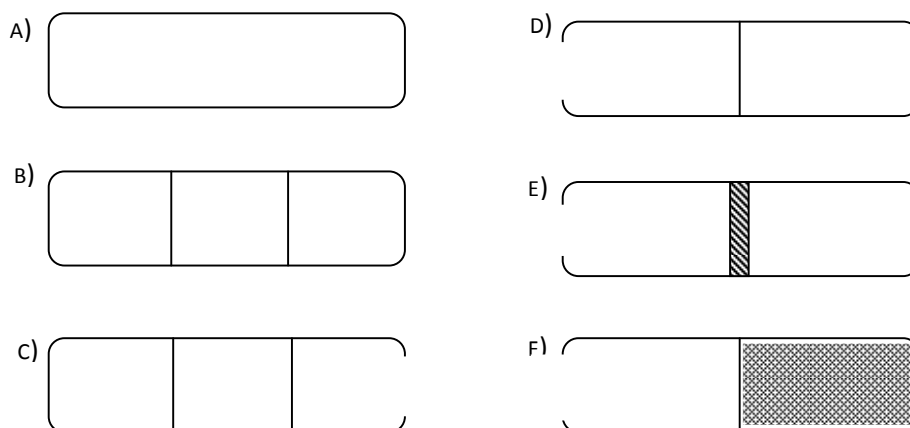


Figura III.9. Formas de perfiles. A) Perfil o tubo simple, B) Perfil hueco, C) perfil con cámara, D) perfil solido, E) perfil compuesto, F) perfil con núcleo.

- A) Perfil o tubo simple, usualmente tienen espesores de paredes lisos con esquinas que pueden ser redondeadas o puntiagudos, dependiendo del dado utilizado.
- B) Perfil hueco, contiene formas huecas cerradas, es decir la cubierta exterior rodea solo los espacios. Son posibles diferentes espesores de pared, también soportan rugosidad y bordes puntiagudos.
- C) Perfil con cámaras, son perfiles con espacios abiertos y cerrados, posiblemente con rugosidad intermedia. Son posibles diferentes espesores de pared.
- D) Perfil solido completo, no tiene cámaras y tiene todas las formas posibles y secciones transversales posibles.
- E) Perfil compuesto, también llamados perfiles multi-componentes, abarca todas las formas descritas, sin embargo, pueden combinar secciones individuales del mismo material en otro color, del mismo material con diferente dureza, de diferente material que pueda ser compuesto homogéneamente o podrían tenerse muchas combinaciones como sea posible.
- F) Perfil con núcleo, son huecos o sólidos con un núcleo de un tipo diferente de material, por ejemplo acero o madera. El principio de este proceso manufacturero es llenado o enfundado parcial.

Utilizándose equipos que funden, homogeneízan y fuerzan al polímero a pasar uniforme y constante a través de matrices de forma definida – asociados a equipos auxiliares como corte, conformación, soldadura, etc. – se pueden producir tubos, películas, chapas, filamentos perfiles, frascos, bidones, etc. Este proceso puede ser también empleado para el revestimiento de substratos como papel, aluminio y conductores eléctricos. El perfil/caño/tubo es continuamente retirado del cabezal de la matriz mediante un mecanismo de arrastre, tras obtener unas dimensiones adecuadas en la unidad de calibrado (por vacío), el perfil o el tubo pasan por una unidad de enfriamiento. El movimiento de salida del perfil o del tubo de la extrusora se ayuda con el tiro, que aplica una tensión o estiraje

constante al material para que esté siempre en movimiento. Por último, dependiendo de la flexibilidad del producto, una unidad de corte o de enrollado prepara el producto para su distribución ^[51].

En el cabezal está buena parte del secreto de un buen producto. Puede ser un modelo con porta mandril, con mandril en espiral, con alimentación lateral. Cada uno de estos diseños proporciona un flujo diferente. ^[52]

La importancia del enfriamiento, radica en la estabilidad que adquiere el plástico para no deformarse al pasar por la unidad de tiro, en donde el tubo se somete a presiones que podría producir alteraciones en la forma circular requerida. Se puede enfriar por rociado o en baños de inmersión.

El último paso es el corte, que también depende mucho del tipo de producto que se está fabricando. Si hablamos de tubería y esa tubería se enrolla, el corte lógicamente es un trabajo poco relevante. Pero muchos tubos y perfiles deben cortarse al salir de la extrusora en longitudes iguales, bien por falta de flexibilidad para ser enrollados o bien por otras consideraciones. A la hora de elegir el sistema de corte hay que tener en cuenta el diámetro y espesor de pared, la materia prima utilizada, la forma y calidad del corte y la longitud del corte

En la extrusión de perfiles una tendencia reciente es el incremento en la productividad de las extrusoras doble husillo en la aplicación de perfiles. Las características más buscadas por los transformadores son el escaso desgaste de los elementos constructivos y de accionamiento, una larga vida útil de la unidad de procesos, una elevada seguridad de los procesos y un mantenimiento fácil.



Fig. III.10 Diferentes tipos de perfiles comerciales.

Gran parte de los materiales plásticos han encontrado infinidad de mercados y una asombrosa variedad de aplicaciones en diversos campos industriales. Estos materiales poseen unas características muy interesantes, tales como intercambiabilidad de piezas, excelente acabado, propiedades eléctricas y mecánicas adecuadas, gran variedad de color, poco peso, aislamiento térmico, rápida producción y bajo costo. La extrusión es un proceso por el cual es posible obtener productos acabados o semiacabados en régimen continuo.

FLEJE DE POLIESTER

El fleje de Poliéster PET, ver **Figura III.11**, se obtiene por extrusión del mismo polímero. Se puede obtener un buen fleje de PET mezclando material virgen con recuperado.

Es un producto muy resistente que sirve para asegurar cargas de grandes dimensiones o agrupar productos. Uso en las industrias forestales, envases, agrícolas, materiales para la construcción y para todo tipo de productos que requieran una protección de calidad en sus traslados y acopios.

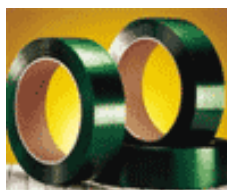


Fig. III.11 Fleje de PET

Debido a que es plástico, es resistente a la humedad y por consiguiente no es afectado por la oxidación que pudiera ocurrir con el acero. Resiste temperaturas entre los -30°C y 90°C , también a rayos Ultra Violeta UV (Hasta 5 años bajo exposición intensiva al sol).

**PARTE EXPERIMENTAL**

A continuación se muestra la secuencia que se tuvo para el desarrollo de la parte experimental de esta tesis. **Ver Diagrama 1.**

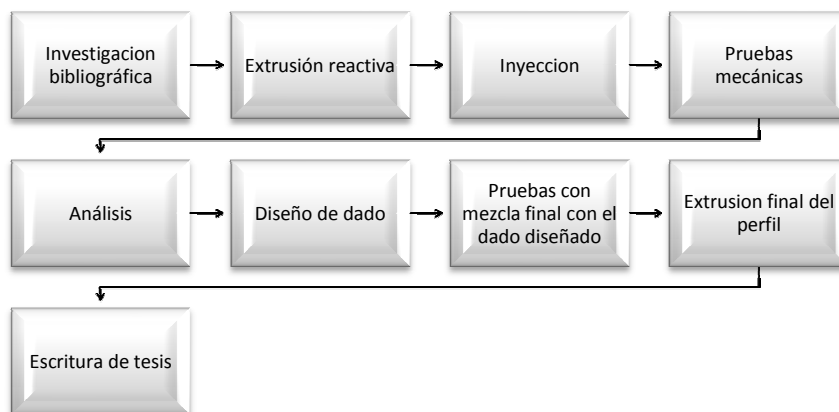


Diagrama 1. Secuencia general para la parte experimental.

1. MATERIAS PRIMAS Y REACTIVOS QUÍMICOS UTILIZADOS, para la *caracterización de la mezcla PET reciclado-PEAD.*

POLÍMEROS.

- Politereftalato de etileno virgen (PET-V)
- Politereftalato de etileno reciclado-botella (PET-R)
- Politereftalato de etileno reciclado-fleje (PET-F)
- Polietileno de alta densidad (PEAD)
- Indicadores (Pigmento)

REACTIVOS QUÍMICOS.

- Acetona
- Carbonato de calcio
- Arcilla
- Anhídrido Maléico (MAH)
- Benzoilo peróxido (BPO)

2. EQUIPO UTILIZADO para la *caracterización de la mezcla PET reciclado-PEAD.*

- * Extrusor doble husillo cónico contrarrotatorio con longitud de husillo de 331 mm, diámetro inicial de 31.1 mm y diámetro final de 19.7 mm. Barril con diámetro inicial de 31.7 mm, diámetro final de 20 mm y diámetro exterior de 34.9 mm.
- * Máquina de moldeo por inyección, con un diámetro de husillo de 25 mm y una relación L/D=20.
- * Deshumidificador provisto de malla molecular.
- * Molino de cuchillas de baja velocidad.
- * Máquina de pruebas universales. Para los ensayos de tensión se utilizó la norma ASTM D638.
- * Máquina granuladora.
- * Balanza
- * Sierra eléctrica
- * Sierra de Taller
- * Microscopio electrónico de barrido modelo JSM-70, con un equipo analizador de imágenes.
- * Equipo para medición de Impacto Izod fabricado en el IIM-UNAM, bajo la norma D256-97.
- * Equipo para recubrir las muestras (dorado de muestras).

3. DIAGRAMA DE PROCESO

FA-101 Tanque de acetona	BA-101 Balanza-banda alimentadora Arcilla	MA-101 Mezclador aletado	PA-103 Paquete silos Polímeros
SA-101 Jaladora	PA-101-Paquete silos poli Secos	OA-103 FEM	TA-103 Silo de MAH c/molino
TA-101 Silo de Arcilla	BA-102 Balanza-banda alimentadora BPO	MA-102 Mezclador	BA-106 Banda transportadora
TA-102 Silo de BPO	BA-103 Balanza-banda alimentadora MAH	EA-101 Deshumidificador	PA-102 Paquete silos mezclas
DA-101 Extrusor	BA-104 Balanza-banda alimentadora mezcla	OA-102 Impacto	OA-101 INSTRON
SB-110 cortadora	BA-105 Balanza-banda alimentadora inyectora	DA-102 Inyectora	FA-101 Tina
CA-101 peletizadora			

DIAGRAMA DE PROCESO PARA MÉTODO EXPERIMENTAL.

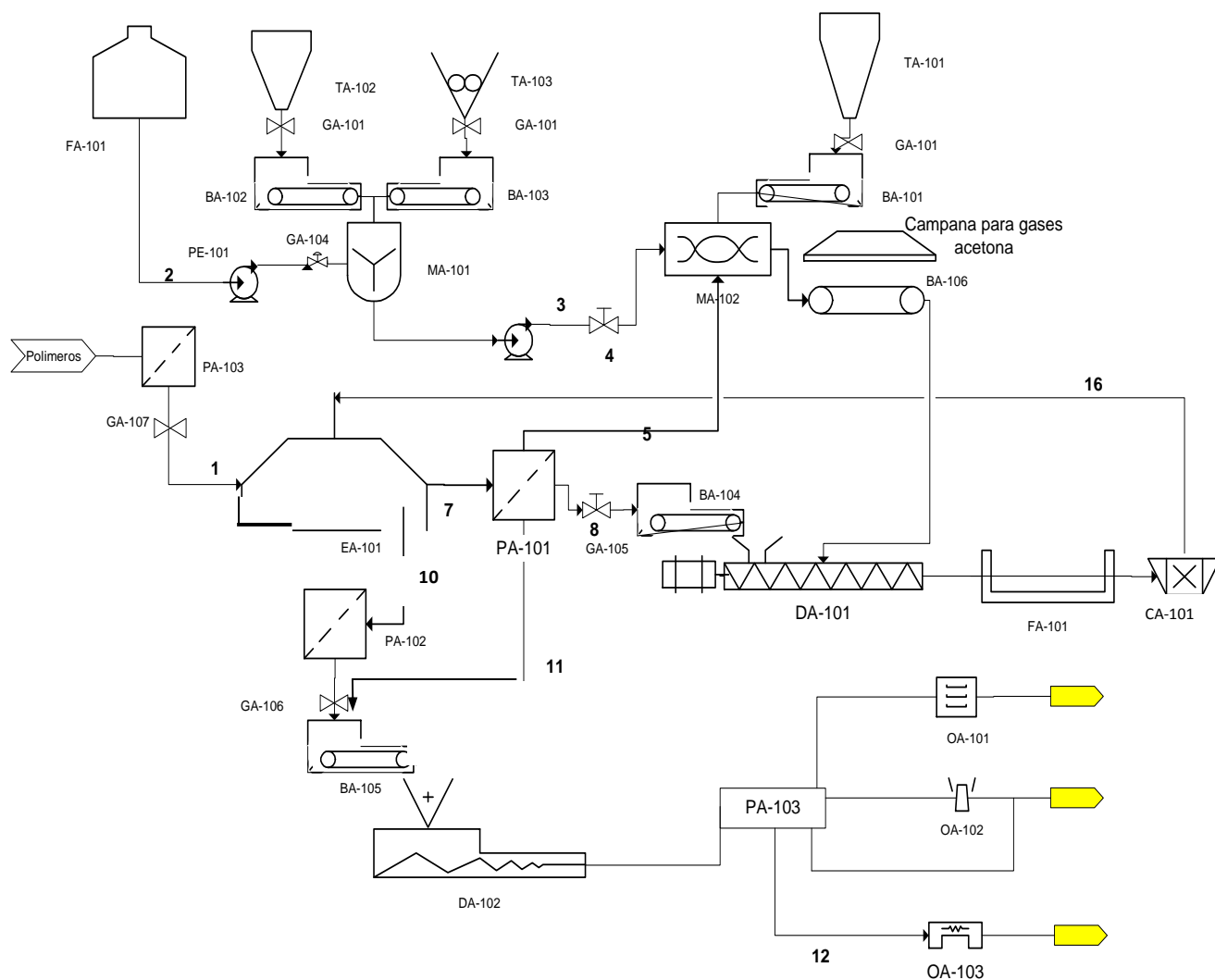
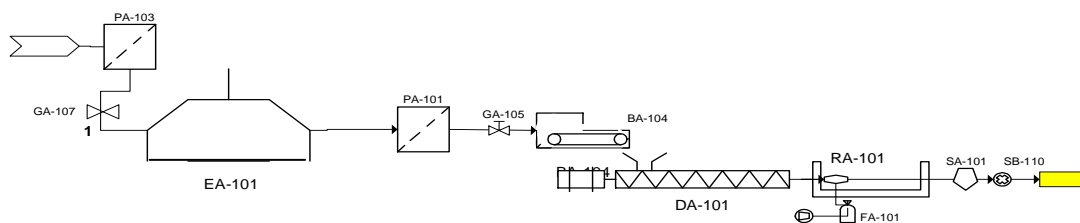


DIAGRAMA DE PROCESO PARA EXTRUSIÓN DE PERFIL TUBULAR.



