



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)**

**IVÁN ERNESTO ROCA GIRÓN**  
Asesorado por: Ing. José Eduardo Calderón García

Guatemala, Septiembre de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

IVÁN ERNESTO ROCA GIRÓN

ASESORADO POR EL ING. JOSE EDUARDO CALDERÓN  
AL CONFERIRSELE EL TITULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2005

# UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Teresa Lisely De León Arana
EXAMINADOR	Ing. Hilda Piedad Palma de Martini
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Alvarez Mejía
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los conceptos que establece la ley de la universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD),**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química con fecha 5 de agosto de 2003.

**Iván Ernesto Roca Girón**

## **DEDICATORIA**

### **A mis Padres:**

Por su amor incondicional, por el apoyo brindado a lo largo de mi vida y por ser ejemplo de personas de bien.

También, a todas las personas que de una u otra manera han estado a mi lado y, gracias a ellas, he aprendido muchas cosas de la vida, sin importar que algunas ya no estén conmigo, las llevo en mi pensamiento.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que me han dado su apoyo incondicional para que este trabajo se traduzca en un logro no sólo para mí, sino para mi familia.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
<b>1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE POLIETILENO</b>	<b>1</b>
1.1 Historia del polietileno	1
1.2 Concepto de polietileno	2
1.3 Estructura del polietileno	2
1.4 Clasificación del polietileno	3
1.5 Tipos de reacción de polimerización	4
1.6 Reacción de polimerización del polietileno de alta densidad	7
1.7 Tipos de catalizadores utilizados para la polimerización del polietileno de alta densidad	8
1.7.1 Catalizadores Ziegler – Natta	8
1.7.2 Proceso Phillips	9
1.7.3 Catalizadores metallocenos	10
1.8 Forma de obtención del polietileno de alta densidad	10
1.8.1 Suspensión	10
1.8.2 Fase gaseosa	11
1.9 Cristalinidad del polietileno de alta densidad	11
1.10 Conformación	12
1.11 Grados	13



1.12	Aditivos	13
<b>2.</b>	<b>ESTUDIO DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	<b>15</b>
2.1	Clasificación del polietileno de alta densidad	15
2.2	Polietileno de alta densidad	17
2.3	Propiedades generales del polietileno de alta densidad	18
2.3.1	Propiedades físicas	18
2.3.2	Propiedades químicas	19
2.3.3	Propiedades mecánicas	21
2.3.4	Propiedades térmicas	23
2.3.5	Propiedades eléctricas	26
2.3.6	Propiedades ópticas	28
2.4	Polietileno de alta densidad alta masa molecular	28
2.4.1	Propiedades	29
2.5	Polietileno de ultra alta masa molecular (UHMWPE)	29
2.6	Propiedades generales del UHMWPE	29
2.6.1	Propiedades físicas	30
2.6.2	Propiedades mecánicas	31
2.6.3	Propiedades eléctricas	32
2.6.4	Propiedades térmicas	33
2.6.5	Propiedades químicas	34
2.7	Aditivos utilizados para el UHMWPE	35
2.8	Polietileno entrecruzado	37
2.9	Métodos para entrecruzar	37
2.9.1	Peroxido orgánico	37
2.9.2	Silano insertado	38
2.9.3	Radiación de alta energía	38
2.10	Propiedades del polietileno entrecruzado	39



<b>3. MÉTODOS DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	<b>41</b>
3.1 Generalidades	41
3.2 Moldeo por extrusión	41
3.2.1 Husillo y cilindro	42
3.2.2 Perfiles de temperatura	42
3.2.3 Extrusión para fabricar tuberías y perfiles	43
3.2.3.1 Dado tubería	43
3.2.4 Extrusión para la fabricación de película tubular	44
3.2.5 Extrusión para fabricar película con dado plano	45
3.2.6 Extrusión para fabricar recubrimiento de cable y alambre	46
3.2.7 Extrusión para el proceso de laminación	47
3.2.8 Extrusión para la fabricación de lamina espumada	48
3.3 Moldeo por inyección	48
3.3.1 Características de maquinaria	48
3.3.1.1 Husillo	48
3.3.1.2 Boquilla	49
3.3.2 Condiciones de operación	49
3.3.2.1 Perfil de temperaturas	49
3.3.2.2 Presión de inyección	50
3.3.2.3 Tiempo de sostenimiento	51
3.3.2.4 Velocidad de inyección	51
3.3.2.5 Velocidad de husillo	51
3.3.3 Molde	52
3.3.4 Problemas comunes	53
3.4 Soplado	53
3.4.1 Extrusión soplo	54
3.4.1.1 Temperatura de plastificación	54



3.4.1.2	Presión de soplado	54
3.4.1.3	Velocidad de aire	55
3.4.2	Inyección soplo	55
3.4.2.1	Equipo	55
3.5	Moldeo por rotomoldeo	55
3.6	Moldeo por compresión	56
3.6.1	Prensa hidráulica	56
3.6.2	Molde	57
3.6.3	Equipo auxiliar	57
3.7	Moldeo por Termoformado	57
3.7.1	Calidad de la lamina	58
3.7.2	Calentamiento	58
3.8	Acabado	59
<b>4.</b>	<b>APLICACIONES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	<b>61</b>
4.1	Clasificación de las aplicaciones del polietileno de alta densidad	61
4.2	Aplicaciones del polietileno de alta densidad	62
4.2.1	Envases	62
4.2.2	Empaque	64
4.2.3	Tipo de empaques de polietileno de alta densidad	64
4.2.3.1	Película plana	64
4.2.3.2	Lamina	65
4.2.3.3	Bolsas	65
4.2.4	Industria eléctrica	67
4.2.5	Automotriz	67
4.2.6	Otras aplicaciones	67
4.2.6.1	Cajas	67
4.2.6.2	Aplicaciones diversas	68



4.3 Aplicaciones del polietileno de alta densidad alta masa molecular	68
4.3.1 Tubería	69
4.3.2 Tanques	71
4.4 Aplicación del polietileno de ultra alta masa molecular	71
4.5 Aplicación del polietileno entrecruzado	72
4.6 Aplicaciones de los plásticos reciclados	72
<b>5. RECICLAJE DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD</b>	<b>73</b>
5.1 Generalidades	73
5.2 Identificación del polietileno de alta densidad	73
5.2.1 Codificación	73
5.3 Soluciones para minimizar los residuos plásticos	75
5.4 Métodos utilizados para la separación de plásticos	76
5.5 Tipos de reciclaje	80
5.5.1 Reciclaje mecánico	81
5.5.2 Reciclaje térmico	81
5.5.3 Relleno sanitario	83
5.6 Propiedades del polietileno de alta densidad reciclado	84
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>86</b>
<b>7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>88</b>
CONCLUSIONES	90
RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA	93



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Identificación del Polietileno de alta densidad	74
--	----

### TABLAS

I. Principales propiedades físicas del PEAD	18
II. Principales propiedades químicas del PEAD	21
III. Principales propiedades mecánicas del PEAD	23
IV. Principales propiedades térmicas del PEAD	26
V. Principales propiedades eléctricas del PEAD	28
VI. Principales propiedades físicas del UHMWPE	30
VII. Principales propiedades mecánicas del UHMWPE	31



VIII.	Resistencia a la abrasión del UHMWPE	32
IX.	Modificación de la resistividad superficial con negro de humo	33
X.	Principales propiedades térmicas del UHMWPE	34
XI.	Principales propiedades químicas del UHMWPE	35
XII.	Propiedades del polietileno entrecruzado	39
XIII.	Perfil recomendado de temperaturas de extrusión (°C) para el Polietileno de alta densidad	46
XIV.	Perfil de Temperatura para transformar por inyección al Polietileno de alta densidad	50
XV.	Condiciones de Inyección para el Polietileno de alta densidad	51
XVI.	Características del molde	53
XVII.	Valores típicos de Contracción en Termoformado de Polietileno de alta densidad	59
XVIII.	Tipos de tubería de Polietileno de alta densidad	70
XIX.	Identificación de plásticos reciclables	80



XX.	Ventajas y desventajas del reciclaje térmico del Polietileno alta densidad	82
XXI.	Contenido energético de diferentes plásticos	83
XXII.	Comparación de las propiedades del Polietileno de alta densidad Virgen Vrs. Reciclado	85
XXIII.	Resumen de las aplicaciones del Polietileno de alta densidad	87



## GLOSARIO

<b>Abrasión</b>	Desgaste que se produce en una superficie debido a la erosión o el roce de un objeto duro.
<b>Cabrestante</b>	Torno de eje vertical al que se arrolla un cable o una cuerda, que se emplea para mover grandes pesos.
<b>Dado</b>	Pieza cúbica de maquinaria que sirve de apoyo a los tornillos, ejes, etc.
<b>Dipolo</b>	– De di- y polo – Molécula que, aun siendo neutra, manifiesta en su estructura cargas eléctricas opuestas y distanciadas.
<b>Monómero</b>	– De mono-, del gr. mono- único, uno solo y -mero, del gr. mero parte – sust. m. 1. Unidad molecular que al repetirse forma una molécula muy grande denominada polímero.
<b>Muesca</b>	Hueco hecho en una cosa para encajar otra.
<b>Polímero</b>	– Del gr. polumephez, compuesto de varias partes – Molécula constituida por la repetición de unidades químicas más simples llamadas meros, unidas por enlace covalente.



## RESUMEN

El presente informe contiene toda la información necesaria acerca del Polietileno de alta densidad, empezando desde su descubrimiento en 1,953, hasta los diferentes tipos de reciclado.

El Polietileno de alta densidad se obtiene por reacción química, conocida con el nombre de polimerización del etileno a temperaturas y presiones, relativamente, bajas en presencia de un catalizador, ya sea Ziegler-Natta, Proceso Phillips o Metaloceno. Según cambien las condiciones de reacción de polimerización así es la estructura y, con ello, las propiedades del Polietileno de alta densidad que se obtiene.