3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Primeramente se tiene PA-103, Paquete de Silos de materia prima (polímeros), cada uno de los silos tiene almacenado uno de los materiales los cuales son PET-V, PET-F, PET-R y PEAD. Cada silo tiene una válvula controlada por un sistema automático que se abre dependiendo del requerimiento o el tipo de prueba. Los polímeros son llevados a través de la línea 1 al EA-101, Deshumidificador, donde se elimina la humedad del material. Después de secar el material son dirigidos por la línea 7 al PA-101, Paquete de Silos de polímeros y mezclas, en éste se encuentran silos tanto para la materia prima y mezclas, entonces del silo de PEAD es desviada una determinada cantidad por la línea 5 a la zona de injerto.

Con ayuda de una bomba y controlando con una válvula se lleva la acetona del FA-101, Tanque de acetona, a través de la línea 2 al MA-101, Mezclador con Aletas; donde también se alimenta BPO por medio de BA-102, Balanza-banda alimentadora de BPO y BA-103, Balanza-banda alimentadora de Anhidro Maléico; las cuales son alimentadas por TA-102, Silo de BPO, y TA-103, Silo de Anhidro Maléico respectivamente. Después de una buena agitación es bombeado el líquido por la línea 3 al MA-102, Mezclador, donde se está administrando el PEAD; si la prueba lo requiere también se alimenta arcilla por medio de BA-101, Balanza-banda alimentadora de arcilla, la cual es alimentada por TA-101, Silo de arcilla; después de mezclar lo suficiente y que los gránulos estén cubiertos de la solución

se transportan por BA-106, Banda transportadora que cuenta con una campana para extraer los gases del acetona y posteriormente recuperarlos. La BA-106 alimenta a DA-101, Extrusor doble husillo. Al salir DA-101 pasa a FA-101, Tina de enfriamiento, y posteriormente al CA-101, Peletizadora; la cual es usada también como sistema de tiro. El producto obtenido es enviado por la línea 16 al EA-101 para ser secado y después colocado en uno de los silos del PA-101, ya que se utilizara en las mezclas de polímeros para compatibilizar.

Ya que se tienen todas las materias primas en el PA-101, por medio de válvulas colocadas en cada silo y controlando su apertura de manera automática dependiendo del requerimiento, utilizando BA-104, balanza-mezclador-banda alimentadora, alimenta a DA-101, posteriormente pasar por FA-101 y por CA-101, donde el producto obtenido de las mezclas es enviando por la línea 16 a secar.

Las mezclas obtenidas anteriormente ya secas, son enviadas por la líneas 10 al PA-102 que alimentan a BA-105, Balanza-Banda alimentadora de mezclas, esta banda también es alimentada por el PA-101 por materia prima como PET-V, PET-F y PEAD. BA-105 alimenta a DA-102, Inyectora, las probetas obtenidas son enviadas a PA-103, Paquete de preparación de probetas, donde este paquete cuenta con: sierra grande, sierra eléctrica, eliminador de rebaba y equipo para recubrir muestra, cada muestra es preparada según requerimientos. De PA-103 se envían las probetas planas a OA-101, Prueba de Tensión; y las cuadradas a OA-102, Prueba de Impacto. Los desechos de OA-102 son reenviados a PA-103 para obtener las muestras y prepararlas para OA-103, Microscopia electrónica de Barrido. Finalmente los resultados de OA-101, OA-102 y OA-103 son enviados a análisis para aprobación o corrección de la mezcla final que se utilizara para la extrusión del perfil.

Para el caso de extrusión del perfil se empieza con la zona de injerto para obtener el PEAD-g-MAH (PEAD injertado) , comenzando por PA-103 sólo con PET reciclado y PEAD pasando a EA-101 dirigiendo el producto a PA-101 donde ya se encuentra el PEAD-g-MAH, es enviada la materia a BA-104 y posteriormente a DA-101 donde es recibido el producto por RA-101, Dado formador o Zona de

calibración, que cuenta con una trampa de agua y pasa por FA-101 jalado por SA-101 y cortado por SB-110, Cortadora.

La **Tabla IV.1** muestra el nombre del equipo a nivel industrial y el sustituto utilizado en el laboratorio.

Tabla IV.1 Equivalentes de equipo.

Identificación	Nombre de equipo	Sustituto
TA-103	Silo de Anhídrido Maléico con molino de rodillos a la salida.	Mortero o bolsa doble de plástico y martillo para moler.
BA-101, 102, 103, 104	Balanza-banda alimentadora	Balanza granataria
MA-101	Mezclador con aletas	Vaso de precipitado y espátula
MA-102	Mezclador	Bolsa de plástico grande
PA-101, 102, 103	Paquete de silos para cada polímero	Bolsa de papel
BA-106	Banda transportadora	Se abrió la bolsa y esparció para que se evapore la acetona, recuperación de gases en una campana.
SA-101	Sistema de tiro	Con la mano
SB-110	Cortadora	Serrucho o alicatas.

4. DESCRIPCIÓN, INDICACIONES Y PRECAUCIONES EN LA EXPERIMENTACIÓN, para la *caracterización de la mezcla PET reciclado-PEAD.*

Se hace una breve descripción por separado de los métodos experimentales, indicaciones y precauciones que se deben tener desde el acondicionamiento de la materia prima, extrusión reactiva, inyección, pruebas mecánicas, diseño del dado, equipo adicional y extrusión de perfiles.

4.1. Secado del material

Para llevar a cabo este proceso, se utiliza el deshumidificador. Como ya se mencionó en las propiedades de los polímeros a utilizar, el PET tiende a absorber gran cantidad de humedad lo que promueve su degradación. El secado se debe llevar a cabo por cada lote que se va a utilizar a lo largo de la prueba, posteriormente se tendrá que secar más o de nuevo después de 24 h, esto es para evitar cualquier variación y así tener una repetitividad en el proceso.

- Se coloca la materia prima a utilizar en bolsas de papel independientes y etiquetadas. Se introducen al deshumidificador.
- Para el PET es recomendable secar por 12 h a 110°C y el PEAD requiere menos tiempo (no afecta que sea secado un mayor tiempo).
- En el momento de retirar el material colocarlo en bolsas de plástico cerradas, para evitar que se absorba humedad mientras se va a utilizar.

NOTA: Existen fuentes de humedad externas una de esas es la trampa de agua del aire de enfriamiento del extrusor, NO OLVIDAR VACIARLA.

4.2. Injerto del MAH en PEAD

- A pesar que el PEAD no tiene una alta absorción de agua, es importante secarlo.
- Colocar en una bolsa doble de plástico MAH y machacar hasta obtener un polvo fino sin piedras. Es recomendable hacerlo en bolsa cerrada y no en mortero debido a que el MAH es un polvo muy fino e irritable. Ver el Ficha de seguridad en el anexo 1.
- En un vaso de precipitado pesar el MAH y BPO
 - * Recordar utilizar mascarilla, guantes y lentes.
- Añadir poco a poco acetona utilizando sólo la necesaria para disolver el MAH y BPO, cuidando también que se tenga un volumen suficiente para mojar los gránulos de polímero, siguiente paso, agitar cuidadosamente.
- Verter la solución al PEAD y mezclar perfectamente checando que todos los gránulos del PEAD tengan contacto con la solución.
- En caso de utilizar una carga como carbonato o arcilla, se deben secar previamente en una parrilla hasta observar un cambio de temperatura y posteriormente de pesar lo necesario y añadir a los gránulos. Este paso se realiza con cualquier aditivo extra que necesitemos, de esta manera el aditivo se pegara a los gránulos por la solución.

- Dejar ventilar el PEAD para evaporar la mayor cantidad de acetona.
- Realizar la extrusión reactiva.

4.3. Extrusión reactiva.

- Encender el extractor.
- No olvidar vaciar la trampa de agua del aire del sistema de enfriamiento del extrusor.
- Abrir las llaves de aire y agua (no en exceso para evitar desperdicio).
- Encender el extrusor, motor y calibrar. Posteriormente fijar las temperaturas para extrudir.
- Es importante que se deje fluir primero un poco de polímero para limpiar, y así evitar la contaminación de nuestra muestra. Al igual que no olvidar cambiar el agua de la tina de enfriamiento.
- Verter el material en la tolva.
- Cuidar las temperaturas para evitar la degradación del material o defectos. En este caso ya se tienen las temperaturas adecuadas para el injerto obtenidas de estudios anteriores.^[57]
- Al momento de extrudir nuestra muestra, jalar el material extrudido y hacerlo pasar a través del agua y conectarlo al granulador. La velocidad con la que se jala es muy importante, debe ser constante y la necesaria para obtener un diámetro del hilo medio y así tener un gránulo uniforme y no solo trozos de material.
- Utilizar equipo de seguridad: guantes, mascarilla, lentes.

4.4. Inyección.

- Encender el extractor.
- Prender el equipo de enfriamiento de agua: 1^{ro} bomba, 2^{do} condensador. Para apagarlo es inverso.
- En el caso del PET se trabaja molde frío. Abrir la válvula de enfriamiento.

- Prender inyectora. Programarla con: Temperatura de aceite, husillo. La temperatura del husillo debe ser exacta para fundir y no degradar, esta se puede obtener del ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- Purgar la inyectora varias veces con polietileno para limpiar.
- El PET reciclado es muy fluido debido a la degradación que sufre y se cristaliza muy rápido. Para evitar que se tape la inyectora es recomendable que al terminar de inyectar se retire un poco el dosificador de la entrada del molde.
- Verificar que se desmolde por completo y que no queden residuos.

4.4.1. Recomendaciones para la calibración de la inyectora.

Primero se calibró la inyectora con PET-V y de esta manera se encuentran las mejores condiciones de operación para el PET. Para fijar las condiciones necesarias se deben variar poco a poco los parámetros de temperatura, dosificación y tiempo de enfriamiento hasta obtener probetas de PET-V amorfas. Ver **Figura IV.1**

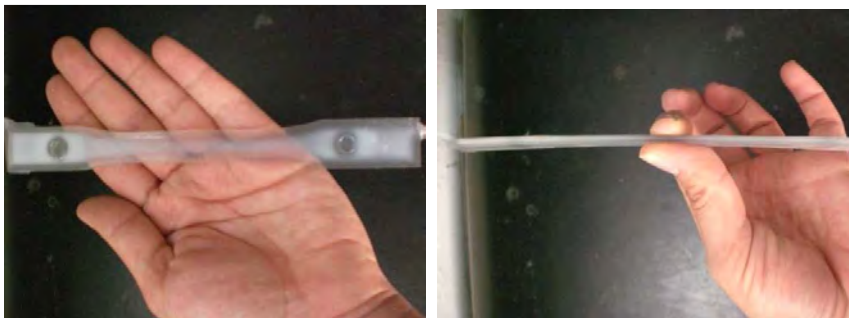


Figura IV.1 Probeta de PET-V amorfo.

Al momento de variar los parámetros de la inyectora hay varios fenómenos en los que podemos basarnos. Estos son algunos:

- 1° No dejar demasiado tiempo el material en el husillo debido a que el PET se degrada muy fácilmente.
- 2° Para variar las temperaturas una manera de notar si estamos provocando degradación es fijarse en la presión de inyección, es decir si se

degrada el PET pierde viscosidad y por lo tanto existirá una gran diferencia entre la presión de inyección que fijamos y la que se tiene en el momento.

3° Otra forma de evitar la degradación es disminuyendo las revoluciones de alimentación, ya que el proceso óptimo de inyección es: alimentación e inyección inmediata. De esta manera se le disminuyen las revoluciones de alimentación para que se aproveche el tiempo en que se enfría la inyección anterior y así el material no está tanto tiempo en el cañón calentándose.

4° Entre más rápido se enfría el PET se obtiene más amorfo. Pero se debe llegar a un equilibrio no olvidando el punto anterior.

4.5. Prueba mecánica de tensión.

- Llevar a cabo 5 especímenes por muestra.
- Programar el equipo.
- Ajustar la probeta, cuidando que no se tuerza y esté bien ajustada.
- Aplicar deformación constante.

4.6. Prueba de impacto.

- De la inyección se obtiene una pieza alargada cuadrada como se muestra a continuación **Figura IV.2**. Estas piezas deben cumplir con la norma ASTM 256-97.



Figura IV.2 Pieza obtenida de inyección para prueba de impacto.

- La pieza obtenida se tiene que preparar para realizar la prueba de impacto. Se realizara con 5 especímenes por cada muestra, las piezas obtenidas se

partirán a la mitad **Figura IV.3**, y posteriormente se le hará una ranura a la mitad con ayuda de una sierra eléctrica, **Figura IV.4**.



Figura IV.3 Zona media



Figura IV.4 Ranura con sierra

- Ya que se tienen preparadas las piezas ajustar el péndulo de impacto a un ángulo de 60°.
- Poner el espécimen entre las mordazas, con la ranura en dirección al impacto.
- Soltar el martillo. La energía necesaria para impactar y romper la pieza se verá reflejada en el ángulo final. Medir el ángulo final.
- Guardar una muestra de cada prueba y marcar la dirección de la fractura para utilizarla en la microscopía electrónica de barrido.