Las principales aplicaciones del Polietileno de alta densidad son en el sector de envase-empaque, industria eléctrica, automotriz, construcción y la fabricación de muchos más productos; como chalecos antibalas.

Por último, la forma más conveniente medioambientalmente de reciclar el Polietileno de alta densidad es por reciclaje mecánico y reciclaje térmico.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Conocer en forma general la obtención, propiedades y aplicaciones del Polietileno de alta densidad.

### **Específicos**

1. Entender la relación existente entre la estructura molecular del Polietileno de alta densidad y sus propiedades físico-químicas.
2. Identificar las diferentes formas de transformación del Polietileno de alta densidad.
3. Enumerar los diferentes tipos de aplicaciones del Polietileno de alta densidad.
4. Identificar las diferentes formas de reciclaje del Polietileno de alta densidad.



## INTRODUCCIÓN

Es importante enfatizar que los materiales han jugado un papel fundamental en el desarrollo del ser humano. Desde sus comienzos con la edad de piedra, pasando por la era de los metales, hasta nuestros días.

En la actualidad, “Nos encontramos en la era de los plásticos”, ya que, la gran mayoría de materiales que utilizamos son plásticos y, a veces, estamos en contacto con ellos sin saber qué son o a qué clase pertenecen o incluso, sin tener conciencia de ellos, ya que, como se han vuelto parte de nuestras vidas a veces ni siquiera les damos importancia.

Entonces, resulta evidente la necesidad de conocer este tipo de materiales y mejor aún estudiar el Polietileno de alta densidad que es el más simple, común y de mayores aplicaciones.

El Polietileno de alta densidad es un termoplástico barato, fácil de obtener, procesar y con muy buenas propiedades físicas, químicas y mecánicas eléctricas, térmicas y ópticas que lo hacen el plástico más consumido en el mundo.



# 1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE POLIETILENO

## 1.1 Historia del Polietileno

La historia del Polietileno se remonta al año 1898 cuando Von Pechmann obtiene un polímero de estructura equivalente al Polietileno llamada Polimetileno. Esta síntesis se produjo accidentalmente a partir de diazometano, obteniendo un polímero de bajo peso molecular. En 1900, Bamberger y Tschirner analizaron un producto similar, encontrando que tenía la fórmula  $(CH_2)_n$ . El Polietileno de baja densidad fue obtenido accidentalmente por los estudios de alta presión del etileno que Michaels realizó en Ámsterdam.

Este descubrimiento lo aprovechó Gibson para producir Polietileno, a partir de una mezcla de etileno y benzaldehído. En 1935, en Inglaterra, los químicos e ingenieros W. Faucett, G. Paton, W. Perrin y G. Williams, polimerizaron etileno utilizando altas presiones y temperaturas.

Este descubrimiento permitió a la Imperial Chemical Industries la fabricación del Polietileno en 1938 por medio de la primera planta piloto, iniciándose la producción comercial en 1939 en Northwich, Cheshire.

En 1953, Ziegler y sus colaboradores en el Instituto Max Planck, basándose en los trabajos iniciados por el italiano Natta, estudiaron el proceso de polimerización a baja presión.

La reacción con un complejo catalítico de alquil aluminio y tetracloruro de titanio daba lugar a la fabricación de un Polietileno de mayor densidad y temperatura de fusión, como consecuencia de su mayor regularidad. A este Polietileno se le denominó de alta densidad (PEAD o sus siglas en inglés HDPE), haciendo mención a sus propiedades, o de baja presión, debido a su método de obtención.

En 1955 se inauguró en Alemania la primera fábrica de este material. Simultáneamente la Phillips Petroleum Co. en USA, desarrollaba un proceso industrial de obtención de Polietileno de alta densidad, altamente cristalino utilizando presiones medias, y como catalizador óxido de cromo soportado sobre sílice. La primera planta industrial se montó en Pasadena en 1957.

## **1.2 Concepto de Polietileno**

El Polietileno es un polímero sintético termoplástico que se obtiene por polimerización del etileno. Es un material parcialmente cristalino y parcialmente amorfo, de color blanquecino y translúcido. Los diversos tipos de Polietileno que se encuentran en el mercado son el resultado de las diferentes condiciones de operación, llevadas a cabo en la reacción de polimerización.

## **1.3 Estructura del Polietileno**

La estructura química del Polietileno es  $-(CH_2-CH_2-)_n$ . Esta molécula está compuesta en su unidad estructural por dos átomos de carbono y 4 átomos de hidrógeno unidos todos por enlaces de tipo covalente. La fuerza de los enlaces C-C y C-H es 347 y 414 KJ/mol respectivamente. Esta unidad básica se puede repetir indefinidamente para formar el Polietileno.

El número de veces que se repita esta unidad básica depende del tipo de catalizador utilizado en la reacción química, la temperatura y la presión.

#### **1.4 Clasificación del Polietileno**

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

- Polietileno de baja densidad
- Polietileno de mediana densidad
- Polietileno de alta densidad

El Polietileno de baja densidad, es un polímero de cadena ramificada. Se obtiene por polimerización del etileno a altas presiones por el mecanismo de radicales libres.

Contiene sustituyentes alquilo, o pequeñas ramificaciones en la estructura de la cadena, dichas ramificaciones se producen durante el proceso de síntesis. Es un polímero con una densidad comprendida entre 0.910 – 0.925 g/cm<sup>3</sup>; es incoloro, inodoro y no toxico.

El Polietileno de baja densidad se divide en: Polietileno de baja densidad, Polietileno lineal de baja densidad, Polietileno de muy baja densidad y Etil - Vinil - Acetato.

El Polietileno de media densidad, es un polímero con densidad comprendida entre 0.930 – 0.940 gr/cm<sup>3</sup>, que se emplea especialmente en la fabricación de tuberías.

El Polietileno de alta densidad, es un polímero con estructura lineal y muy pocas ramificaciones. Se obtiene por polimerización del etileno a presiones relativamente bajas utilizando catalizadores Ziegler-Natta o Proceso Phillips, aunque existe un tercero utilizado; los catalizadores Metalocenos, utilizados únicamente para obtener Polietileno de ultra alta masa molecular (PEAD-UAPM o sus siglas en ingles UHMWPE).

Es un polímero con densidad comprendida entre 0.941 – 0.954 gr/cm<sup>3</sup> es incoloro, inodoro, no toxico y resistente tanto a esfuerzos como a agentes químicos.

### **1.5 Tipos de reacción de polimerización**

La reacción química que conduce a la unión de unas moléculas; monómeros, con otras para formar una macromolécula llamada polímero se conoce con el nombre de polimerización. De acuerdo con la composición o la estructura del polímero las reacciones de polimerización se pueden dividir en:

- Reacciones de adición o crecimiento en cadena
- Reacciones de condensación o crecimiento por pasos

Las reacciones de condensación o crecimiento por pasos ocurren con monómeros que tengan dos o más grupos funcionales (-COOH, o cloruro de ácido, -COCL, alcohol, -OH, amina, -NH<sub>2</sub>, isocianato, -N=C=O), liberando moléculas de bajo peso molecular como agua o cloruro de hidrógeno.

La reacción de adición se puede dar por dos clases de monómeros; los insaturados, que contienen algún doble enlace en su molécula, o heterociclos, capaces de abrir el ciclo. En esta clase de polimerización los polímeros se sintetizan por la adición de monómeros insaturados a la cadena creciente. El Polietileno siempre sintetiza por reacciones de adición mediante la apertura del doble enlace del etileno.

Las reacciones de polimerización por adición o crecimiento en cadena pueden transcurrir por los siguientes mecanismos:

- Por vía radicalica
- Por vía iónica (catiónica o aniónica)
- Por coordinación

En estas se diferencian tres diferentes etapas: Iniciación, Propagación y Terminación.

1. Iniciación: Transcurre cuando una especie activa R\* se une a la molécula de un monómero determinado, de acuerdo a la siguiente reacción:



La especie activa puede ser un monómero activado por calor, radiación (Ultravioleta y Rayos gamma) o ser un agente químico (Catalizador).

2. Propagación: La especie activa  $RM^*$  prosigue la reacción incorporando mas unidades de monómero, esta puede continuar en n pasos.

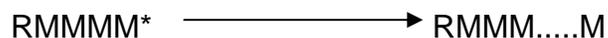


3. Terminación: Existen dos formas de que termine la reacción. Por acoplamiento y por desproporcionamiento.

Por acoplamiento se da cuando dos especies activas en etapa de crecimiento chocan cabeza con cabeza provocando que el electrón ( $e^-$ ) desapareado de cada especie reactiva se una para formar un enlace tipo covalente entre carbono – carbono.

La segunda forma de terminar la reacción es llamada por desproporcionamiento. Se da cuando se encuentran dos especies activas y en vez de unirse, un radical le dona un electrón ( $e^-$ ) al otro, formando dos moléculas estables, una saturada y otra con un doble enlace terminal.

La reacción general de terminación es la siguiente:

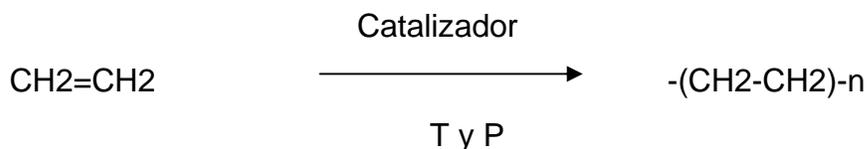


La iniciación por calor o radiación proporciona una homólisis del doble enlace del monómero, resultando en un mecanismo de reacción vía radicales libres.

Si la iniciación se consigue con catalizadores, estas sustancias pueden provocar tanto la homólisis como la heterólisis del doble enlace. Por tanto, la polimerización puede transcurrir a través de radicales libres, por vía catiónica o por vía aniónica, o todavía por coordinación, que es cuando se utilizan complejos constituidos por compuestos de transición y organometálicos.

### 1.6 Reacción de polimerización del Polietileno de alta densidad

La reacción general de polimerización del Polietileno es la siguiente:



En esta como en cualquier reacción química intervienen las variables de reacción como lo son la temperatura T, presión P y tipo de catalizador. En donde de acuerdo a la variación de estas, así es la obtención de los diferentes tipos de Polietileno.

No importando los cambios en las variables de reacción de polimerización del Polietileno, siempre las olefinas polimerizan por adición y presentan las etapas de iniciación, propagación y terminación.

## **1.7 Tipos de catalizadores utilizados para la polimerización del Polietileno de alta densidad**

Para la polimerización del Polietileno de alta densidad se pueden utilizar diferentes tipos de catalizadores, sabiéndose que el mismo es una sustancia que acelera la velocidad de la reacción química sin sufrir en sí ningún cambio químico.

Los catalizadores utilizados para la obtención de Polietilenos de alta densidad tienen en común que trabajan a temperaturas y presiones relativamente bajas, y producen un material de bajo nivel de derivación y alta densidad.

Dentro de los catalizadores utilizados para la obtención de Polietileno de Alta Densidad se encuentran los siguientes:

1. Catalizador Ziegler – Natta
2. Catalizador proceso Phillips
3. Catalizador Metaloceno

### **1.7.1 Catalizadores Ziegler – Natta**

Este catalizador fue descubierto a principios de la década de los cincuenta por Ziegler en Alemania y Natta en Italia. Consiste en un complejo catalítico de alquil aluminio y tetracloruro de titanio y trabaja a presión atmosférica y temperatura de entre 50 – 100 °C.

La reacción que se lleva a cabo es de tipo de coordinación y la molécula crece como un cabello a partir de la superficie del catalizador. Los monómeros de etileno se difunden a través del solvente hasta la superficie del catalizador y de allí al punto de crecimiento; en donde se produce la ruptura del enlace covalente y se genera la adición del monómero. Debido a que el monómero es insertado en un punto específico de la cadena, no existe posibilidad para el mecanismo de back-biting (Retromordida).

El proceso de retromordida es cuando se generan polímeros ramificados, ya que un electrón (e-) desapareado al final de la cadena arrebató uno de un enlace carbono hidrógeno a su propia cadena principal, cerrando la cadena final y dejando una posibilidad de enlace en una zona intermedia de la cadena.

Los Polietilenos sintetizados con catalizadores Ziegler-Natta presentan un nivel despreciable de ramificación, del orden de una cada cien átomos de carbono.

El catalizador Ziegler-Natta está compuesto de un cocatalizador, el alquilo aluminio y un catalizador que es el tetracloruro de titanio, provocando una catálisis heterogénea con estereoquímica controlada.

### **1.7.2 Proceso Phillips**

Este tipo de catalizador lo patentó la Phillips Petroleum Co, que consiste en óxido metálico, ya sea de cromo o titanio, soportado sobre sílice aluminio. Este tipo de catalizador trabaja a presiones medias de 5 – 15 Kg/cm<sup>2</sup> y temperatura de 100 a 170° C, con un hidrocarburo disolvente, como lo puede ser el hexano.

Con esta reacción se obtiene un Polietileno de alta densidad de estructura lineal y altamente cristalino. Este proceso también recibe el nombre de “partícula”.

### **1.7.3 Catalizadores Metallocenos**

Esta familia de catalizadores Metallocenos fue descubierta en la década de los setenta en Alemania por Kaminsky y Sinn, constituidos por dos componentes de Zirconoceno y un compuesto orgánico-metálico que permite distribuir los comonomeros mas uniformemente en las cadenas poliméricas. Este tipo de catalizadores se utilizan para sintetizar al Polietileno de ultra alta masa molecular.

## **1.8 Forma de obtención del Polietileno de alta densidad**

Existen dos métodos para la obtención de Polietileno de alta densidad, en los cuales se requieren de presiones y temperaturas bajas.

### **1.8.1 Suspensión**

La polimerización se efectúa por la mezcla de etileno e hidrocarburos disolventes en un catalizador de lecho fijo, para después separar el polímero del hidrocarburo disolvente. Las condiciones de la reacción son, de 100 a 170 °C de temperatura y de 5 a 15 Kg/cm<sup>2</sup> de presión. El Polietileno obtenido se caracteriza por una estructura lineal y gran densidad. Este proceso fue patentado por la compañía Phillips Co.

### **1.8.2 Fase gaseosa**

La polimerización en fase gaseosa comienza con la alimentación directa del etileno, que debe ser de alta pureza (aproximadamente del 99.8%), y el catalizador en polvo (cromo modificado con sílice). Ambos se alimentan continuamente y el Polietileno es desalojado intermitentemente del reactor, a través de una cámara con sello para gases.

### **1.9 Cristalinidad del Polietileno de alta densidad**

La cristalinidad esta determinada fundamentalmente por la estructura que posea el polímero. El estado cristalino en polímeros se asocia a un empaquetado ordenado de las cadenas que lo forman, alineadas, de manera que origina una situación de orden de sus átomos.

El Polietileno de alta densidad es esencialmente cristalino ya que la cristalinidad esta favorecida por las estructuras simétricas, que permiten un empaquetamiento mas regular de las cadenas en el sólido, y que permiten, también, una mayor proximidad entre cadenas, lo cual favorece las interacciones entre ellas.

El Polietileno de alta densidad no es totalmente cristalino, pues dado el tamaño de la molécula lo habitual es encontrar zonas ordenadas dispersas en zonas amorfas, es decir un estado semicristalino. De las zonas cristalinas / zonas amorfas depende la cristalinidad. Esta relación se denomina grado de cristalinidad.

El grado de cristalinidad que se alcanza depende de la estructura, además del proceso seguido para la cristalización. Según la temperatura a la que se efectuó ésta, la rapidez con que se generan los cristalitos, y el tratamiento térmico y mecánico posterior del polímero, así la cristalinidad resulta mayor o menor.

La cristalinidad juega un papel muy importante en las propiedades del Polietileno de alta densidad, principalmente en las propiedades mecánicas y térmicas ya que estas se ven favorecidas entre más cristalino es el Polietileno.

### **1.10 Conformación**

La conformación se refiere a los distintos estados torcionales que puede tomar una cadena de Polietileno, ya que los enlaces C-C tiene 3 posibles estados torcionales, se puede formar un sin fin de formas distintas para la macromolécula. Cada una de las distintas formas es lo que se llama conformación de la macromolécula.

Las distintas conformaciones que puede tomar el Polietileno de alta densidad producto de la aplicación de una fuerza externa (estiramiento o calor) lo hacen flexible y no quebradizo, ya que la molécula absorbe dichas fuerzas por medio del reordenamiento de los enlaces, esto en lugar de ceder y romperse.

### 1.11 Grados

La combinación de las diversas características del Polietileno de alta densidad como lo son: la densidad, índice de fluidez, peso molecular, distribución del peso molecular, contenido de monómeros, proporcionan los diversos grados que el mercado ofrece de este plástico.

### 1.12 Aditivos

Los aditivos son productos que se mezclan con el Polietileno de alta densidad con el objeto de mejorar las propiedades del polímero, como facilitar su procesado o dar un determinado color o textura. Los aditivos suelen pertenecer a alguno de los siguientes grupos:

**Colorantes:** Los ingredientes usados para colorear los materiales plásticos son tintes, pigmentos orgánicos o inorgánicos, o ciertos compuestos especiales como escamas metálicas o pigmentos fluorescentes. Los tintes se usan en general para obtener colores brillantes en materiales plásticos transparentes o traslucidos. Los pigmentos orgánicos están formados por partículas sólidas discretas constituidas por agregados de moléculas de tinte. Los pigmentos inorgánicos son sales y óxidos metálicos y no son brillantes.

**Agentes antiestáticos:** Se añaden para disminuir la creación de cargas electrostáticas en el producto final.

**Estabilizantes:** Estos productos se utilizan para prevenir la degradación del material cuando la temperatura de procesado es alta o para alargar la vida del producto en entornos degradantes.

**Retardadores de llama:** Son productos que actúan de cuatro formas distintas:

- Produciendo una reacción química que da lugar a productos menos combustibles.
- Produciendo gases pesados que tienen un efecto sofocante o aislante del fuego.
- Impidiendo el paso de oxígeno.
- Produciendo un descenso de la temperatura por absorción del calor en una reacción endotérmica.

**Lubricantes:** Se emplean para mejorar la procesabilidad del material y la apariencia del producto plástico.

**Rellenos:** Estos productos tienen una función múltiple: reducen el coste, proporcionan solidez, aumentan la velocidad de endurecimiento o curado, minimizan la contracción debida a la polimerización que dificulta el moldeo del material, reducen el agrietamiento, mejoran la resistencia térmica y proporcionan determinadas propiedades eléctricas, mecánicas o químicas.

**Plastificantes:** Son productos estables desde el punto de vista químico y térmico que se añaden al polímero para mejorar la flexibilidad, maleabilidad y la procesabilidad del plástico.

**Antioxidantes:** Son aditivos que retardan o inhiben la oxidación del material durante su procesado, o para unas determinadas condiciones de uso.