5. PRUEBAS REALIZADAS, PROPORCIONES Y CONDICIONES.

Se realizaron una serie de mezclas con diferentes porcentajes de PEAD funcionalizado y PET, usando también mezclas de polímeros puros para fines de comparación de propiedades. Las proporciones utilizadas para el injerto de MAH se muestran en la **Tabla IV.2**:

Tabla. IV-2 Proporción de mezcla para injerto de MAH

Material	Cantidad	
PEAD	100 g	
MAH	1.5 g	1.5 phr
BPO	0.1 g	0.1 phr
Arcilla*	5 g	5 phr

*Dependiendo de la prueba

5.1. PRUEBAS REALIZADAS.

Se llevo cabo la extrusión y posteriormente el material extrudido se procesa por inyección. Las mezclas de PET y aditivo se prepararon con las siguientes relaciones:

Primera etapa de pruebas ver **Tabla IV.3:**

En este caso se utilizo un aditivo **AX (Lotader AX8840)** este aditivo ya fue probado con otros polímeros diferentes al PET, dando resultados favorables [17]. Por lo que se comprobara si es efectivo para el PET reciclado mejorando sus propiedades.

Lotader AX 8840: Copolímero al azar de etileno (**E**) y glicidil metacrilato (**GMA**), contiene 8% en peso de GMA, presenta un índice de fluidez de 5 g/10mm y punto de fusión alrededor de 109°C. Estructura ve r **Figura IV.5**

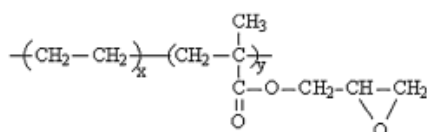


Figura IV.5 Estructura del Lotader AX8840

Tabla.IV.3 Proporciones de PET y aditivo AX.

Concentración	Peso
600 g PET-R + 3 phr de AX	600 g PET-R + 18g de AX
600 g PET-V + 3 phr de AX	600 g PET-V + 18g de AX
600 g PET-R+ 3 PHR Az +20 phr carbonato	600 g PET-R + 18 g Az + 120 g carbonato
600 g PET-V+ 3 PHR Az +20 phr carbonato	600 g PET-V + 18 g Az + 120 g carbonato

Segunda etapa de pruebas ver **Tabla IV.4:**

Ésta se llevó a cabo con un dado para película común, tubular y con uno para hilos; de esta manera se observa si es posible extrudir la mezcla, es decir que tan manejable es.

Tabla IV.4 Formulación para determinar manejabilidad.

Peso total mezcla	PET-R		PEAD-g-MAH	
	%	Peso (g)	%	Peso (g)
600g	70	420	30	180
	60	360	40	240

Tercera etapa de pruebas ver **Tabla IV.5**:

Tabla IV.5 Formulaciones para prueba de determinación del mejor porcentaje.

% de material para cada mezcla de 600g					
	PET-V	PET-F	PEAD	PEAD-g-MAH	PEAD-g-MAH, Arcilla
1	100				
2			100		
3		100			
4	70		30		
5	60		40		
6	70			30	
7	60			40	
8	70				30
9	60				40
10		70	30		
11		60	40		
12		70		30	
13		60		40	
14		70			30
15		60			40

5.2. CONDICIONES DE OPERACIÓN

EXTRUSIÓN

La extrusora cuenta con 4 zonas de calentamiento:



T1 °C= zona de alimentación

T2 °C= zona de compresión

T3 °C= zona de dosificación

T4 °C= boquilla o dado

Para realizar el injerto ver **Tabla IV.6**.

Tabla IV.6 Perfil de temperatura para el injerto

	Velocidad husillo RPM	T1	T2	T3	T4
PEAD-g-MAH	50	160°C	190°C	200°C	210°C

Para las diferentes pruebas se manejo ver **Tabla IV.7**


Tabla IV.7 Perfil de temperatura para todas las pruebas.

Velocidad husillo RPM	T1	T2	T3	T4
60	220°C	230°C	240°C	250°C

INYECCION


Para la 1° prueba y 2° prueba se realizó una calibración, los datos obtenidos fueron, ver **Tabla IV.8**.

Tabla IV.8 Condiciones de operación de inyectora 1° y 2° prueba a.

				
	T4	T3	T2	T1
Temperaturas °C	253	260	248	241
Presión de inyección [psi]	14993			
Velocidad de inyección [ccm/s]	30			
Presión de post [psi]	12			
Tiempo de enfriamiento [s]	50			
Revoluciones [RPM]	32			
Retroceso [ccm]	90			
Parada de dosificación [ccm]	72			
Temperatura de molde °C	8			

Para la 3° prueba, ver **Tabla IV.9**

Tabla IV.9 Condiciones de operación de inyectora 3° prueba.

				
	T4	T3	T2	T1
Temperaturas °C	240	248	258	250
Presión de inyección [psi]	14993			
Velocidad de inyección[ccm/s]	30			
Presión de post[psi]	595			
Tiempo de enfriamiento[s]	80			
Revoluciones[RPM]	30			
Retroceso [ccm]	91			
Parada de dosificación[ccm]	72			
Temperatura de molde °C	8			

6. DISEÑO DADO-EXTRUSOR

6.1. MATERIALES

Construcción de:

Dado extrusor

2 Barras de acero inoxidable: 5.08 cm, 2.54 cm

1 Placa: 0.635 cm

Torpedo:

1 Barra de acero inoxidable 2.54 cm

1 Cortador vertical de 0.6 cm de carburo de Tungsteno de cabeza redonda con 4 gabilanes.

Dado Formador

2 Tubos de aluminio: 5.08 cm, 2.54 cm

- 1 Placa de aluminio: 0.635 cm
- 1 Boquilla de 0.6 cm

Equipo adicional

Tina de enfriamiento

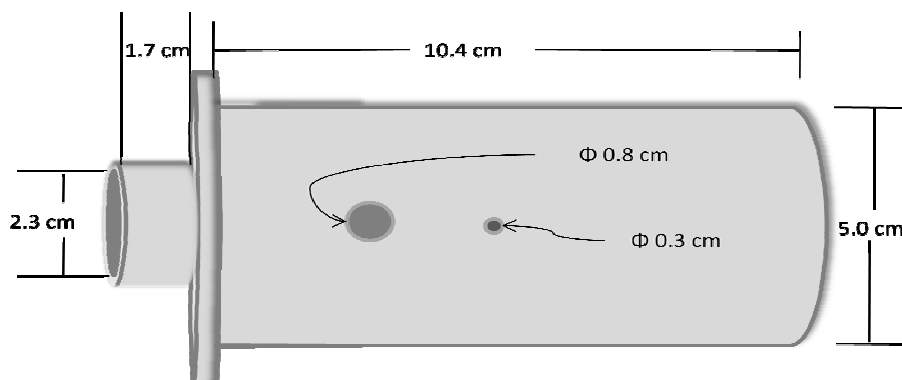
- 1 Lámina de acero galvanizado 130 cm X 100 cm
- 1 Tubo de cobre 0.95 cm
- Placa de hule
- Mangueras

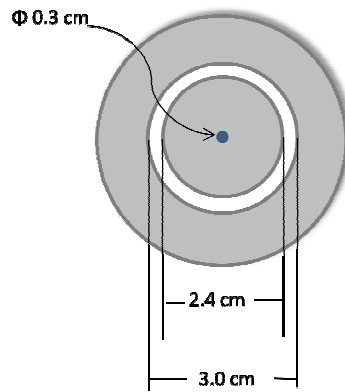
Trampa de agua

- 1 Recipiente cerrado
- 1 Tubo de cobre 0.95 cm
- 1 Llave para purga
- Mangueras

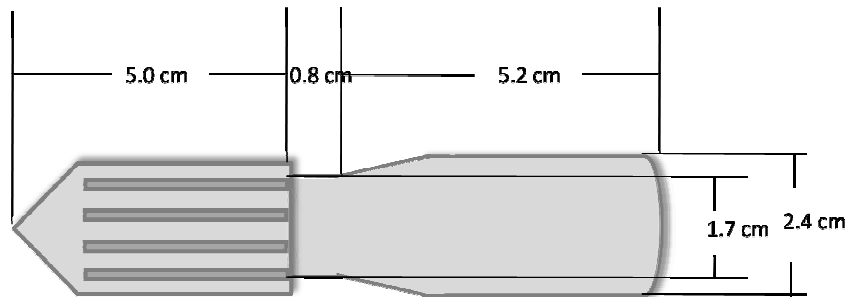
6.2. DIBUJOS DEL DISEÑO

Cabezal del extrusor:

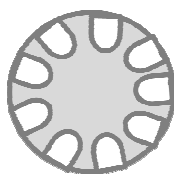


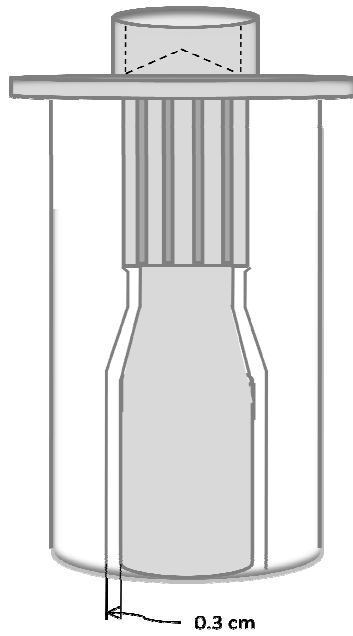


Torpedo:

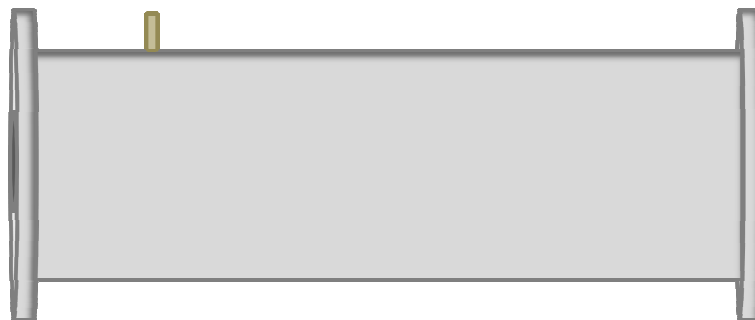


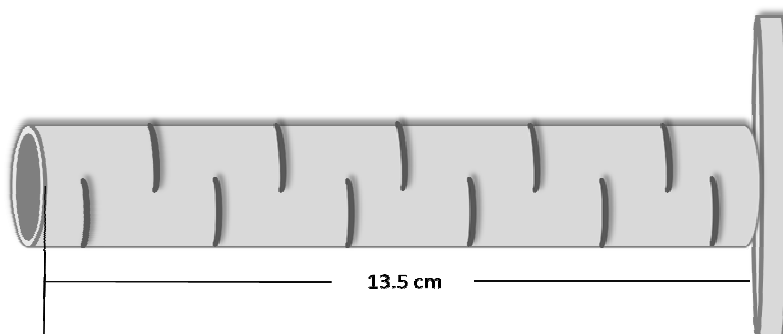
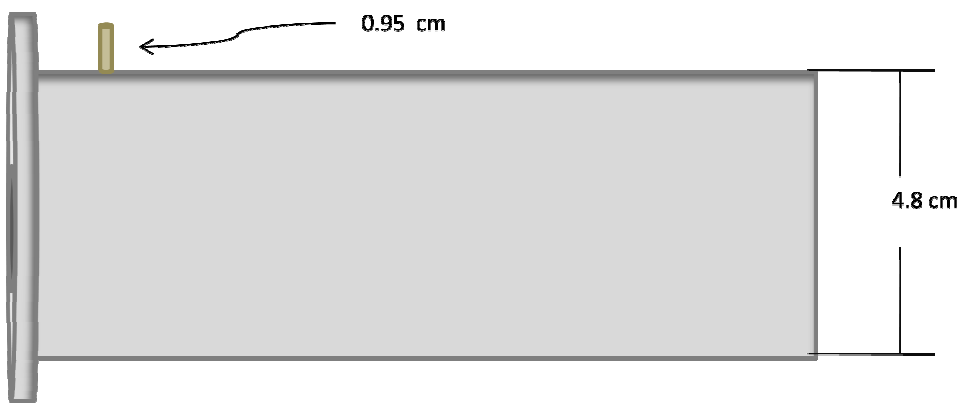
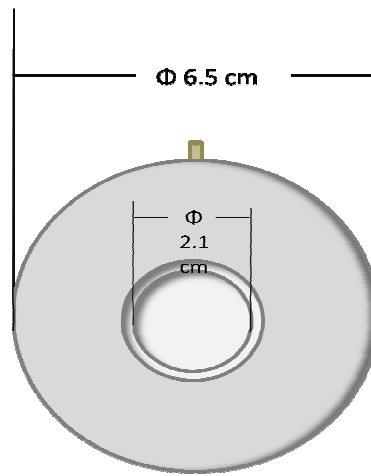
Maquilado con 9 canales.





Dado formador o calibrador





6.3. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE DIFERENTES ZONAS DISEÑADAS PARA LA EXTRUSION DE UN PERFIL TUBULAR.

Dado de extrusor.

Con el fin de extrudir un perfil hueco o tubo, se construyo un cabezal para ajustar la forma y las dimensiones del tubo o perfil requerido al momento de salir del extrusor.

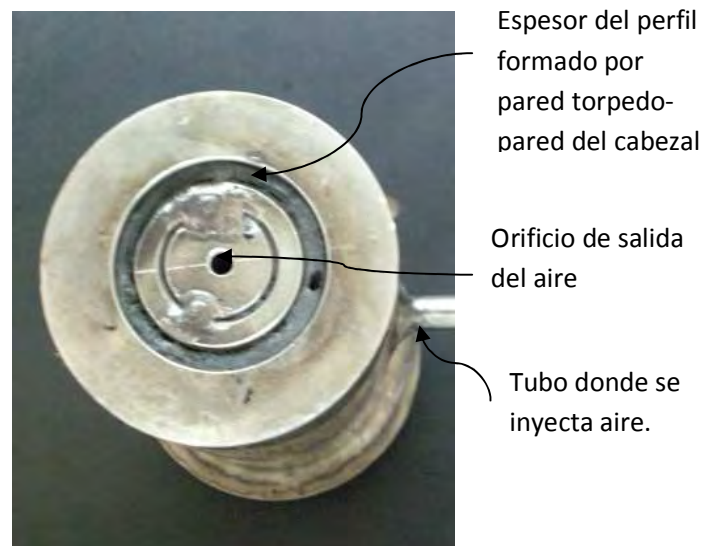
Con una barra se maquinó el torpedo, éste como bien lo dice su nombre tiene forma de torpedo. La cabeza de éste que está a la salida del extrusor tiene forma cónica al inicio 0.5 cm, lo que sirve para distribuir el material plástico fácil e uniformemente alrededor de él, posteriormente cuenta con 9 canales alrededor de su diámetro de 2.54 cm por 5 cm de largo por los que fluye el material de tal forma que no se tenga variaciones en el flujo y que sea lineal para evitar agujeros en el perfil, después de la cabeza se reduce el diámetro a 1.7 cm por 0.8 cm de largo, finalizando con 34° de ángulo para abrir el diámetro a 2.4 cm, para que forme con la pared interna de la pieza **externa** el espesor del perfil de 0.3 cm.