## 2. ESTUDIO DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD

### 2.1 Clasificación del Polietileno de alta densidad

Para la clasificación de los distintos tipos de Polietileno de alta densidad, existen criterios que intervienen, como lo son: la Densidad, Contenido de Monómeros, Peso molecular, Distribución de peso molecular, Índice de fluidez y Modificación. La clasificación que más se utiliza es la densidad, pues este parámetro es un buen indicativo de las cualidades entre los Polietilenos, donde en general, con densidades altas, mayores propiedades mecánicas. De acuerdo a la densidad el Polietileno de alta densidad se puede dividir en:

1. Polietileno de alta densidad
2. Polietileno de alta densidad alta masa molecular (PEAD-APM o sus siglas en ingles HMW-HDPE)
3. Polietileno de ultra alta masa molecular
4. Polietileno modificados por entrecruzamiento

El contenido de monómeros determina en gran medida la estructura del Polímero de etileno, en particular el grado de ramificación. En este sentido, de esto dependen las cualidades del plástico. Los Polímeros de etileno por el contenido de monómeros se puede clasificar como:

- Homopolímeros
- Copolímeros

El tipo copolímero presenta pequeñas ramificaciones metil, etil, butil, etc. Dependiendo del comonomero (propileno, buteno, hexeno, etc.); la cantidad de estas ramificaciones depende del comonomero incorporado. De hecho, la adición del comonomero es para controlar el grado de ramificación que presentara el polímero y, por tanto, las cualidades del mismo. Los homopolímeros desarrollan mayor grado de cristalización que los copolímeros ya que posee menos ramificaciones. Por esta razón el homopolímero tiene un punto de fusión más alto que el copolímero.

El peso molecular o grado de polimerización es una medida de la longitud de la molécula. Las cualidades mecánicas tienden a mejorar conforme aumenta este parámetro, así como su resistencia a fluir en la maquinaria de transformación.

La distribución del peso molecular se refiere al estudio estadístico del tamaño que tienen las cadenas, describiendo una curva de distribución generalmente normal, es decir “la campana de Gauss”. Se definen dos tipos de pesos moleculares promedio; promedio en peso  $M_w$  y promedio en número  $M_n$ . La diferencia relativa entre ambos promedios depende de lo ancha o estrecha que sea la distribución del peso molecular. Su cociente  $M_w/M_n$  es un índice de la anchura de la distribución o dispersión.  $M_w/M_n$  es siempre mayor que la unidad, y se aleja tanto más de 1 cuando mayor es la dispersión.

Si las cadenas que componen el polímero tienen todas ellas longitudes no muy diferentes, la distribución es estrecha y  $M_w/M_n$  no difiere mucho de la unidad. Los promedios de peso molecular y su distribución se determinan mediante diferentes técnicas experimentales, tales como osmometría, viscosimetría, difusión de luz, cromatografía de exclusión.

Tanto el peso molecular como la distribución del peso molecular dependen del tipo de síntesis que tenga el polímero así como de las probabilidades en las que finalice la reacción de polimerización del Polietileno de alta densidad, ya sea por acoplamiento o desproporcionamiento.

El Índice de fluidez es un parámetro indicativo de la capacidad de flujo del plástico en estado fundido. La obtención de esta información se da en condiciones normalizadas de laboratorio, de esta manera es posible realizar comparaciones en condiciones semejantes. El Índice de fluidez o la capacidad de flujo de los Polietilenos no dependen solamente del peso molecular, también la distribución del peso molecular y el grado de ramificación entre otros factores, afectan la capacidad de flujo del polímero.

La modificación de los Polietilenos se refiere a mezclas, cargas, refuerzos y agentes entrecruzantes, los cuales cambian las propiedades intrínsecas que tiene el polímero virgen. Los agentes entrecruzantes cambian, como ya se mencionó, el comportamiento del polímero; mejorando su desempeño a la temperatura y resistencia de desgaste, entre muchas otras.

## **2.2 Polietileno de alta densidad**

Es un polímero sintético, termoplástico miembro de las poliolefinas obtenido a partir de una reacción conocida con el nombre de polimerización del Polietileno elaborado a partir de etano, un componente del gas natural.

El Polietileno de alta densidad es semicristalino (70 – 80%), incoloro, inodoro, no tóxico, lácteo y se puede encontrar en todas las tonalidades transparentes y opacas.

## 2.3 Propiedades generales del Polietileno de alta densidad

Las propiedades del Polietileno de alta densidad como las de cualquier otro polímero dependen fundamentalmente de su estructura, es decir básicamente de su: Peso molecular y Cristalinidad.

### 2.3.1 Propiedades físicas

El Polietileno de alta densidad tiene una densidad como se observa en la tabla siguiente de 0.941 – 0.965 g/cm<sup>3</sup>; presenta un alto grado de cristalinidad, siendo así un material opaco y de aspecto ceroso: la transmitancia de este plástico es de cero a cuarenta por ciento, dependiendo del espesor.

**TABLA I.** Principales propiedades físicas del Polietileno de alta densidad

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	0.941 – 0.965
Absorción de Agua	mg a 96 h	<0.5
Contracción	%	1.5 – 3
Resistencia a la tensión al Cede	N/mm <sup>2</sup>	18 – 35
Elongación Punto de Ruptura	%	1000
Resistencia al impacto Ranurado <sup>1</sup>		
A 20 C	KJ/m	No rompe –6
A –20 C	KJ/m	>5
Temperatura de Defección		
1.86 N/mm <sup>2</sup>	C°	50
0.45 N/mm <sup>2</sup>	C°	75
Resistencia Dieléctrica	KV/cm	>600

Existen pruebas de permeabilidad a gases del Polietileno de alta densidad, donde depende del espesor de la muestra, de la densidad, y de la temperatura durante la medición.

En el Polietileno de alta densidad a mayor densidad, menor permeabilidad, debido a su naturaleza no-polar, absorbe muy poca humedad y tiene alta cualidad de barrera a vapor de esta sustancia.

El Polietileno de alta densidad tiene elevada permeabilidad a ciertas sustancias en que es soluble a elevadas temperaturas, como son los solventes alifáticos, aromáticos y clorados.

También presenta cierta permeabilidad a los aceites y grasas, en particular a la esencia de pino, naranja, hierbabuena y alcanfor. En botellas, estas sustancias inducen una ligera suavización en el largo plazo y la posibilidad de fisuras bajo tensión, especialmente en el tipo homopolímero.

### **2.3.2 Propiedades químicas**

La resistencia química de los polímeros a los reactivos inorgánicos tales como ácidos y álcalis es muy elevada. Sin embargo son vulnerables por algunos disolventes orgánicos, sobre todo si tienen similitud química con las unidades estructurales que lo forman. El ataque supone ablandamiento, hinchamiento, llegando a su disolución final. Los polímeros cristalinos presentan mayor resistencia a estos compuestos que los materiales amorfos de la misma composición química, como consecuencia del empaquetamiento entre cadenas que dificulta la penetración del disolvente u otros reactivos.

La estructura no-polar del Polietileno de alta densidad permite que mantenga alta resistencia al ataque de agentes químicos. En general, esta resistencia mejora con el aumento de la densidad y el peso molecular.

La forma de medir este comportamiento es considerando ciertos cambios en las muestras al contacto con la sustancia en prueba; estos cambios son hinchamiento, pérdida de peso o de elongación a la ruptura.

Este plástico soporta muy bien a ácidos fuertes (no oxidantes) y bases fuertes. En niveles superiores a 60 °C, el material resiste muchos solventes, excepto hidrocarburos aromáticos y halogenados, aceites, grasas y ceras que inducen hinchamiento, mismo que es menor con los solventes alifáticos.

El Polietileno de alta densidad es parcial o totalmente soluble en ciertos casos extremos, por ejemplo en benceno o xileno a punto de ebullición. Los halógenos y las sustancias altamente oxidantes atacan a este plástico, por ejemplo ácidos inorgánicos concentrados como ácido nítrico, sulfúrico, perclórico, etc.

El cambio en las cualidades de ese plástico debido a los compuestos referidos y en general, a cualquier sustancia depende de varios factores: concentración, tiempo de exposición, peso molecular, tensiones residuales de la transformación o inducidas mecánicamente, principalmente.

Las principales propiedades químicas del Polietileno de alta densidad se describen en la tabla de la página siguiente:

**Tabla II.** Principales propiedades químicas del Polietileno de alta densidad

<b>Reactivo</b>	<b>Resistencia</b>
Ácidos – concentrados	Buena
Ácidos – diluidos	Buena
Alcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y Aceites	Aceptable
Halógenos	Mala
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable-Buena

### **2.3.3 Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas de un material se refieren a su capacidad para soportar fuerzas, el modo como se deforman y ceden ante dichas fuerzas. Así las propiedades mecánicas del Polietileno de alta densidad dependen básicamente de su estructura, que comprende lo que es la distribución del peso molecular, el peso molecular y la cristalinidad. Pero también depende de factores externos como lo son la temperatura, entorno químico y el tiempo, entendido este último como medida de la rapidez con que se aplican fuerzas, así como de la duración de éstas.

La rigidez, dureza y resistencia a la tensión del Polietileno de alta densidad se incrementa con la densidad, ya que si esta aumenta es un indicador de que el material es más cristalino, y por lo tanto será más resistente ante la misma magnitud de fuerza aplicada que un espécimen de menor densidad.

Así también al aumentar el peso molecular hasta cierto “punto” las propiedades mecánicas mejoran. Pesos moleculares inferiores a dicho punto suelen no ser tan útiles. Rebasado este punto, la resistencia mecánica suele seguir mejorando, pero ya mas gradualmente, a medida que aumenta el peso molecular.

Debido a ello se supone que lo mejor es aumentar el peso molecular para mejorar las propiedades mecánicas, sin embargo el proceso de fabricación se hace a partir del polímero fundido, y la viscosidad del fundido crece exponencialmente con el peso molecular, por lo que, pesos moleculares muy elevados requieren mayores esfuerzos y más alto consumo de energía en la fabricación de piezas.

Por lo tanto se debe de llegar a un punto de equilibrio entre la factibilidad en el proceso y la resistencia que se desea del material.

Dicho punto de equilibrio se obtiene industrialmente ya que es bastante flexible. Como ejemplo se puede mencionar el Polietileno de ultra alta masa molecular, que tiene el peso molecular mas alto alcanzable, pero su costo también es elevado.