Para la pieza **externa** se utilizó una barra de 5.08 cm la cual se maquinó de tal manera que quedara hueca y poder introducir el torpedo, esta pieza tiene justo del largo del torpedo, la pieza no es simplemente hueca. El diámetro interno de la

parte inferior, donde saldrá el perfil, será de 3.0 cm por 4.2 cm de largo, después a lo largo de 1 cm con un ángulo de 34° se reduce el diámetro a 2.3 cm, este diámetro se mantendrá por 0.8 cm de largo hasta donde se maquinó un chaflán para permitir un buen flujo del material que viene del extrusor, ya que de lo contrario se bloquearían los canales del torpedo. Finalmente el diámetro y largo de la parte superior es exactamente la misma que el cabezal del torpedo.

Para que se tenga un buen llenado, cuando se dirija el material al **dado formador**, se necesita ayudar al material fundido soplando aire por el centro del cabezal y así facilitando a que se pegue a las paredes internas del **dado formador**, por vacío. Este aire, como ya se mencionó, se inyectará por un instante por el centro del cabezal. Para lograr lo anterior se perfora la pieza exterior del cabezal por la parte lateral hasta llegar al torpedo y se prosigue hasta la mitad del diámetro de éste, se introduce un tubo a presión de \varnothing 0.32 cm, debe ser a presión para evitar que se salga o que el material fluya a su alrededor e interior y se tape. También, se perforará a lo largo del torpedo, a la mitad del diámetro, hasta llegar a la perforación anterior y así formar una conexión en forma de codo para que circule el aire. El tubo por el que se inyecta el aire posteriormente debe ser cortado al ras del cabezal para poder introducir la tuerca de ajuste al extrusor.



En la parte contraria a la salida del perfil se le soldó una placa redonda y una pieza hueca, esto servirá para acoplar el cabezal al extrusor. Esta pieza deberá tener de diámetro interno el de la cabeza del torpedo y el diámetro externo el del extrusor. Todas las piezas son de acero inoxidable 316 para que soporte la oxidación y desgaste.

Donde se ajusta el cabezal Ø2.8



Sin cabezal



Cabezal

Tuerca que ajusta el cabezal.

Dado formador o zona de calibración.

Está formada por 2 piezas, una interna que le dará forma y las medidas del perfil y otra externa que formará una cámara de vacío.

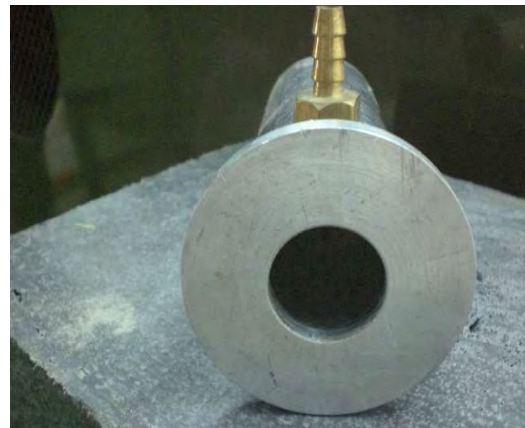
La pieza interna es un tubo de aluminio con el diámetro interno igual al del diámetro externo del perfil o tubo. Al tubo se le hacen ranuras de la mitad del diámetro, dejando un tramo se le hace a la otra mitad del diámetro y así consecutivamente a todo el largo del tubo. Estas ranuras serán para que el vacío que exista, jale el material fundido que va por dentro del tubo a su pared interna.



La pieza externa es un tubo de aluminio con una boquilla para conectar vacío.



Las piezas quedaran concéntricas y se unirán a presión en cada lado de los tubos por una placa de aluminio con un orificio en el centro para permitir la entrada y salida del perfil. Ya que están sellados a presión, se le conectará el vacío y se formara una cámara de vacío entre los tubos. Este vacío jalará el material lo que le dará forma y la medida del tubo interno y así pasara por la zona de enfriamiento.

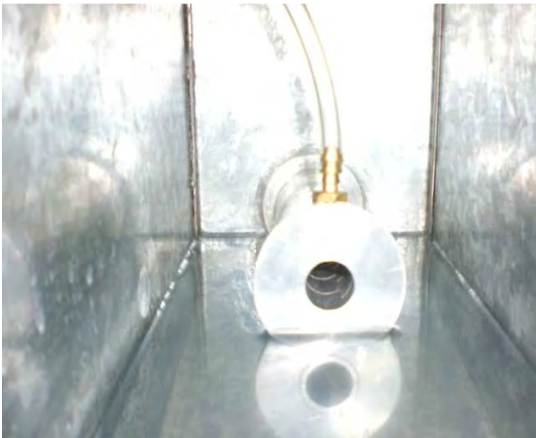
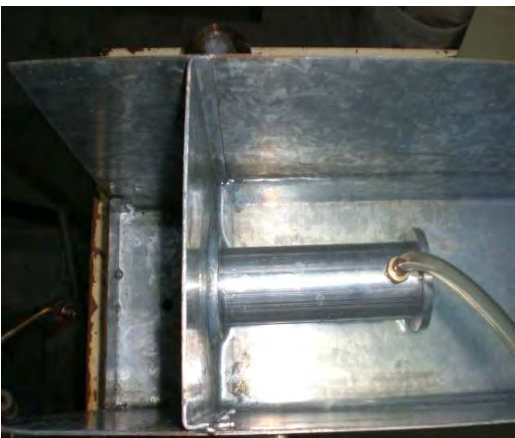


Tina o Zona de enfriamiento.

La tina tiene 120 cm de largo, 15 cm de ancho y 20 cm de alto. Esta es la zona de enfriamiento y dentro de esta tina se posicionará el dado formador, por lo que cuenta con dos orificios: el primero en el lado donde se colocará el dado, y el

segundo en el extremo contrario que será por donde el perfil salga. A este último orificio se le colocará un trozo de placa de hule que sirva como empaque. Para lograr un buen enfriamiento se necesita tener agua de enfriamiento a la misma temperatura y para lograr esto se circula el agua constantemente.

La tina tiene 2 mamparas donde se recibirá el agua que escurra por los orificios laterales. Es decir, el agua escurrirá en ambas mamparas y cuando entre el perfil en el **dado formador** se sellará el primer orificio con el mismo perfil y mientras llega el perfil al otro lado de la tina, que es la salida, la otra mampara recibirá el agua hasta que el perfil con ayuda del empaque sellará el segundo orificio, una vez que suceda esto con la salida continua del perfil ya no se tendrán escurrimientos.



Trampa de agua

Debido a que se tiene el dado formador dentro de la tina en contacto con el agua, y como ya lo mencionamos anteriormente se le aplica vacío y el tubo interno tiene ranuras, el agua se introduce y se va a la bomba de vacío. Por esta razón, fue necesario construir una trampa de agua que almacenará el agua que jale el vacío. La cantidad de agua disminuirá en el momento en que el perfil se pegue a la pared del tubo interno, ya que sellará las ranuras, y evitará el paso de agua.

La trampa de agua es un tanque sellado al cual se le adaptaron dos tubos de cobre, uno que llega casi al fondo del tanque y otro muy pequeño que sólo queda introducido unos 5 cm por dentro del tanque. El tubo que llega al fondo será el que se conectará al dado formador y el pequeño estará conectado a la bomba. También se le adaptó una válvula para romper el vacío y evitar quitar y poner mangueras.



NOTA: Para consultar los costos de la construcción y diseño de los dados, equipos auxiliares, materias primas y extrusión el perfil tubular. Ver **ANEXO IX**.



1. CARACTERIZACIÓN DE LA MEZCLA PET RECICLADO-PEAD

En esta sección, se exponen los resultados obtenidos en las diferentes pruebas, comentarios, análisis y observaciones pertinentes en el momento de la experimentación.

La primera etapa de pruebas tuvo como objetivo visualizar el comportamiento del PET, tanto el virgen como el reciclado, al adicionar un aditivo (Lotader AX 8840), el cual ya fue utilizado con otros materiales poliméricos dando buenos resultados ^[17]. El aditivo se mezcló con el PET-V y el PET-R para determinar la mejora en propiedades mecánicas de la mezcla PET-PEAD. Las proporciones con las que se mezclaron se muestran en la **Tabla IV.3** y los resultados obtenidos en la **Tabla V.1**

Tabla. V.1 Propiedades mecánicas obtenidas para las formulaciones de PET con aditivo AX

Muestras	Resistencia Tensión [MPa]	Resistencia carga última [MPa]	Módulo Young [MPa]	Tenacidad [MPa]	Deformación Fractura %	Resistencia al Impacto Izod. [J/m]
PET-V	55.7	38.6	1152	120	461	63.5
PET-V + AX	49.2	33.5	831	13.2	9.1	23.4
PET-R + AX	-----	-----	-----	-----	-----	-----
PET-V+AX+CaCO ₃	48.8	48.8	1016	2.2	9.3	15.1
PET-R+AX+CaCO ₃	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Los resultados de la primera etapa, ver **Tabla V.1** con el aditivo AX, no dieron los resultados esperados que era el aumento de propiedades mecánicas. Las pruebas con PET-V fueron exitosas físicamente, pero como se puede ver en la **Tabla V.1** cuantitativamente para la muestra PET-V + AX la resistencia al impacto disminuyó más del 60 % comparada con el PET-V, el módulo un 27 % menor al PET-V, tenacidad y la deformación a la fractura disminuyeron drásticamente. Por otro lado, el PET-R fue imposible de inyectar.

En un estudio realizado con anterioridad llamado “Estudio de la mezcla PET y PEAD compatibilizada por medio de grupos funcionales anhídridos” del Instituto de Investigación Materiales^[17], en donde buscaron la compatibilización a través de la funcionalización del PEAD con un injerto de anhídrido Maléico (MAH), utilizando el proceso de extrusión reactiva, se realizaron pruebas con diferentes porcentajes PET-PEAD para determinar la mejor proporción, de esta manera se concluyó que los porcentajes 70 % PET 30 % PEAD y 60 % PET 40 % PEAD eran los mejores.

La segunda etapa de pruebas, se realizó utilizando el mismo PEAD injertado del estudio mencionado anteriormente, con el porcentaje señalado en la **Tabla IV.4**. Se realizó, con fines de observación y comprobación del estudio anterior, se llevo a cabo extrusión para formar hilos, película y perfil tubular.

El resultado fue bueno y sí fue posible extrudir el material, fue manipulable y el PET-R aumentó la viscosidad razonablemente, con esto se comprobó que la compatibilización, es decir la funcionalización del PEAD para formar un extendedor de cadena, si funciona para mejorar las propiedades del PET-R y los porcentajes utilizados 60 % PET 40 % PEAD y 70 % PET 30 % PEAD son los mejores.

La tercera etapa de pruebas fue necesaria para determinar si la mezcla con arcilla, formando un nuevo compuesto, mejora aún más las propiedades. En esta etapa se cambio de PET reciclado de botellas por PET-F (PET de Fleje) que contiene en su mayoría restos de fleje (ver antecedentes), impurezas de PE y otros plásticos. Los ensayos de deformación se realizan a temperatura ambiente, ya que se trabajo trabajando con un material muy degradable y aplicar temperatura solo afectaríamos las propiedades.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la **Tabla V.2**:

Tabla V.2 Propiedades mecánicas de las diferentes muestras de PET y PEAD

# de muestra	Composición	Resistencia Tensión [MPa]	Resistencia carga ultima [MPa]	Módulo Young [MPa]	Tenacidad [MPa]	Deformación Fractura %	Resistencia al Impacto Izod. [J/m]
1	PET-V	55.7	38.6	1152	120	461	63.5
2	PEAD virgen	24.5	19.2	745	52.3	340	92.4
3	PET-F	44.6	28.9	1020	4.4	19	239.8
4	70 % PET-V + 30 % PEAD	27.5	27.5	903	0.5	3.9	22.2
5	60 % PET-V + 40 % PEAD	22.6	22.6	852	0.4	3.4	46.0
6	70 % PET-V + 30 % PEAD-g-MAH	39.7	39.7	903	1.8	7.2	195.8
7	60 % PET-V + 40 % PEAD-g-MAH	35.6	35.6	858	1.7	7.4	182.8
8	70 % PET-V + 30 %PEAD-g-MAH, Arcilla	32.4	32.4	886	0.9	4.9	56.3
9	60 % PET-V + 40 %PEAD-g-MAH, Arcilla	27.4	27.4	841	0.6	4.3	41.8
10	70 % PET-F + 30 % PEAD	21.3	21.3	920	0.3	2.8	19.4
11	60 % PET-F + 40 % PEAD	20.4	20.4	846	3.2	3.8	31.1
12	70 % PET-F + 30 % PEAD-g-MAH	32.9	32.6	891	1.1	5.3	59.2
13	60 % PET-F + 40 % PEAD-g-MAH	31.4	31.4	863	0.9	6.5	71.0
14	70 % PET-F + 30 %PEAD-g-MAH, Arcilla	26.5	26.5	947	0.5	3.5	33.3
15	60 % PET-F + 40 %PEAD-g-MAH, Arcilla	25.6	25.6	890	0.5	3.7	56.1

Posteriormente se realizó la microscopia electrónica de barrido para caracterizar morfológicamente las mezclas. Esta prueba sólo se realizó para el conjunto de muestras de la tercera etapa.

En la **Tabla V.2**, cada muestra cuenta con un número que utilizaremos de referencia.