El Polietileno de alta densidad es muy tenaz, de esta manera demuestra alta resistencia a los impactos aun a bajas temperaturas, pues es capaz de absorber parte de la energía proveniente de los impactos mediante deformaciones. Esto lo logra gracias a las zonas amorfas del polímero ya que dichas deformaciones se traducen en cambio de conformación del material.

A continuación se detalla las propiedades mecánicas más importantes del Polietileno de alta densidad.

**Tabla III.** Principales propiedades mecánicas del Polietileno de alta densidad

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Coeficiente de Fricción		0,29
Dureza – Rockwell		D60-73 – Shore
Módulo de Tracción	( GPa )	0,5-1,2
Relación de Poisson		0,46
Resistencia a la Tracción	( MPa )	15-40
Resistencia al Impacto Izod	( J m <sup>-1</sup> )	20-210

Existen muchas pruebas aplicadas para medir las propiedades mecánicas del Polietileno de alta densidad, las cuales sirven para realizar graficas, como las de Tensión – Deformación. También existen graficas de Influencia de la temperatura, peso molecular y cristalinidad del Polietileno de alta densidad.

#### **2.3.4 Propiedades térmicas**

Las propiedades térmicas de los polímeros dependen en mayor grado de su estructura de lo que dependen las propiedades mecánicas. El comportamiento es distinto si se trata de un polímero amorfo, cristalino o semicristalino.

Si el polímero es amorfo tiene asociado un parámetro que recibe el nombre de Temperatura de transición vítrea  $T_g$ , la cual es la temperatura a la que un polímero pasa de ser un material rígido a otro de características viscosas.

Cuando el polímero es cristalino, ya entra en juego en su comportamiento las fuerzas secundarias entre cadenas, es decir el grado de cristalinidad. Así también tiene relacionada la Temperatura de fusión  $T_m$ , la cual es la temperatura en donde el polímero pasa de ser un sólido ordenado a un líquido viscoso desordenado, ya que por efecto de la temperatura las cadenas adquieren movilidad.

En el caso del Polietileno de alta densidad que es un polímero semicristalino puede tener un comportamiento combinado, haciéndose algo viscoso al llegar a su  $T_g$ , y fundiendo luego al llegar a su  $T_m$ . Sabiéndose que la temperatura de fusión  $T_m$  siempre es mayor que la de transición vítrea  $T_g$ .

Existe también lo que es la temperatura de reblandecimiento la cual ocurre a temperaturas comprendidas entre  $T_g$  y  $T_m$  del polímero. Esta temperatura no es una propiedad termodinámica bien definida, pero es un dato muy útil, porque informa acerca del comportamiento y posibles usos del polímero en todo lo que se relacione con su flexibilidad, dureza, resistencia etc.

También orienta acerca de las temperaturas que son adecuadas para el procesamiento en caliente y acerca de la estabilidad del producto ya formado. El cálculo para la determinación de la temperatura de reblandecimiento depende de la técnica y el procedimiento seguido para determinarla.

Por ello, el dato de temperatura de reblandecimiento debe ir acompañado de información acerca de las condiciones en que se ha obtenido.

El Polietileno de alta densidad muestra un punto de fusión entre 130 y 136 °C, mientras que su temperatura de transición es de 25 °C bajo cero. El calor específico del Polietileno de alta densidad es de los mayores entre los termoplásticos y es altamente dependiente de la temperatura; conforme este se aproxima a la fusión de los cristales, el calor específico aumenta notoriamente, mostrando un máximo. Este fenómeno aumenta conforme cambia la densidad, además de que la temperatura de fusión también es mayor.

La temperatura máxima de servicio depende de la duración y la magnitud del esfuerzo mecánico presente durante el calentamiento: en pruebas sin carga mecánica en períodos cortos, la temperatura máxima es de 90 a 120 °C, en períodos mayores este valor desciende a intervalos entre 70 y 80 °C.

La densidad tiene cierta variación decreciente con un ascenso de la temperatura, este comportamiento es responsable en algunas ocasiones del incontrolable encogimiento en piezas moldeadas de grandes dimensiones. El encogimiento de los productos moldeados con Polietileno de alta densidad es aproximadamente de 1.5 – 4% y sucede principalmente en la fase de cristalización del polímero. Este fenómeno depende de las variables de transformación, pero también de las características moleculares del plástico: Peso molecular y Distribución del peso molecular.

En la página siguiente se detalla una tabla con las propiedades térmicas del Polietileno de alta densidad más importantes.

**Tabla IV.** Principales propiedades térmicas del Polietileno de alta densidad

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Calor Específico	( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	1.9
Conductividad Térmica	a 23 °C ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	0.45-0.52
Dilatación Térmica	( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	100-200
Temperatura Máxima de Utilización	( °C )	55-120
Temperatura de Deflexión en Caliente – 0.45Mpa	(°C )	75

### **2.3.5 Propiedades eléctricas**

El Polietileno de alta densidad consiste en largas cadenas unidas entre sí con enlace de tipo covalente y por ello es un excelente aislante eléctrico, es decir un material no conductor de la electricidad. Aunque tiene el inconveniente de almacenar cargas eléctricas estáticas, induciendo la aparición de "micro" arcos eléctricos que atraen el polvo y pueden provocar descargas. Estas cargas se almacenan por fricción, durante el uso, pero también se generan durante los procesos de fabricación.

Para evitar estos efectos, es posible agregar algunos agentes antiestáticos al Polímero como amidas, etoxi-amidas, esterres, glicerol, y otros, que migran a la superficie del Polímero y captan humedad del medio ambiente, formando una delgada capa conductora, que disipa las cargas estáticas.

La permeabilidad eléctrica, o constante dieléctrica es una propiedad muy importante del Polietileno de alta densidad que esta relacionada con la polarización que puede crearse en él, cuando se le somete a un campo eléctrico.

Esta polarización, es debida al desplazamiento de cargas (electrones y núcleos atómicos), respecto de sus posiciones de equilibrio (en ausencia de campo), y también, a la orientación de los dipolos de la molécula, que tiene lugar en presencia de dicho campo.

Por ello, la determinación de la constante dieléctrica puede informar acerca de los dipolos en la estructura química del polímero, y también, acerca de la conformación de las cadenas, porque los dipolos locales que hay en los eslabones se acoplan dando un dipolo resultante distinto según cual sea la forma de la cadena.

La constante dieléctrica, en frecuencias desde sesenta hertz a un megahertz es de 2.2 a 2.4, es decir, mantiene este parámetro dentro de límites muy estrechos, en un amplio cambio de frecuencias. Por otro lado, la resistividad volumétrica es mayor a  $10^{16}$  ohms-cm.

Las principales propiedades eléctricas del Polietileno de alta densidad se describen en la tabla de la página siguiente:

**Tabla V.** Principales propiedades eléctricas del Polietileno de alta densidad

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Constante Dieléctrica	A 1MHz	2.2 – 2.4
Factor de Disipación	A 1 MHz	$1-10 \times 10^{-4}$
Resistencia Dieléctrica	( kV.mm <sup>-1</sup> )	22
Resistividad Superficial	( Ohm/sq )	$10^{13}$
Resistividad de Volumen	( Ohmcm )	$10^{15}-10^{18}$

### **2.3.6 Propiedades ópticas**

Las propiedades ópticas están relacionadas con la estructura molecular del polímero, así como con la cristalinidad y la homogeneidad del material. El Polietileno de alta densidad es semicristalino, incoloro, inodoro, no toxico, lácteo y se puede encontrar en todas las tonalidades transparentes y opacas. En el mercado este polímero se puede encontrar en cualquier color.

## **2.4 Polietileno de alta densidad alta masa molecular**

La fabricación de este plástico puede ser por el método de Ziegler, Phillips o (Fase gaseosa). Este polímero se diferencia del de alta densidad convencional por su peso molecular promedio, el cual se encuentra entre 200,000 y 500,000 g/g-mol. Otra manera de caracterizarlo es por su índice de flujo que es de alrededor de 0.1 g/10 minutos, que es inversamente proporcional al peso molecular, por esta razón presenta mayor viscosidad en el procesamiento. Su densidad es de 0.944 – 0.954 g/cm<sup>3</sup>.

### **2.4.1 Propiedades**

El Polietileno de alta densidad alta masa molecular presenta propiedades como: buena resistencia al rasgado, amplio rango de temperaturas de trabajo (40° bajo cero a 120°), impermeabilidad al agua y no guarda olores.

En cuanto a su resistencia química, ésta es muy parecida a la presentada por el Polietileno de alta densidad, pero el mayor peso molecular mejora este comportamiento, implicando mayor tiempo de exposición en pruebas estandarizadas, sin presentar fracturas; aunque su estructura y naturaleza no-polar es la misma.

### **2.5 Polietileno de ultra alta masa molecular**

Este tipo de Polietileno es de alta densidad y elevado peso molecular; alrededor de 3 a 6 millones de gramos por cada gramo-mol, es un termoplástico industrial semicristalino, blanquecino y realmente opaco. Debido a su alto peso molecular presenta propiedades especiales. Es un material muy difícil de procesar por su elevado peso molecular. Posee un índice de fluidez muy bajo por lo que es casi imposible usarlo en los métodos de transformación de plásticos como lo es soplado, inyección y extrusión.

### **2.6 Propiedades generales del UHMWPE**

Las propiedades del Polietileno de ultra alta masa molecular son diferentes al de los dos tipos de polietilenos antes mencionados debido básicamente a su alto peso molecular.

Esto provoca que sea mucho más cristalino y más denso provocando que sea bastante resistente a tal punto que pueda sustituir aplicaciones de algunos metales como es el caso del acero inoxidable.