- **Análisis de resultados para materiales puros.**

Como primera observación interesante es que las propiedades; de impacto, tensión, módulo de Young del PET-F (muestra # 3) son notablemente mejores a

las del PEAD (muestra #2). La morfología presentada en la **Figura V.1** es de un material virgen y se ve una fractura lisa (frágil). En el caso de la **Figura V.2**, donde tenemos la muestra #3, se puede comprobar que el PET-F contiene una mezcla de polímeros, ya que cuenta con una matriz y una fase dispersa la cual contiene partículas de diferentes tamaños. Dentro de la matriz se notan fracturas frágiles y dúctiles lo que nos indica la variabilidad de polímeros mezclados.

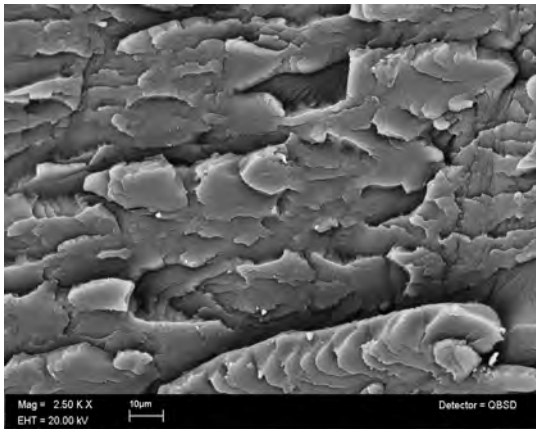


Figura V.1 PET-V (2.50 KX)



Figura V.2 PET-F (2.5KX)

- **Análisis de resultados para mezclas con PET-V**

Tomando los datos de la **Tabla V.2** de mezclas con PET-V, éste al ser su primer procesamiento no se degradó ni perdió sus propiedades mecánicas tan fácilmente lo que nos permitió estudiar el comportamiento de una mezcla no compatible, el grado de compatibilización que provoca el extendedor de cadena sin involucrar la degradación del PET reciclado y después el comportamiento al añadir arcilla. Primeramente para la resistencia a la tensión, la muestra #2 que es PEAD es menor comparando con la muestra #1 que es PET-V; al momento de ser mezclados dando las muestras #4 y #5 se provocó un abatimiento de las propiedades mecánicas ya que se obtuvieron dos fases, la matriz que es el elemento en mayor concentración y la fase dispersa con menor porcentaje, químicamente no existió ninguna interacción y provocó una gran debilidad al material, si se observan las **Figuras V.3 y V.4** (muestras #4 y #5 respectivamente)

la fase dispersa tiene un contorno perfectamente definido, no existe indicio alguno de interacción entre materiales, en el caso de la mezcla #4 las esferas de fase dispersa son de menor volumen ya que el porcentaje de PEAD es menor, estas crecerán al aumentar el porcentaje del material que forma la fase dispersa hasta el punto en que el porcentaje supere a la matriz y entonces se convertirá la fase dispersa en matriz (inversión de fases).

Otro fenómeno que podemos observar, que provocó la disminución de propiedades es la falta de uniformidad de fases, es decir si observamos la fase dispersa **Figura V.4**, tiene diferentes tamaños de partículas lo que nos provoca mayor o menor interacción de materiales en ciertas zonas, dependiendo del tamaño de partícula.

En la deformación se provocan zonas de concentrado de esfuerzo, estas zonas aumenta al ser mayor el volumen de las esferas del material inmisible, el esfuerzo al que se somete el material se concentran en un solo punto o zona de concentrado de esfuerzo hasta provocar la ruptura por el esfuerzo.

Para la mezcla #5 disminuye la resistencia a la tensión comparada con la muestra #4 por el aumento del porcentaje de fase dispersa provocando cavidades mayores por lo tanto menor resistencia.

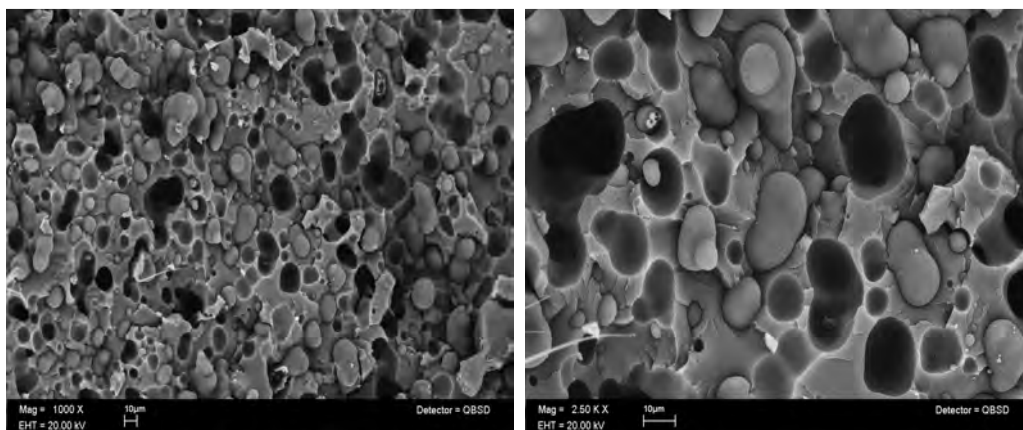


Figura V.3 70 % PET-V + 30 % PEAD (1000X)

Figura V.4 60 % PET-V + 40 % PEAD (2.50KX)

Para las muestras #6 y #7 aumentó la resistencia significativamente comparada con las muestras #4 y #5 debido a la compatibilización provocada por la funcionalización del PEAD, en estas mezclas **Figuras V.5 y V.6**, se ve un inicio de uniformidad entre los materiales, dando origen a una gran proporción de fracturas dúctiles. Al añadir arcilla, muestras #8 y #9 la resistencia disminuye comparada con las muestras #6 y #7 ya que la arcilla actúa como agente nucleante provocando una mayor cristalinidad. En las **Figura V.7.1 y V.8.1** se observan fracturas débiles provocadas por la arcilla, se notan unos aglomerados debido a que el método de exfoliación de la arcilla no es bueno. También se cuentan con algunas zonas de compatibilidad y fractura dúctil como se observa en la **Figura V.7.2 y V.8.2**, donde al interior de estas zonas aun tenemos pequeñas esferas del PEAD sin compatibilizar.

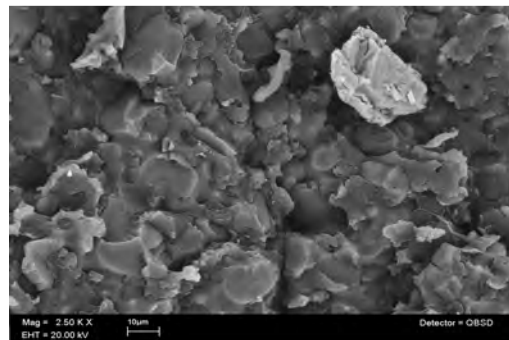
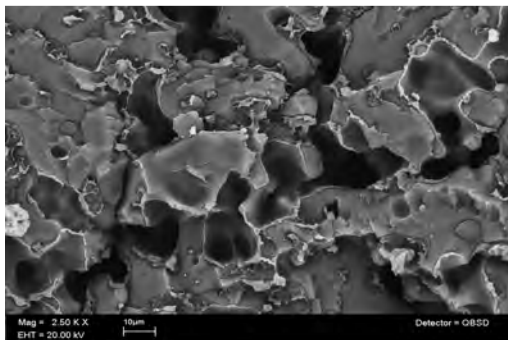


Figura V.5 70 % PET-V + 30 % PEAD -g (2.50KX)

Figura V.6 60 % PET-V + 40 % PEAD -g (2.50KX)

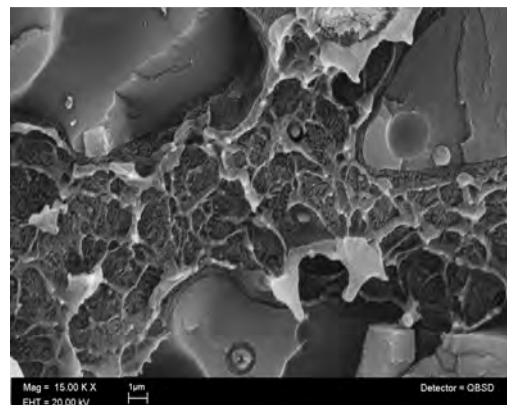
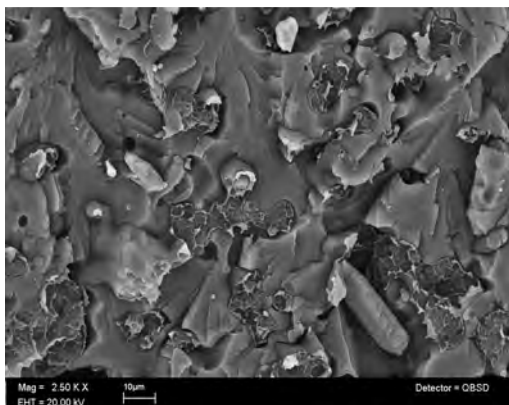


Figura V.7.1

70 % PET-V + 30 % PEAD -g, Arcilla (2.50KX)

Figura V.7.2

70 % PET-V + 30 % PEAD -g, Arcilla (15 KX)

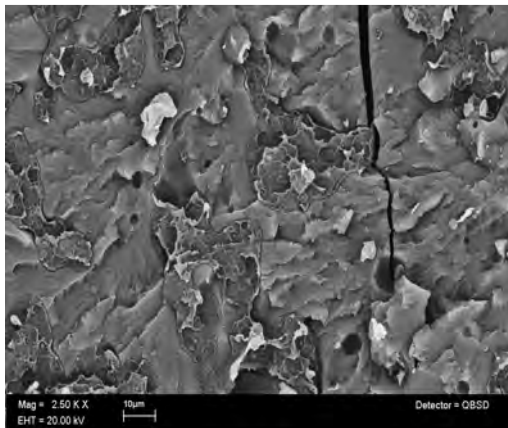


Figura V.8.1

60 %PET-V + 40 % PEAD -g, Arcilla (2.50KX)

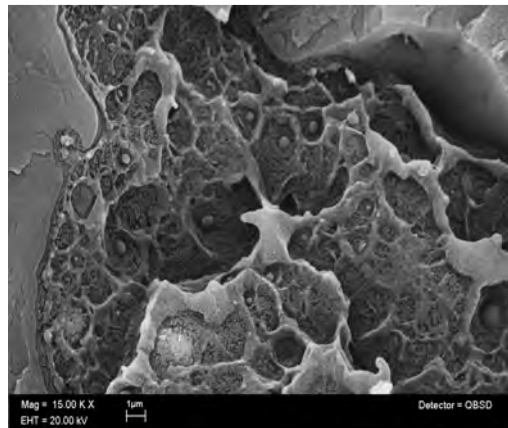


Figura V.8.2

60 %PET-V + 40 % PEAD -g, Arcilla (15 KX)

Observando los datos para el comportamiento del módulo de Young (ver **Tabla V.2**), considerando que el módulo es la relación de esfuerzo entre la deformación, se cumple la regla que a menor deformación mayor módulo ^[9], en general el comportamiento del módulo fue muy parecido para todas las mezclas.

La resistencia al impacto, se vio afectada principalmente por la falta de interacción de las fases ver **Figura V.4** en especial para las muestras #4 y #5, donde no existe compatibilización al momento del impacto las esferas de la fase dispersa son fáciles de separar de su cavidad en la matriz.

Para las mezclas #6 y #7 la resistencia al impacto aumenta significativamente más de 100 % del valor de las muestras #4 y #5, lo que nos confirmó la buena compatibilización.

- **Análisis de resultados para mezclas con PET-F**

Analizando las muestras con PET-F. Las propiedades del PET-F, como se observa en la **Tabla V.2**, son buenas comparadas con otro tipo de PET como el PET-R ya que este ni siquiera se logra inyectar, pero no son mejores a las del PET-V, la resistencia del PET-F disminuyó, muestra #10 y #11, al ser mezclado con el PEAD por no ser compatibles y por la degradación del reprocesamiento del PET-F. En la **Figura V.9** la fase dispersa es definida e inclusive se puede observar

la adición de los demás contaminantes que contenía el PET-F y de la muestra #11, **Figura V.10**, las fracturas dúctiles de los otros materiales contaminantes.

La resistencia de las muestras #12 y #13, **Tabla V.2**, aumenta en una considerable proporción comparadas con las #10 y #11, la acción compatibilizante del MAH en esta mezcla se puso de manifiesto por la reducción de tamaños de la fase dispersa de PET (**Figuras V.11 y V.12**) y las fracturas dúctiles provocadas.

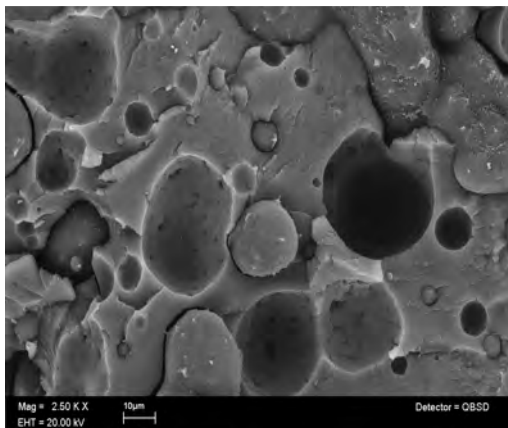


Figura V.9 70 % PET-F + 30 % PEAD (2.50 KX)

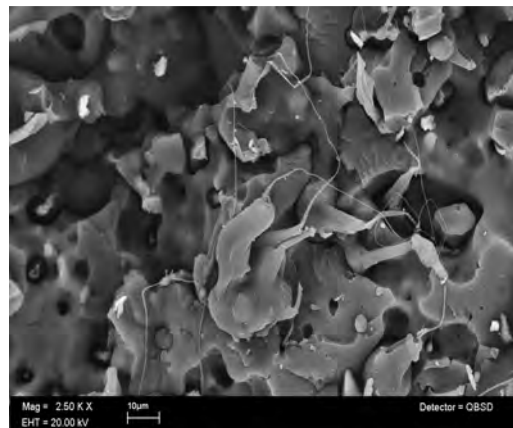


Figura V.10 60 % PET-F + 40 % PEAD (2.50 KX)

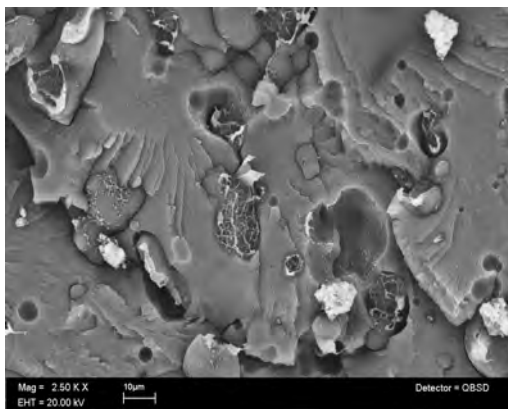


Figura V.11 70 % PET-F + 30 % PEAD -g (15 KX)

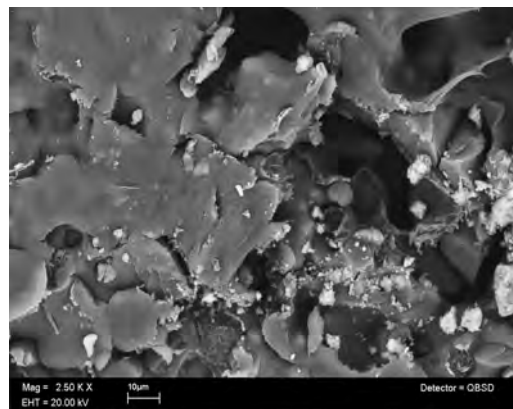


Figura V.12 60 % PET-F + 40 % PEAD -g (2.50 KX)

Para la propiedad de resistencia al impacto, utilizando PET-F, uno de los parámetros que más afectan es la cristalinidad, la resistencia se ve afectada por la adición de arcilla. Para estas muestras el comportamiento es inverso al de las

muestras con PET-V, es decir, a mayor contenido de PET-F menor resistencia. Esto se debe a que entre más alto el contenido de reciclado más alta la temperatura a la cual el material comienza a recristalizar ^[58].

- **Selección de la mejor mezcla en base los análisis anteriores y observaciones.**

La mezcla de 60 % PET-F 40 % PEAD-g-MAH (#13) fue mejor en resistencia al impacto pero no con una gran diferencia a 70 % PET-F 30 % PEAD-g-MAH (#12). Se puede resaltar que la compatibilidad es exitosa pero añadiendo arcilla los resultados no fueron los esperados. La **Tabla V.3** ayudará a elegir la mejor proporción para nuestro perfil.

Tabla V.3 Comparación de propiedades para diferentes porcentajes de mezcla PET-PEAD

%	# de Muestra	Resistencia a la tensión [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Tenacidad [MPa]	Deformación a la fractura %	Resistencia al impacto [J/m]
70-30	6	✓	✓	✓	✓	✓
60-40	7	✗	✗	✗	✓	✗
70-30	12	✓	✓	✓	✗	✗
60-40	13	✗	✗	✗	✓	✓

La **Tabla V.3** muestra cualitativamente el porcentaje con el cual se obtienen los mejores valores, 70 % PET-V 30 % PEAD-g-MAH es el mejor ya que cumple con las mejores propiedades mecánicas y con esa misma proporción se cumple para PET-F (#12).

Hay que tomar en consideración que el PET reciclado que se compra ya contiene un porcentaje de PEAD y esta pequeña proporción afectará las propiedades de impacto, así **escogiendo** la mezcla **70 % PET-F 30 % PEAD-g-MAH**, si adquirimos un PET muy contaminado con PEAD tendremos un margen del 10 % de error en PEAD contaminante para que no afecte las propiedades mecánicas.

2. RESULTADOS DE LA EXTRUSIÓN DEL PERFIL TUBULAR con la mezcla PET-PEAD seleccionada.

Para hacer la extrusión del perfil se eligió la mezcla 70 % PET 30 % PEAD-g-MAH, sin Arcilla. Sin embargo también se proceso para fines didácticos la mezcla de PET (material virgen y reciclado) con PEAD sin injerto. La extrusión del perfil fue de la siguiente manera. Ver **Tabla V.4**:

Tabla. V.4 Formulaciones para la extrusión del perfil.

Perfil	Mezcla	
	70 %	30 %
1	PET-V	PEAD
2	PET-V	PEAD -g-MAH
3	PET-F	PEAD
4	PET-F	PEAD -g-MAH

Las temperaturas que se muestran en la **Tabla V.5** son las obtenidas experimentalmente. Las condiciones obtenidas por medio de variación de la temperatura para la extrusión del perfil son:

Tabla V.5 Perfil de Temperaturas.

Perfil	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	RPM				Final
1	200	210	220	240	30	60	80	75	70
2	200	210	220	240	30	60	80	75	70
3	190	200	210	220	50	65	90	110	100
4	190	200	210	220	50	70	80	90	100

El perfil de temperatura es menor en comparación con el perfil utilizado en las pruebas de caracterización, porque en el momento en que se extruyo el perfil tubular las temperaturas altas que era casi imposible manipular el material para llevarlo a la zona de calibración.

Para la extrusión de este perfil se dimensionó el dado del extrusor y el dado calibrador en base al comportamiento de la mezcla, con el propósito de obtener la tubería requerida y mantener el proceso de extrusión lo más estable posible

La tubería debe ser enfriada suficientemente en el tanque de calibrado para ser jalada por la unidad de tiro o en la unidad de corte. En este caso era difícil enfriar rápidamente en una sección de sólo 10 cm, que es el dado formador, por lo que no tomaba forma definida el perfil y se colapsaba al momento de ser jalado.

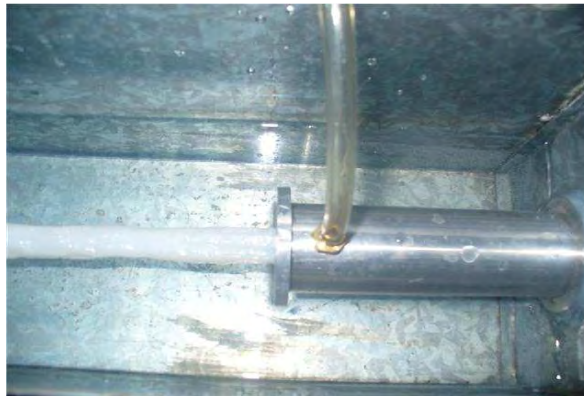


Figura. V.16 Perfil colapsado, debido a las condiciones de operación del extrusor, altas temperaturas y mal llenado.

Al cabezal del extrusor se le hizo una adaptación final, de entrada de aire, debido a que el material tenía una consistencia muy fluida y al momento en que pasaba a la zona de calibración o dado formador, se colapsaba. Por esa razón en el centro del cabezal se inyectó aire para inflar el perfil en el dado formador y evitar que se colapse.

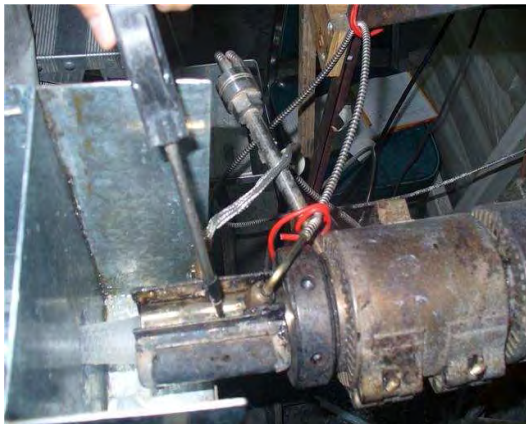


Figura. V.17

Extrusión de perfil con mal llenado

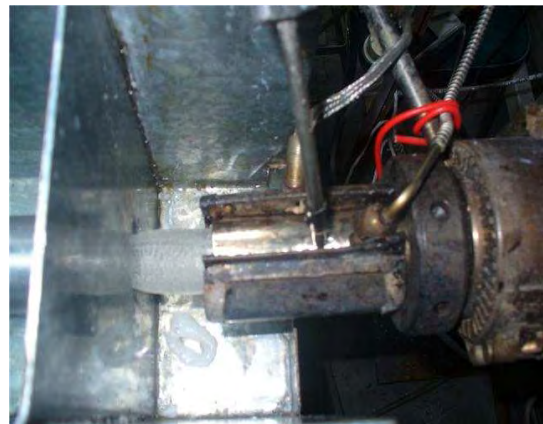
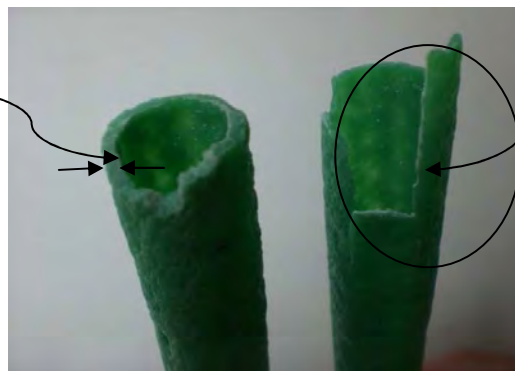


Figura. V.18

Buen llenado, inyectando aire

Espesor deseado proporcionando buena resistencia



Fractura del perfil debida al espesor menor por el jalado



Figura. V. 19 Salida de un buen perfil



Figura. V. 20 Uso del perfil tubular



1. Costo- beneficio.

Se busca con la producción de este perfil un modelo que rescate y no atente contra la naturaleza, que permita recuperar los desechos plásticos como el PET de otra forma más diversa y aplicada a objetos comunes, que favorezca el equilibrio natural al reutilizarlo, sin depender de tecnologías extranjeras y aprovechar la oportunidad de ingresos y oportunidades económicas que nos ofrece este desecho.

Se busca que los costos de producción sean mínimos para poderlos manejar sustentablemente.

2. Artículos.

El precio de la venta de este producto estará basado en la oferta y la demanda. Por ejemplo, el precio* de un palo de escoba fluctúa de \$ 3.60 a \$ 4.80 y son palos de pino de 1.20 m de largo de buena calidad. Las varas de siembra, el manojo de varas (35 a 45 varas), está entre \$100 a \$150 dependiendo de la madera. El producto en su totalidad se venderá en el área metropolitana como primer alcance y las varas de siembra en comunidades aledañas. Sin embargo, al dar a conocer este producto se espera que la demanda crezca y se extienda a la república y posteriormente al exterior del país como EUA y Canadá que son los mayores consumidores de escobas. El análisis costo- beneficio se ve reflejado también en lo ambiental debido al aprovechamiento de nuestros desechos.

*Precio del palo de escoba obtenido de:

- Internet, Mercadolibre.com (Proveedores Nacionales Independientes)
- Maderería "Arcos" Esperanza # 16 Del. Azcapotzalco

*Precio de vara de:

- Maderería "Arcos" Esperanza #16 Del. Azcapotzalco
- Carpintería "Paloma" Calz. México- Tacuba #134 Del. Miguel Hidalgo

3. Estudio de mercado

Palos de escoba: Existen más de 600 productores de palos de escoba en México y la mayor demanda es de EU. La demanda de palos de escobas es de aproximadamente 130 mil palos al mes, sólo en el Distrito Federal, ver **Tabla VI.1**. La producción generada en México no se queda en el país ya que se exporta a otros países debido a que somos el principal país exportador de escobas.

Tabla VI.1 Relación Oferta y demanda de palos de escoba en el D.F (Tomando el mes más alto en un determinado año)^[54]

Año	Demanda	Oferta
2006	97,929	68,395
2007	112,954	65,500
2008	128,997	74,425

Producción de palos de escoba: la producción semanal muchas veces depende de la estacionalidad y de los pedidos, lo que dificulta estimar el volumen de producción mensual. En general la demanda de este producto es constante durante todo el año, varía por meses pero llega a un equilibrio anual, debido a su utilidad permanente en casas, comercios e industrias. Según la opinión del 55 % de los productores, ahora el bajo volumen de producción se debe al reducido número de trabajadores, a la disponibilidad en los talleres y a las fluctuaciones en la demanda. Para aumentar el volumen de producción, se requieren en promedio 5 trabajadores que desempeñen las funciones en las diferentes etapas de producción (adquisición de materia prima, pelado, torneado, lijado). Es decir, los incrementos en la producción en los talleres implicarían cambios de escala y organización de la producción, esto hablando de productores artesanales, pero el mismo problema surge en negocios más grandes a pesar de la maquinaria y automatización existente.^[55]

Los palos de escobas se elaborarán con árboles de pino y son de aproximadamente 1.2 m de largo y de entre 2.5 hasta 3.5 cm de diámetro.

De la demanda insatisfecha también existen otros productores de palos, que cubren aproximadamente el 40 % de esta, los cuales producen palos de metal con cinta adherible de plástico o palos plásticos de PE (innovadores) los cuales si son resistentes pero son de muy alto precio, elevando el precio de la escoba hasta 40 pesos, produciendo más contaminación y desechos.

Otro mercado es el de varas para siembra o vara tutorial. Esta vara se utiliza para mantener erguidas las cosechas de las llamadas plantas trepadoras, o cosechas en las que se tiene que evitar el contacto con la humedad del suelo. Las varas utilizadas en la actualidad son de madera las cuales con el contacto del agua se pudren y quiebran quedando inservibles y se tienen que renovar aproximadamente cada 2 cosechas. ^[54]

Lamentablemente este mercado es más difícil ya que un gran número de agricultores optan por adquirir esta madera por medio de la tala ilegal, o adquieren la madera de sus propios predios. Considerando este grave problema, primero se tendría que concientizar al agricultor del daño que causa con la tala indiscriminada^[56], pero enfocándose a los grandes agricultores que si adquieren estas varas legalmente, es muy viable hacer uso de las varas de PET reciclado ya que el precio es competitivo y resiste la exposición al medio ambiente.

Los agricultores de comunidades aledañas generalmente cuentan con terrenos familiares donde la siembra varía entre 1200 a 1500 plantas y grandes agricultores de 8,000 a 10,000. Considerando la demanda de una comunidad con 4 agricultores, se tiene que, ver **Tabla VI.2** ^[54]

Tabla VI.2 Demanda y oferta solo en una comunidad con 10 agricultores del Estado de México

Demanda	Oferta	Balance
14,667	5,778	8,886

Como se puede notar, el mercado existente no cubre la demanda total y este material cuenta con las características necesarias y principalmente se adecúa

al gran impulso y la concientización que se está intentando crear en la gente acerca del reciclado, para evitar aumentar el impacto ambiental negativo que ha sido provocado.