### 2.6.1 Propiedades físicas

Entre sus propiedades físicas destaca que es ligeramente más denso que el Polietileno de alta densidad, pero un pequeño cambio en esta propiedad provoca propiedades totalmente diferentes entre ambos. A tal punto que sus aplicaciones son distintas. Las principales propiedades físicas del Polietileno de ultra alta masa molecular son las siguientes:

**Tabla VI.** Principales propiedades físicas del UHMWPE

Propiedades	Unidades	Valor
Densidad	G/cm <sup>3</sup>	0.942 – 0.954
Absorción de Agua	Mg a 96 h	< 0.5
Contracción	%	1.5 – 3
Resistencia a la Tensión al Cede	N/mm <sup>2</sup>	22 – 24
Elongación Punto de Ruptura	%	>800
Temperatura de Deflexión		
1.86 N/mm <sup>2</sup>	°C	---
0.45 N/mm <sup>2</sup>	°C	66-68
Resistencia Dieléctrica	KV/cm	>600

## 2.6.2 Propiedades mecánicas

La propiedad más importante del Polietileno de ultra alta masa molecular, es la resistencia a la abrasión, que junto con su resistencia a los impactos, son de las más elevadas entre plásticos. Además a su alta resistencia a la abrasión, este plástico mantiene una superficie autolubricada de bajo coeficiente de fricción, dinámico y estático, que son significativamente inferiores a las presentadas por el acero y por la mayoría de plásticos.

Las principales propiedades mecánicas del Polietileno de ultra alta masa molecular se describen en la siguiente tabla donde se puede observar que es bastante resistente y con bajo coeficiente de fricción.

**Tabla VII.** Principales propiedades mecánicas del UHMWPE

Propiedades	Unidades	Valor
Coeficiente de Fricción		0.1-0.2
Dureza – Rockwell		R50-70
Módulo de Tracción	( GPa )	0.2-1.2
Alargamiento a la Rotura	(%)	500
Resistencia a la Tracción	( MPa )	20-40
Resistencia al Impacto Izod	( J m <sup>-1</sup> )	1600

El ensayo convencional de impacto Izod ha sido modificado para determinar esta propiedad en el material, pues las muestras no presentan fracturas.

La resistencia a la abrasión que presenta este plástico es muy alta a tal punto que es mejor que la de algunos metales, como se puede observar en la tabla siguiente, que es aproximadamente 60% más resistente a la abrasión que el acero al carbón.

**Tabla VIII.** Resistencia a la abrasión del UHMWPE

<b>Material</b>	<b>Densidad g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Perdida relativa de material por abrasión</b>
UHMWPE	0.94	100
Acero al Carbón	7.45	160
PA	1.15	210
PTFE	2.26	530
Acero Inoxidable	7.85	550
PEBD	0.92	600
PP	0.90	660
POM	1.42	700
PMMA	1.31	1800
PF	1.40	2500
EP	1.53	3400

### **2.6.3 Propiedades eléctricas**

El Polietileno de ultra alta masa molecular es un excelente aislante eléctrico, mostrando una resistividad volumétrica mayor a  $5 \times 10^{14}$  ohm-m. La resistencia dieléctrica es de 900 Kv/cm, su constante dieléctrica es de 2.3.

La resistividad superficial puede cambiar con la adición de negro de humo dependiendo de la cantidad añadida, como se puede observar en la siguiente tabla.

**Tabla IX.** Modificación de la resistividad superficial con negro de humo

<b>Contenido de negro de Humo (% peso)</b>	<b>Resistividad superficial (ohms)</b>
0.2 (Solo Color)	$>10^{14}$
2.5 (Protección UV)	$10^{13}$
6.5 (Antiestático)	$10^5$
16.7 (Conductivo)	$10^3$

#### **2.6.4 Propiedades térmicas**

Las características de este plástico se pueden mantener de 269 °C bajo cero a 90 °C y niveles aun mayores en períodos cortos. La temperatura de fusión es de 138 a 142 °C, pero debido a su naturaleza, no presenta flujo: el plástico mantiene buena estabilidad a niveles tan altos como 200 °C.

Las principales propiedades térmicas del Polietileno de ultra alta masa molecular se resumen en la tabla de la página siguiente:

**Tabla X.** Principales propiedades térmicas del UHMWPE

<b>Propiedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
Calor Específico	( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	1,9
Conductividad Térmica	a23 °C ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	0.42-0.51
Dilatación Térmica	( $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	130-200
Temperatura Máxima de Utilización	( °C )	55-95
Temperatura de Deflexión en Caliente – 0.45Mpa	(°C )	69
Temperatura de Deflexión en Caliente – 1.8Mpa	(°C )	42

### **2.6.5 Propiedades químicas**

La resistencia al ataque de los agentes químicos es excelente, incluyendo a las sustancias más oxidantes. No es resistente a los ácidos sulfúrico y nítrico concentrados. Algunos cuentan con la aceptación FDA, que les permite el contacto con alimentos. La exposición prolongada a la radiación ultravioleta (mayor a un año) degrada a este material como a otras poliolefinas, induciendo la aparición de grietas y la reducción del desempeño mecánico en casos muy extremos.

En la tabla de la página siguiente se muestra la resistencia química del Polietileno de ultra alta masa molecular a diferentes sustancias químicas.

**Tabla XI.** Principales propiedades químicas del UHMWPE

<b>Reactivo</b>	<b>Resistencia</b>
Ácidos – concentrados	Aceptable
Ácidos – diluidos	Buena
Álcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena
Grasas y Aceites	Aceptable
Halógenos	Aceptable-Buena
Hidrocarburos Aromáticos	Mala

## **2.7 Aditivos utilizados para el UHMWPE**

Existen diferentes tipos de aditivos que se pueden agregar a este Polietileno para mejorar algunas de sus propiedades, pero sin importar el aditivo agregado, las principales cualidades no pueden mejorar y son la resistencia a la abrasión y al impacto. Este tipo de Polietileno se adquiere en forma de polvo el cual puede contener pigmentos, absorbedores de rayos ultravioleta, agentes antiestáticos, entrecruzantes, retardantes a la flama, cargas o compuestos para crear grados conductivos eléctricos o térmicos.

Los aditivos deben añadirse antes del procesamiento del polvo y por esta razón, el tamaño de la partícula debe ser similar a las del plástico para facilitar su dispersión.

Las cargas y refuerzos como harina de madera, esferas de vidrio, polvo de grafito y aluminio, talco, carbonatos y silicatos mejoran la dureza y la resistencia a la deformación bajo carga constante, también ayudan a la estabilidad dimensional y modificación de la expansión térmica.

Estos aditivos pueden estar presentes en concentraciones entre cinco y treinta por ciento. El entrecruzamiento por medio de un 0.30 a 0.50% de ingrediente activo peroxido, mejora hasta treinta por ciento la resistencia al desgaste y reduce la deformación bajo carga. También es factible aplicar el proceso para la reticulación con rayos energéticos gamma o beta, pero se requiere la adición de antioxidantes para evitar la degradación que provoca la ruptura de las cadenas moleculares, sin embargo, este método puede ser posterior al moldeo de los artículos.

Las formulaciones antiestáticas contienen entre 5 y 6.5% de negro de humo conductivo, exhibiendo una resistividad superficial de  $10^6$  a  $10^9$  ohms. La protección contra la radiación ultravioleta es posible con absorbedores como el negro de humo a 2.5 %. Si la aplicación requiere otra coloración al negro, la formulación puede contener un 0.5% de otros estabilizadores, manteniendo sus cualidades durante cinco años.

El polvo metálico como cobre, aluminio y bronce aumentan la conductividad térmica de este plástico. Niveles de 30% de aluminio o 10% de grafito, aumenta la conductividad a 2.5 W/m-K.

La inflamabilidad del Polietileno de ultra alta masa molecular se reduce con la adición de una mezcla de compuesto halogenador y de trióxido de

antimonio.

## **2.8 Polietileno entrecruzado**

Además de los tres Polietilenos antes mencionados existe otro que es el Polietileno entrecruzado, el cual tiene su estructura lineal alterada, en forma de red tridimensional entrelazado, similar a la que presentan los plásticos termofijos.

## **2.9 Métodos para entrecruzar**

Existen tres métodos para el entrecruzamiento de Polietilenos de baja y alta densidad. Los métodos son los siguientes: Peroxido orgánico, Inserción de un silano y Radiación de alta energía

### **2.9.1 Peroxido orgánico**

Esta técnica requiere temperaturas iniciales bajas de procesamiento, para prevenir la descomposición prematura del peroxido (generalmente peroxido de dicumilo); posteriormente, la aplicación secundaria de alta temperatura y presión es con la intención de iniciar el entrecruzamiento y asegurar la estabilidad de la geometría del producto durante la reticulación.

El grado de entrecruzamiento depende básicamente del nivel en la descomposición del peroxido y la estructura del polímero, en este sentido, las condiciones que aumentan la reticulación son: altos niveles de oxígeno activo en el peroxido, moléculas con alto grado de ramificación, bajo impedimento estérico de las cadenas laterales en la molécula principal, peso molecular medio y baja densidad en el Polietileno.

Esto explica porque el Polietileno de baja densidad presenta mayor facilidad para el entrecruzamiento por éste método que el Polietileno de alta densidad.

### **2.9.2 Silano insertado**

En esta tecnología se emplean dos componentes: el copolímero de etileno con grupos vinil-silano y el masterbatch catalizador del entrecruzamiento; este último se emplea en proporciones alrededor del 5%.

El copolímero proviene de la inserción química del grupo funcional vinil-silano en las cadenas del polímero.

El entrecruzamiento es posterior al proceso de transformación gracias a la presencia de humedad, la cual inicia el entrecruzamiento y generalmente el artículo es expuesto en uno de tres sistemas: un cuarto de vapor, inmersión en agua caliente y el almacenamiento con humedad y condiciones ambientales, que reporta el entrecruzamiento luego de algunas semanas.

La velocidad del entrecruzamiento depende de varios factores: la humedad, la temperatura, la construcción del artículo, las características del copolímero Etileno Vinil-Silano, el catalizador y los aditivos del compuesto.