4. BRIEF

Situación de la empresa: Proyecto nuevo de fabricación de perfiles tubulares a base de PET reciclado, que ha sido desarrollado a lo largo de 7 meses en base a estudios previos que ya se habían realizado en el IIM UNAM desde 2002.

Se plantea, que una vez concluido el proceso de investigación y habiendo obtenido resultados favorables, cumpliendo el producto con normas y requerimientos para comercialización, se ponga a la venta en los próximos años.

Se desea conocer la rentabilidad que puede tener el proyecto por lo que se está considerando la siguiente información.

Competencia directa:

- Rutren-grupo corporativo: Distribuidora y comercializadora de palos de madera. Vende a México y Latinoamérica
- 1°US Stick de México., S.A de C.V: Empresa dedicada a la extrusión de perfiles plásticos, palos y tubos.

Dirección Aquiles Serdán #143 Del. Iztapalapa C.P: 09570 México D.F

Después de determinar el sistema de máquina que sea adecuado para este proceso, se tienen que considerar diferentes factores. El diseño del sistema más adecuado es la clave para el éxito económico de una línea de proceso para una mezcla y procesamiento de un perfil. La base para el diseño de este sistema debe incluir un análisis de requerimientos específicos, incluyendo régimen de procesamiento, número de ingredientes, características del manejo de materiales

de alimentación, variedad de formulas requerimientos de cambios, requerimientos de control de calidad y mano de obra. También se tendrá el tamaño de equipo, el alcance del almacenamiento a granel, grado de control de proceso, grado de automatización, equipo auxiliar, equipo de pruebas, y lo más importante el costo de operación y el factor en funcionamiento.

5. Estudio técnico (preliminar).

La empresa se ubicara cerca del distrito federal, de esta manera nos beneficiaremos en gastos de transportación para la comercialización, al igual que la materia prima que se pretende adquirir en el D.F, el sitio contemplado para la localización de la planta es:



Av. de la luz. S/n, Cuautitlán Izcalli

Superficie de terreno: 490 m² techados (14mts. frente x 35 m. fondo), 120 m² oficina, cocina y baños. Cuenta con agua potable, drenaje, alcantarillado, red telefónica, alumbrado público, red de electrificación. Topografía plana de forma regular (rectangular).

No se encuentran problemas de accesibilidad para abastecimiento, ya que se cuenta con el acceso a la autopista México-Pachuca, por las inmediaciones el acceso a Ferrocarril por la México-Pachuca 85, al igual que si se requiere exportación contamos con el aeropuerto de Toluca.

Las corrientes de agua con las que se cuentan son: Lerma, San Felipe, La venta, Temascaltepec, Tejalpa, Ixtapan, Chalma.

Costo de VENTA: \$ 1'750,000.00 (IVA incluido)

EQUIPO: Se llevaron a cabo dos cotizaciones, la primera ver **Tabla VI.3**, se adquiere le equipos por separado y posteriormente se hace la instalación.

Tabla VI.3 Equipo requerido.

Clave	Nombre del equipo	Características	\$ [USD]
DA-101	Extrusora doble-husillo	Ø=19 mm L/D 24 0 30:1, motor variador, calefacción con resistencias y enfriamiento por aire, tablero integrado con control del motor	139,640.80
DA-102	Dado extrusor	Diseño Sección IV	600.00
RA-101	Dado Calibrado + Trampa agua	Diseño Sección IV	250.00
FA-101	Tina de enfriamiento con recirculación	Con intercambiador y controlador de temperatura.	4,408.00
SA-101	Jaladora de tubería	Velocidad de 0.5 -20 min	6,000.00
SB-101	Cortadora de cuchillas	-----	2,320.00
		Total	153,218.80

Otra opción, cotizando extrusoras se podría adquirir un sistema completo y armado para extrusión de perfiles, el que se ajusta más a las necesidades y precios es de la empresa: RE-PLAST EXTRUDER CORP. TAIWAN TECHNOLOGY PROFECIONAL MANUFACTURER. Con las siguientes características, Ver **Tabla VI.4**

Tabla VI.4 Características del equipo. Modelo RERX-100

Capacidad	80-250 kg/h
L/D	32:1
Tamaño del equipo (m)	12X3.6X4.6
Energía total de las maquinas	153 KW
Peso de la maquina	5510 kg
Costo del equipo	\$(US) 210,310.00

En este caso la opción elegida es la segunda ya que el equipo cuenta con automatización y menos gastos de instalación, el gasto de instalación y mano de obra que requeriría la primera opción serían mayores. Pero el primer equipo no queda descartado, ya que se requiere adquirir un equipo sencillo para realizar la extrusión reactiva para el PEAD-g-MAH.

Se puede afirmar que tecnológicamente no existe impedimento para realizar el proyecto, se determinaran los recursos económicos necesarios.

6. Análisis económico.

- **Costo de producción.** (Ver Tabla VI.12)

Se considerara que el costo de producción estará vigente durante los primeros 5 años.

Según la ley, se consideran 353 días hábiles de trabajo al año, 1 turno matutino (6 días a la semana jornada de 8 horas). Ver **Tabla VI.5**

Tabla VI.5 Producción anual.

Años	Capacidad Planta [%]	Producción [kg/h]	Producción [Ton/año]
1	45	112	317.7
2	75	188	529.5
3-5	100	250	706

Paridad peso/USD= 12.50

- **Materia Prima**

El precio de Materia prima a menudeo, este se puede mejorar al aumentar la compra

Tabla VI.6 Materia Prima, costo por TON

	[\$/kg]	Producir 1 kg [kg]	Producción [\$/kg]	[\$USD]/TON producción
PET	4.00	0.7	2.80	224.00
PEAD	20.50	0.3	6.15	76,875.00
MAH	34.00	0.0105	0.36	28.56
BPO	110.00	0.0007	0.08	962.50
		Total	9.38	78,090.06

Tabla VI.7 Costo total materia prima (MP) para producción anual

Producción [Ton]/año	PET [\$/año]	PEAD [\$/año]	MAH [\$/año]	BPO [\$/año]	Costo MP [\$/año]	Costo MP \$[USD]/año
317.7	889,560.00	1,953,855.00	113,418.90	24,462.90	2,981,296.80	238,503.74
529.5	1,482,600.00	3,256,425.00	189,031.50	40,771.50	4,968,828.00	397,506.24
706	1,976,800.00	4,341,900.00	252,042.00	54,362.00	6,625,104.00	530,008.32

- **Agua y Energía**

Agua de servicios y consumo humano: 3,000 [m³/año] donde 2,250 [m³/año] proceso y 750 [m³/año] consumo humano. Considerando a la planta al 100% de la capacidad. **Ver Tabla VI.8**

La cuota del agua: Servicio comercial giro B, 29.46 [\$/m³] + Alcantarillado \$4.42 = **\$38.96**. Los servicios no domésticos, de conformidad con las disposiciones de la S.H.C.P. se adicionarán el 15% del I.V.A.

Tabla VI.8 Consumo y costo de Agua, producción anual

Años	Capacidad Planta [%]	Consumo de agua [m ³ /año]	Costo unitario [\$/m ³]	Costo agua \$[USD]/año
1	45	1350	44.73	4,830.73
2	75	2250	44.73	8,051.22
3	100	3000	44.73	10,734.96

En total de energía eléctrica para iluminación y servicios se requiere, 612,680 [kWh/ año] (al 100 % de la capacidad). Comprende el uso de extrusora para perfiles, extrusor para reacción, iluminación y equipos auxiliares. **Ver Tabla VI.9**

Las cuotas publicadas correspondientes a enero de 2009, están recalculadas con fundamento en el ARTICULO NOVENO y transitorio CUARTO del acuerdo que autoriza la modificación y reestructuración a las tarifas, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 21 de enero de 2009. Tarifas generales en alta tensión, Nivel 3 uso industrial, sin subsidio.

Tabla VI.9 Consumo y costo de Electricidad, producción anual

Años	Capacidad Planta %	Consumo de electricidad [kWh/año]	Costo unitario [\$/kWh]	\$(USD)/año
1	45	275706	6.90	152,189.71
2	75	459510	6.90	253,649.52
3	100	612680	6.90	338,199.36

* Datos obtenidos por consulta a CFE y CNA.

Determinación mano de obra, **Tablas VI.10, VI.11:**

Tabla VI.10 Mano de obra directa

Mano de obra directa	No.	Sueldo mensual	30% Prestaciones	\$(USD)/año
Recepción y almacenaje	2	5,000.00	36,000.00	12,480.00
Operadores de proceso	3	5,600.00	60,480.00	20,966.40
		Total	96,480.00	33,446.40

- Se considera 30% de prestaciones sobre sueldos y salarios mínimos de acuerdo a lo siguiente: 18% seguro social, 5% infonavit, 1% gratificaciones prima vacacional, 6% otros

Tabla VI.11 Mano de obra indirecta

Mano de obra indirecta	No.	Sueldo mensual	30% Prestaciones	\$(USD)/año
Supervisor	1	10,000.00	36,000.00	\$ 12,480.00
Encargado de mantenimiento	1	8,500.00	30,600.00	\$ 10,608.00
Limpieza	1	2,400.00	8,640.00	\$ 2,995.20
Vigilante	2	4,400.00	31,680.00	\$ 10,982.40
		Total	106,920.00	\$ 37,065.60

Tabla VI.12. Costo de producción al 100% capacidad

Producción [TON/año]	706
	\$(USD)/año
Materia Prima	530,008.32
Electricidad	338,199.36
Agua	10,734.96

MO Directa	33,446.40
MO indirecta	37,065.60
Mantenimiento preventivo	11,709.85
Seguros e impuestos	7,806.57
Costo de producción	968,971.06

* Costo del mantenimiento preventivo, se considera un 3% del costo total del equipo.

* Seguros e impuestos, se considera un 2% del costo total del equipo.

• **Inversión fija.**

Tabla VI.13. Costo total del equipo de proceso.

COSTO DE EQUIPO	\$ [USD]
Extrusora doble husillo	139,640.80
Cortadora de cuchillas	2,320.00
Tina de enfriamiento	4,408.00
Equipo de extrusión de perfiles	243,959.60
Total	390,328.40

Tabla VI.14. Inversión total.

Inversión total	\$(USD)
Terreno	140,000.00
Gastos de instalación¹	58,549.26
Contingencias²	7,000.00
Seguros, fletes³	14,000.00
Equipo de proceso	390,328.40
Total inversión (tangible)	609,877.66
Planeación e integración del proyecto (1% del costo físico de la planta)	6,098.78
Supervisión y administración(1% del costo físico de la planta)	6,098.78
Total inversión (intangibles)	12,197.55
TOTAL DE INVERSION FIJA DEL PROYECTO	622,075.21

1. Gastos de instalación se consideran el 15% del costo del equipo, incluye motaje, puesta en marcha, capacitación al personal y supervisión hasta la normalización de las operaciones productivas.
2. Contingencias se consideran el 5% del costo del terreno
3. Seguros y fletes se considera el 10 % del costo del terreno

- **Depreciación y amortización.**

Se muestran cuales son los cargos anuales por depreciación de activos tangibles y amortización de activos intangibles, **Tabla VI.15**. Los porcentajes de tasas de depreciación son según la ley tributaria.

Tablas VI.15. Depreciación y amortización

Concepto	Inversión \$[USD]	Tasa de depreciación %	\$[USD]/año
Terreno	140,000.00	20	28,000.00
Gastos de instalación ¹	58,549.26	10	5,854.93
Seguros, fletes ³	14,000.00	25	3,500.00
Equipo de proceso	390,328.40	7	27,322.99
	609,877.66	Depreciación TOTAL	64,677.91
Planeación e integración del proyecto (1% del costo físico de la planta)	6,098.78	15	914.82
Supervisión y administración(1% del costo físico de la planta)	6,098.78	15	914.82
	12,197.55	Amortización TOTAL	1,829.63
TOTAL DE Amortización y depreciación			66,507.55
TOTAL DE Amortización y depreciación en 5 años			332,537.73

- **Determinación de ventas fijando precio.**

Factor condicionante de la decisión de precio.

Mercado y competencia: La actuación de la competencia condiciona en buena medida las decisiones sobre fijación de precios. Según la situación

competitiva la empresa tendrá mayor o menor capacidad para modificar sus precios.

Los hábitos y costumbres del mercado y la cultura o formación económica de los consumidores y usuarios condicionarán también en buena medida las decisiones de fijación de los precios impidiendo cambios radicales en los mismos que puedan ser perjudiciales para el consumidor.

Método basado en la competencia:

La referencia para fijar el precio es la situación de la competencia, los precios varían según la posición de líder o seguidor de la empresa, la empresa fijará un precio similar al establecido en el sector, salvo que posean alguna ventaja o desventaja en calidad, disponibilidad, distribución o servicios complementarios, una situación competitiva particular la constituye la licitación o concurso de algunos mercados.

Tabla VI.16. Ventas totales (Ingresos)

Producción [TON/año]	706
Para 1 metro de perfil- 100 g producción	
Cantidad de perfiles anuales	7,060,000.00
Costo Producción X metro \$[US]	0.13
Precio(basado en la competencia) \$[USD]	0.12
15 % IVA	0.038
Precio Final \$[USD]	0.295
Total de ventas anual \$[USD]	2,088,596.72

Posteriormente se necesita determinar el capital de trabajo, **Tabla VI.17**, para la operación de la empresa. Este es el dinero en efectivo, requerido para cubrir costos, como inventario que se puede vender obteniendo dinero para producción y venta. Basándonos en experiencia de otras empresas del mismo giro:

Cuentas por cobrar: 30 días del valor de las ventas.

Inventario de la materia prima: 30 días del costo de la materia prima.

Inventario de producto terminado: 7 días del costo directo de producción.

Inventario de producto de proceso: 21 días del costo directo de producción.

Cajas y bancos: 30 días del costo de producción.

Cuentas por pagar: 30 días del costo de la materia prima.