### **2.9.3 Radiación de alta energía**

Este método consiste en el bombardeo del producto en su forma final, con radiación de alta energía, proveniente de un acelerador de electrones o de isótopos. Este método permite graduar la profundidad de la capa entrecruzada

y no requiere control especial sobre la temperatura de procesamiento.

La restricción de esta tecnología es el alto capital requerido para la adquisición del equipo y las instalaciones necesarias.

## 2.10 Propiedades del Polietileno entrecruzado

Debido al cambio en su estructura, el material eleva el valor de su resistencia a la deformación bajo carga dinámica, así como el esfuerzo al impacto a bajas temperaturas, y su resistencia a la fisuración bajo tensión en ambientes corrosivos.

Los Polietilenos entrecruzados no funden ante la aplicación de elevadas temperaturas, solo reblandecen. Puede soportar periodos tanto continuos como cortos de altas temperaturas. El Polietileno de alta densidad tratado con este fin, se procesa en el método de inyección a temperaturas alrededor de 160°C y se entrecruza dentro del molde por arriba de los 230°C. En la siguiente tabla se presentan las principales propiedades del Polietileno entrecruzado.

**Tabla XII.** Propiedades del Polietileno entrecruzado

Propiedad	Unidades	Valor
Densidad	G/cm <sup>3</sup>	0.91 – 1.45
Absorción de Agua	mg a 96 h	0.01 – 0.06
Contracción	%	1.5 – 3
Resistencia a la tensión al cede	N/mm <sup>2</sup>	2130
Elongación Punto de Ruptura	%	10 – 600

Temperatura de Deflexión		
1.86 N/mm <sup>2</sup>	°C	38 – 80

### **3. MÉTODOS DE TRANSFORMACIÓN DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

#### **3.1 Generalidades**

La fabricación del Polietileno de alta densidad se puede dar por diferentes métodos. Previamente a su transformación, se adicionan aditivos, esto recibe el nombre de formulación.

Dentro de los métodos de transformación se encuentran el de Extrusión, Inyección, Soplado, Rotomoldeo, Termoformado, y Compresión. Por medio de una o más de estas técnicas es posible transformar los diferentes tipos de Polietileno de alta densidad.

#### **3.2 Moldeo por Extrusión**

El moldeo por Extrusión consiste en introducir el Polietileno de alta densidad en forma de grana en un cilindro en cuyo interior se encuentra el husillo. El material es empujado, compactado y finalmente fundido en el cilindro y después extruído en el cabezal saliendo al exterior en forma de tubo, película, lamina, perfil y otros. La pieza al salir de la extrusionadora pasa por un baño de agua que va enfriando la pieza progresivamente.

El moldeo por Extrusión es un proceso de fabricación continua y el más utilizado para la transformación del Polietileno de alta densidad pero tiene la desventaja de fabricar piezas inconclusas las cuales necesitan un tratamiento posterior al moldeo por extrusión. Tal es el caso de la laminación que necesita el moldeo por Termoconformado.

### **3.2.1 Husillo y cilindro**

El husillo es la parte fundamental de la extrusora, su diseño varia según el material, la forma y finalidad de los artículos a fabricar. Para el Polietileno de alta densidad se recomiendan los husillos con zonas de alimentación y dosificación largas y la zona de compresión corta; con ello se garantiza la homogeneización del material.

Los cilindros deben de ser fabricados para soportar altas presiones y temperaturas de operación, así como la abrasión. En el exterior del cilindro van instalados dispositivos especiales para calentar y enfriar las zonas del cilindro.

### **3.2.2 Perfiles de temperatura**

La temperatura varía de acuerdo al grado del material a transformar así como al tipo de producto a obtener y en ocasiones hasta de limitante la misma máquina.

### **3.2.3 Extrusión para fabricar tuberías y perfiles**

El equipo necesario para la fabricación de tuberías y perfiles, consta de un extrusor, dado, formador, tina de enfriamiento, jalador de velocidad variable y enrollador o cortadora.

#### **3.2.3.1 Dado tubería**

Lo más importante en la extrusión de tubería, es el diseño del dado y la distribución del flujo de la masa fundida dentro de este. El flujo se divide en tres corrientes, que luego de ser forzado a pasar por el mandril, las corrientes se vuelven a unir y forman una sola corriente tubular.

El material fundido tiene tres líneas de unión que deben soldarse perfectamente, sin dejar marca alguna, ni presentar falla en el producto final, esto es posible debido a que el plástico que fluye está bajo presión y en estado semi-líquido.

El diámetro exterior del tubo se calibra empleando el formador al vacío, por medio del cual se somete al tubo extruído al vacío, al tiempo de que se enfría. Se recomienda el formador al vacío ya que proporciona mejor acabado.

La tina de enfriamiento consiste en un baño independiente con agua circulante, por donde pasa el tubo extruído. Se recomienda que la temperatura del agua de enfriamiento sea de 30 a 50 °C. El jalador es el elemento donde se genera la fuerza que mantiene al plástico en movimiento dentro de la línea de

extrusión. La bobina o la cortadora es el lugar final dependiendo del producto que se fabrique.

### **3.2.4 Extrusión para la fabricación de película tubular**

Para la fabricación de película tubular de Polietileno de alta densidad se recomienda una distancia entre el dado y los rodillos de 1.50 a 2.50 m. máximo, dependiendo del ancho de la película; también, una relación de soplado entre 3.5:1 a 6:1, la altura de la línea de enfriamiento mayor a 0.40 pero menor que 0.80 metros y una abertura del dado de 1.0016 a 1.524 mm.

Las condiciones de extrusión afectan la resistencia al impacto de la película, pues determinan la orientación de las moléculas; en general, el plástico presenta mejores cualidades mecánicas en el sentido de la orientación.

Las moléculas del Polietileno tienen un tiempo de relajación muy corto, esto es, después de que una fuerza orienta las moléculas, estas adquieren su postura anterior de forma casi inmediata. Solo aquellas cadenas poliméricas que son orientadas justo antes de la línea de enfriamiento, mantienen la orientación proporcionada.

En este sentido, las características de la burbuja, como altura de la línea de enfriamiento y relación de soplado, afectarán la resistencia al impacto.

El sistema de enfriamiento interno de la burbuja, es un dispositivo que continuamente esta renovando el aire que sostienen a la burbuja misma. Este sistema mejora la eficiencia del enfriamiento pues extrae el aire caliente, que ya enfrió a la película e introduce aire fresco. El ritmo de este intercambio mantiene la relación de soplado en una magnitud exacta y constante.

### **3.2.5 Extrusión para fabricar película con dado plano**

El equipo consta de una extrusora, el dado plano, los rodillos de enfriamiento, transportadora de rodillos, unidad de tiro, cortadora y un recogedor.

En el dado para la fabricación de película por “Dado Plano”, la alimentación es por la parte central, pasando hacia el distribuidor de flujo, que reparte el material hacia los extremos del dado. El distribuidor tiene un área muy grande para ofrecer mínima resistencia al flujo, permitiendo que la resina fluya libremente hacia los extremos del dado de manera uniforme. La película se pasa a una serie de rodillos de enfriamiento y de jalado. Un buen enfriamiento mejora las cualidades ópticas de la película: claridad, brillo y baja nebulosidad.

Si la distancia entre el dado y el rodillo de enfriamiento es muy pequeña, se corre el riesgo de que se rompa la película a la salida del dado, un aumento moderado en la distancia elimina los defectos superficiales y mejora la orientación de la misma, favoreciendo las propiedades mecánicas. En el proceso final, la película no se corta, esta es enrollada en bobinas para ser empacada.

Como se puede observar en la tabla de la página siguiente el rango de temperatura recomendado para trabajar en la fabricación del dado plano es igual al de fabricación de película tubular y ligeramente diferente al de fabricación de tubería.

**Tabla XIII.** Perfil recomendado de temperaturas de extrusión (°C) para el Polietileno de alta densidad

<b>Zona</b>	<b>Película tubular</b>	<b>Película dado plano</b>	<b>Tubería</b>
Tolva	40-60	40-60	40-60
Alimentación	190-210	190-210	150-170
Compresión	200-220	200-220	170-190
Dosificación	210-225	210-225	180-200
Dado	220-225		180-220
Relación L/D	20:1;28:1		
Relación de compresión	2:1;3:1		
Rodillos		20-50	

### **3.2.6 Extrusión para fabricar recubrimiento de cable y alambre**

El proceso consiste en tomar el cable del rollo de alimentación, hacerlo pasar por los rodillos de tensado, y después a un calentador. Luego entra a la extrusora donde se le aplica el recubrimiento aislante, sale por el cabezal y pasa a la tina de enfriamiento. Cuando el producto está frío se controla la calidad del aislamiento en el detector de chispa y se verifica el diámetro del cable.

En el último paso, cuando el producto ya está completado se pasa al cabrestante que lo estira antes de ser enrollado, y luego pasa a un distribuidor

para llegar al rodillo de enrollado.

### **3.2.7 Extrusión para el proceso de laminación**

El proceso de laminación consiste en unir una película delgada de Polietileno a uno o más sustratos, con el fin de combinar las propiedades de los materiales. Para hacer la diferencia entre lamina y película, existe un criterio que se basa en el espesor del producto que se elabora. Con espesores mayores a una milésima de pulgada recibe el nombre de lamina; película si el espesor es menor a esta medida.

El proceso de elaboración de lamina es similar al de película con dado plano. El extrusor y al dado, tienen un mecanismo similar, aunque difiere en el grosor del producto que elabora y en la apertura entre los labios del dado. La misma utilizada para película es muy pequeña y crea presiones muy elevadas durante la extrusión.

El espesor del recubrimiento de Polietileno se controla por la alimentación del plástico proporcionada por el extrusor y la velocidad del material por recubrir.

Por medio de estos procesos de laminación, se pueden obtener combinaciones de Polietileno, en donde es importante un buen sellado de los empaques sin que estos retengan el sabor de los alimentos.