Tabla VI.17. Capital de trabajo

100 % capacidad	
Producción [TON/año]	706
ACTIVO CIRCULANTE	\$(USD)
Cuentas por cobrar	177,501.14
Inventario MP	4,5043.20
Inventario producto terminado	18,092.70
Inventario producto de proceso	72,407.88
Caja y Bancos	82,348.82
TOTAL activo circulante	395,393.73
PASIVO CIRCULANTE	
Cuentas por pagar	45,043.20
TOTAL Pasivo circulante	45,043.20
CAPITAL DE TRABAJO	440,436.93

Balance General	
	\$(USD)
Costos de producción	968,971.06
Depreciación y amortización	66,507.55
Total Egresos anuales	1,035,478.61
Ingresos Totales	2,088,596.72
Ganancia Neta anual	1,053,118.11

Se estima que una tasa de rendimiento del 25% para un proyecto de este tipo es muy atractiva para los inversionistas.

Considerando:

$$VAN = BNA - Inversión$$

Donde:

$$BNA = \sum_{n=1..5}^{\infty} FE / (1 + i)^n$$

VAN = Valor Actual Neto

BNA= beneficio neto actualizado

FE= flujo de efectivo

Para hallar la TIR hacemos uso de la fórmula del VAN (Valor Actual Neto), sólo que en vez de hallar el VAN (el cual reemplazamos por 0), estaríamos hallando la tasa de descuento i:

Evaluación Económica.						
Año	0	1	2	3	4	5
Capacidad de la planta	-	45	75	100	100	100
Ingresos por ventas	-	1,552,742.72	1,845,026.72	2,088,596.72	2,088,596.72	2,088,596.72
Costo de producción	-	485,552.61	749,235.40	968,971.06	968,971.06	968,971.06
Flujo de Efectivo	-954,612.95	1,067,190.11	1,095,791.32	1,119,625.66	1,119,625.66	1,119,625.66

<i>i</i>	72%
----------	-----

El *i* equivale al TIR del proyecto, el TIR es mayor que la tasa de negocio planteada anteriormente del 25%, esto nos indica que el proyecto es económicamente rentable.



- ✓ Con el propósito de obtener una mezcla de PET-PEAD se probó un extendedor de cadena funcionalizado PEAD con anhídrido Maléico por extrusión reactiva, obteniendo buenos resultados, aumentando la **compatibilización** de estos polímeros.
- ✓ Las pruebas de PET virgen compatibilizado con PEAD analizadas por SEM son exitosas ya que se comprueba que se tiene un buen resultado del extendedor. Se puede observar que ya no se tiene una fase dispersa bien definida.
- ✓ Al utilizar PET reciclado de botellas, donde se buscaba la compatibilización con PEAD y también el **mejoramiento de las propiedades** revirtiendo los efectos que causa la degradación del PET reciclado, no se obtuvo buenos resultados ya que se descompuso al inyectar debido a reacciones secundarias degradándolo y cristalizó rápidamente, provocando que se fracturara.
- ✓ Al no obtener buenos resultados con el PET reciclado de botellas, se trabajó con un diferente tipo de PET reciclado (fleje) con diferente composición, contaminantes y origen, el cual también pierde sus propiedades al ser reprocesado, utilizando la funcionalización se mejoraron sus propiedades y fue manipulable. El resultado de la compatibilización fue bueno a pesar de la alta contaminación del PET con otros polímeros desconocidos.
- ✓ Esto nos deja como manifiesto que si depende del tipo de composición de PET reciclado a utilizar.

- ✓ El uso de arcilla en las mezclas no fue el esperado ya que, actuaba como agente nucleante aumentando la cristalización, volviéndolo muy frágil.
- ✓ La diferencia de propiedades entre las mezclas de 70 % PET reciclado 30 % PEAD injertado y 60 % PET reciclado 40 % PEAD injertado no es apreciable.
- ✓ La mezcla 70 % PET reciclado 30 % PEAD injertado fue la elegida debido a la mayor cantidad de propiedades mecánicas obtenidas mejores que 60 % PET reciclado 40 % PEAD injertado. Y de esta manera se utilizara mayor cantidad de PET-reciclado contribuyendo más ecológicamente y utilizando los desechos que tienen un menor costo.
- ✓ Se diseño y construyó el dado extrusor.
- ✓ El perfil de temperatura obtenido para la extrusión de un perfil tubular de esta mezcla, para este trabajo es: T1=190, T2: 200, T3: 210, T4: 220.
- ✓ Se tienen zonas débiles en el perfil por la falta de continuidad de fuerza y velocidad de jalado.
- ✓ Se puede considerar una buena posibilidad de introducción al mercado, ya que existe un alto porcentaje de demanda insatisfecha.
- ✓ Se puede competir en precios ya que el costo de producción de cada perfil es bajo \$1.62.
- ✓ El objetivo y la hipótesis de obtener una mezcla de PET reciclado-PE, por la modificación química de PEAD por medio del injerto de Anhídrido Maléico, se cumplió. Obteniendo una mezcla con propiedades mecánicas eficientes para poder procesarlo por los métodos de transformación tradicionales donde se obtuvieron tubos o perfil hueco con esta mezcla.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] "La importancia del reciclaje PET" Cap. 1 http://catarina.udlap.mx/u_a/tales/doc/cap1.pdf
- [2] Soto C, E., Estudio de la Mezcla polimérica PET-EPDM., 2000Pág.
- [3] Chang, R. Química. 7ª ed. McGraw- Hill. 2005 pp. 327,328
- [4] Romero Ibarra C.I., Nanocompuestos a base de PET y arcillas químicamente modificadas, Facultad de química UNAM., 2003 pág.
- [5] A.V. SHENOY.; D.R. SAIN, Thermoplastic Melt Rheology and Processing. 1996, p.7 y 8
- [6] "Clasificación de polímeros, ANIQ" <http://www.aniq.org.mx/cipres/clasificacion.asp>
- [7] M. Chanda; Salilk, R., "Plastics Technology Handbook", 3ed. 1998, pág. 23-28
- [8] Macrogalleria "Conociendo los polímeros, Nivel 3" <http://pslc.ws/spanish/blend.htm>
- [9] Charles A.H., Handbook of plastics, elastomers and composites, 2ed. , pág. 1.14,3.25
- [10] Referencia 8. Nivel 4.
- [11] Referencia 9, pág. 10,11
- [12] Referencia 7, Pág. 32-26
- [13] Referencia 7, Pág. 25, 37, 40
- [14] Referencia 8. Nivel 3.2
- [15] Referencia 7, pág. 32-35
- [16] Asmut, K., Panorama Plástico 1997, 18. pág. 36,37
- [17] Guzmán E, Jair A. Estudio de la mezcla de Politereftalato de Etileno y Polietileno de alta densidad compatibilizada por medio de grupos funcionales anhídridos. Facultad de Química, 2009. Pág. 22
- [18] Doinald, V, R; Dominick, V, R., "Blow Molding Handbook: Technology, Performance, Markets." Hanser Pub., pág. 154-156
- [19] Guerra F.G., Modificación en las propiedades de impacto del PET. Trabajo de actualización, Facultad de Química UNAM, 2005
- [20] "Propiedades y características generales del PET"
Publicacion.http://www.eis.uva.es/~macromol/curso0506/pet/propiedades_y_caracteristicas.htm
- [21] Manual: Seminario Inyección y moldes. Materiales Plásticos. Impi. The Gillette Company. Pág.: 7- 15.

- [22] Referencia 17. Pág.: 25
- [23] Referencia 18. Pág.: 539-545
- [24] ASM international, Engineered Materials Hand Book, 2006 Pág. 31,65,165,166
- [25] "Propiedades de los polímeros" <http://www.arqhys.com/arquitectura/polimeros-propiedades-fisicas.html>
- [26] Dewar, B. A, Extrusion of profiles, 2001. Pág. 80-83
- [27] Referencia 17. Pág.: 40-45
- [28] Referencia 21 Pág.: 24-28
- [29] John Murphy, Reinforced Plastics, Handbook., USA 1998 pp 24, 114-116
- [30] Referencia 4. Pág. 27-29
- [31] Romo A, G., Nanocompuestos con polímeros. Trabajo monográfico de actualización. Facultad de Química UNAM 2002
- [32] K. Gonsalves, X. Chen. Material Research Society. Simposia proceedings. Warrendale, PA, 1996. Vol.435, 55.
- [33] **Dibujos de:** *Enciclopedia del Plástico 2000*; Centro Empresarial del Plástico. Tomo 3.
- [34] Middleman, S., Fundamentals of polymer Processing. McGraw- Hill Book Company, 1992. pág. 135
- [35] Fabrizio G.M, VNR, Twin-Screw extruders, Pág: 43,42,69
- [36] Referencia 33. Procesos de transformación. Pág. 4,6
- [37] Edward A.M., Plastic Proc Technology, 1994, C.4, 70, 85-90
- [38] Seminario de inyección y moldes. Equipo periférico moldes y mantenimiento. Centro empresarial del plástico. The Gillette Company pág. 6-7
- [39] P.S Cracknel; R.W Dyson, Handbook of ThermoPlastic Injection Mould Design, 1993 Pág: 34-39
- [40] Referencia 33. Tomo 1. Pág. 131
- [41] Referencia 17, Pág. 88
- [42] Firas, A., & Dumitru, P. Recycling of PET. European Polymer Journal 2005 41, p. 1453-1477.
- [43] J. Schumacher and M. Yoneyama. *Polyethylene Terephthalate (PET) Solid State Resin*. SRI Consulting (2004).
- [44] "Reciclado mecánico"
- <http://www.eis.uva.es/~macromol/cursos06/pet/recicladomecanico.htm>

- [45] DEMETRIS N. B; GEORGE P, A., "Chain Extension of Polyesters with Two New Diimidodiepoxides". GR-540 06, Thessaloniki, Greece p. 1337
- [46] Moad G., "The synthesis of polyolefin graft copolymers by reactive extrusion". Prog Polym. Sci. 1999 24, 81–142
- [47] Referencia 17. Pág.63-66
- [48] Delgadillo D, E. Desarrollo de materiales a base de PET-cargas-extendedor de cadena para la producción de perfiles extrudidos. Facultad de Química UNAM, 2008
- [49] W. Predöhl, P. Reitemeyer. Extrusion of pipes, profiles and cables: Manufacture of pipes. C.3 Pág. 56-57
- [50] Referencia 49. Pág. 80
- [51] Sidney Levy P.E, Plastic Extrusion. Technology HandBook Industrial Press Inc. NY.1997
- [52] "Principios de extrusión de perfiles"
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulo.asp?A=14495>
- [53] Referencia 16 Pág. 39
- [54]Victor D Phill, Agricultura sustentable, <http://manual%20Agriculturasustentable.pdf>
- [55] McCrary, J; Shillington, L; Santana, R; Hammett, A.L.; Riviere, J. Participación de los productos no maderables del bosque en la economía informal: Un estudio de caso. *En publicación: Encuentro no. 69*, <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/ar/libros/nicaragua/uca/encuen69/mccra.rtf>
- [56] McCRARY, J.K. et al. (2004). "Illegal forest products extraction from Laguna de Apoyo Nature Reserve". Caribbean Journal of Science No. 18.
- [57] Referencia 17 Pág. 112,113
- [58] Osuna Arencón, "Efectos de la incorporación de PET sobre la estructura y propiedades mecánicas", Universal Politécnica de Catalunya. 2004



1. COSTOS

En la **Tabla VIII.1** se muestra los costos para la construcción del dado del extrusor, dado formador y equipo adicional con fin de hacer posteriormente un análisis económico.

Tabla. VIII.1 Costos para la construcción y diseño de dados y auxiliares.

Material	Medidas	Costo
Dado para extrusora		
Barra Acero Inoxidable 316	30 cm, Ø 2.54 cm	\$ 250.00
Barra Acero Inoxidable 316	30 cm, Ø 5.08 cm	\$1340.00
Barra Acero Inoxidable 316	30 cm, Ø 3.17 cm	\$ 560.00
Placa Acero Inoxidable 316	3.17 cm, 10.16 X 10.16 cm	\$ 350.00
Cortador carburo de Tungsteno	0.635 cm ,4 gavilanes	\$ 300.00
Mano de obra 1° pieza: cilindro hueco maquilado		\$ 800.00
Mano de obra 2° pieza: torpedo		\$ 550.00
Total		\$4150.00
Dado formador o zona de calibración		
Tubo de aluminio	12 cm, Ø 2.54 cm	\$ 60.00
Tubo de aluminio	12 cm, Ø 5.08 cm	\$ 137.00
Placa de aluminio	3.17 cm, 30 X 28 cm	\$ 178.00
Boquilla	0.635 cm	\$ 34.00
Mano de obra 1° pieza: Externa		\$ 150.00
Mano de obra 2° pieza: Interna Ranurada		\$ 600.00
Total		\$1159.00
Tina de enfriamiento		
Lamina galvanizada	150 X 100 cm	\$ 350.00
Tubo de cobre	100 cm, 0.95 cm	\$ 100.00
Placa de hule	1 trozo	\$ 5.00
Silicón	tubo pequeño	\$ 35.00
Mano de obra		\$ 600.00
Total		\$1090.00
Trampa de agua		
Tanque sellado	-----	\$ 25.00
Mangueras		\$ 60.00
Mano de obra		\$ 150.00
Total		\$ 235.00
TOTAL		\$ 6634.00

*Los precios obtenidos fueron con el mínimo de material que las casas distribuidoras vendían, por eso a pesar de que no se necesitaba ni se utilizaría todo el material se

compro por pieza completa. Se considero el gasto total de material y no por la cantidad de material usado para construir la pieza.

Aproximadamente se obtiene 1 m de perfil por cada 100 g de mezcla de PET reciclado-PEAD.

	Costo \$/Kg	Para 10 m de Perfil	
		Cantidad requerida	\$
PEAD	\$ 20.50	300 g	6.20
Anhidro Maléico	\$ 34.00	4.5 g	0.17
BPO	\$ 110.00	0.3 g	0.03
PET reciclado	\$ 4.00	700 g	2.80
TOTAL (\$/kg)			9.20

Construcción dado extrusión, calibrador y equipos auxiliares: \$ 6634.00

Electricidad y servicios auxiliares: \$ 4.00/ kg de material procesado

El precio de la materia prima se puede mejorar al ser comprada por volumen. Los proveedores nos dan la posibilidad de un acuerdo de precios de mayoreo.