Los rodillos de enfriamiento enderezan, refrigeran y proporcionan el acabado superficial a la lamina u hoja que sale de la extrusora. Dichos rodillos se enfrían con agua y se mantiene apretados uno contra otro por medio de un mecanismo hidráulico o neumático.

Con el fin de no dañar la lamina, los rodillos de la unidad de tiro van cubiertos de una capa delgada de hule. La guillotina está provista de instrumentos que permiten hacer cortes automáticamente a determinadas longitudes.

### **3.2.8 Extrusión para la fabricación de lamina espumada**

El proceso de extrusión debe realizarse con especial cuidado, ya que generalmente se emplea como agente espumante gases que son inflamables, y las líneas de extrusión del Polietileno de alta densidad almacenan electricidad estática, que puede liberarse como pequeñas chispas, provocando una posible explosión.

## **3.3 Moldeo por inyección**

El moldeoado por inyección consiste en introducir al Polietileno de alta densidad en forma de granza a un cilindro. En este por acción combinada de calor y presión se convierte al polímero en un líquido viscoso capaz de fluir hasta el molde donde toma forma la pieza en cuestión. Después de un tiempo el plástico se vuelve sólido, el molde se abre y la parte moldeada es removida.

### **3.3.1 Características de maquinaria**

#### **3.3.1.1 Husillo**

Para la inyección de Polietileno de alta densidad se recomienda un husillo

de tipo universal, con una relación L/D de 18:1 a 20:1 y un paso constante de 1D.

La zona de alimentación debe de ocupar el 50% de la longitud, con una relación de compresión de 2:1. Los husillos están regularmente adaptados con una válvula de antirretorno.

### **3.3.1.2 Boquilla**

La boquilla con válvula es la más utilizada, se abre automáticamente cuando se apoya sobre el bebedero del molde, y se cierra cuando la unidad de inyección se separa del molde y la presión del material existente en la cámara de inyección empuja al pistón pequeño contra la parte externa, cerrando el barreno de la salida del material.

## **3.3.2 Condiciones de operación**

### **3.3.2.1 Perfil de temperaturas**

El perfil de temperaturas puede variar de acuerdo al índice de fluidez y al grado del material utilizado. Los perfiles pueden variar si el tiempo de resistencia aumenta o disminuye.

En la tabla de la página siguiente se describen las temperaturas de inyección más recomendadas en las diferentes zonas del equipo de inyección. Esto se aplica a cualquier artículo que se fabrique por este método de transformación.

**Tabla XIV.** Perfil de Temperatura para transformar por inyección al Polietileno de alta densidad

<b>Zona</b>	<b>PEAD (°c)</b>
Tolva	50-80
Alimentación	170-180
Compresión	170-200
Dosificación	180-240
Boquilla	180-240
Molde	10-60

### **3.3.2.2 Presión de inyección**

Se recomienda trabajar en los límites máximos de presión ya que se obtienen piezas de mayor brillo, se disminuye la formación de burbujas y se borran las líneas de unión. Sin embargo, se deben tener temperaturas bajas para evitar los esfuerzos residuales en el área del punto de inyección. La presión se debe de controlar ya que de ella depende la mayor o menor contracción en la pieza a formar. Para alcanzar ciclos menores, se recomienda operar a la máxima presión de inyección, reduciendo simultáneamente el perfil de temperaturas.

Las condiciones recomendadas de Inyección para el Polietileno de alta

densidad se describen en la tabla de la página siguiente:

**Tabla XV.** Condiciones de Inyección para el Polietileno de alta densidad

<b>Zona</b>	<b>Kg/cm<sup>2</sup></b>
Inyección	1500
Sostenimiento	750
Contrapresión	5
Velocidad de Inyección	Alta
Velocidad de Husillo (m/s)	0.75-0.8

### **3.3.2.3 Tiempo de sostenimiento**

Depende del espesor y de la geometría de la pieza. Para calcular el tiempo de sostenimiento, se aconseja reducir progresivamente el tiempo de avance del tornillo hasta que se noten rechupes en la superficie de las piezas. A partir de este punto, se va incrementando a razón de un segundo cada tres o cuatro ciclos hasta que la pieza no tenga marcas.

### **3.3.2.4 Velocidad de inyección**

Se recomienda que para lograr buena apariencia superficial y buenas propiedades mecánicas, la velocidad de inyección sea alta, especialmente para aquellas piezas que tengan espesores muy delgados.

### **3.3.2.5 Velocidad de husillo**

En el Polietileno de alta densidad no se usan velocidades mayores de 0.75 a 0.8 m/s. Si el tornillo tiene un diámetro de 40mm., las revoluciones por minuto no deben exceder de 380.

Similarmente para un tornillo de mayor diámetro (76mm), para obtener velocidades de 0.75 a 0.8 m/s la velocidad de rotación debe ser de 200 r.p.m.

### **3.3.3 Molde**

Para el diseño del molde, debe considerarse que el Polietileno, por ser un material semicristalino, presenta contracciones de moldeo relativamente grandes, de 0.025 a 0.060 cm/cm. Las partes principales que se deben de controlar en el molde son: Los bebedores, coladas, puntos de inyección, orificios de venteo.

Los bebederos no requieren de ninguna consideración especial aunque se deben utilizar ángulos de salida entre 3 y 5°. No se recomienda utilizar diámetro de coladas mayores a 7mm.

Los puntos de inyección se pueden manejar de cualquier tipo como escalón, abanico, lengüeta, aguja, submarino o túnel, de anillo, o disco.

Los orificios de venteo se utilizan cuando las ranuras del plano de

partición de las partes del molde no son suficientes para liberar el aire. Estas recomendaciones se pueden observar en la tabla de la página siguiente:

**Tabla XVI.** Características del molde

<b>Parámetro</b>	<b>Característica</b>
<b>BEBEDEROS</b>	
Ángulo de salida	3-5°
Diámetro	Mayor a Boquilla
<b>COLADAS</b>	
Fría	4-7 mm
Caliente	0.73-0.8 mm
<b>PUNTOS DE INYECCIÓN</b>	Cualquier tipo
Ancho	<0.5 cm
Longitud	<0.75 mm
<b>ORIFICIOS DE VENTEO</b>	0.25 – 0.08 mm

### **3.3.4 Problemas comunes**

Los principales problemas que se presentan en la inyección de Polietileno de alta densidad, son piezas incompletas, por falta de plastificación, o poca presión para la inyección, piezas con mucha rebaba, debido a temperaturas muy altas de plastificación, o una presión muy alta de inyección.

## **3.4 Soplado**

El moldeo por soplado se utiliza para la fabricación de cuerpos huecos. La utilización de Polietileno de alta densidad con este método se puede llevar a cabo por Extrusión soplo e Inyección soplo.

### **3.4.1 Extrusión soplo**

El proceso de moldeo por soplado consiste en obtener una pieza tubular de Polietileno plastificado, que se produce en la extrusora después de pasar por el dado. La pieza tubular recibe el nombre de párison o preforma, que es atrapada entre las secciones huecas que componen el molde y que al inyectarle aire a presión se obliga al material plastificado a tomar la forma del molde. En el proceso de extrusión soplo, se recomienda un extrusor con un L/D de 20:1 a 28:1, y la relación de compresión de 2:1 a 3:1. La extrusora debe contar con un cabezal en ángulo recto para dirigir el material hacia abajo sobre el dado.

#### **3.4.1.1 Temperatura de plastificación**

Es la temperatura con la que sale el material del dado y de esta depende el tiempo necesario para enfriar la pieza antes de salir del molde.

También influye con la buena calibración de las paredes del artículo, debido al alargamiento que puede sufrir la preforma, y en la apariencia superficial del mismo.

#### **3.4.1.2 Presión de soplado**

El llenado correcto de las cavidades del molde depende de la presión de

soplado, esta se ajusta según el tamaño de la pieza y del diseño del molde.

#### **3.4.1.3 Velocidad de aire**

Este factor puede afectar tanto la superficie del producto terminado, así como la resistencia en las líneas que forman las secciones del molde. A velocidades altas de soplado, el aire no logra salir y queda atrapado en forma de burbuja entre la pared del molde y el artículo.

#### **3.4.2 Inyección sopro**

Este proceso es la combinación de las operaciones distintas para lograr altas producciones en envases pequeños. Esta técnica tiene la ventaja de que la operación es en un paso y no produce desechos ni triturados al igual que fabrica botellas con mejor definición y acabado, principalmente del cuello.

##### **3.4.2.1 Equipo**

El equipo consiste en una combinación de inyección y soplado, ofrece mayor producción y ahorro de materia prima al no producir desechos. Es mas complicado y costoso que una máquina de Extrusión-Soplo.

### **3.5 Moldeo por Rotomoldeo**

El proceso de Rotomoldeo consiste en vaciar el material en el molde, luego cerrar el molde e introducir el molde al horno. Esperar cierto tiempo

mientras gira el molde dentro del horno y por último sacar del horno y continuar girando el molde. El tiempo de permanencia en el horno depende del tamaño de la pieza y el espesor de pared.

En este tipo de proceso se debe de utilizar material en polvo, y se recomienda que tenga índices de fluidez que varían de 2.5 a 25 g/10 min.

La transformación por Rotomoldeo es un proceso no continuo y se limita a la fabricación de artículos de tamaño grande, como tinacos y envases.

### **3.6 Moldeo por Compresión**

Esta técnica de transformación consiste en colocar el material a transformar dentro de una de las caras del molde. Las caras del molde deben de estar calientes y sólo una de ellas es movable.

Luego se cierra el molde provocando que por la presión y calor el material tome la forma deseada del molde. Este tipo de moldeo solo se utiliza para transformar el Polietileno de ultra alta masa molecular ya que no puede ser procesado por inyección, extrusión, soplado o termoformado, debido a las grandes cadenas de moléculas que lo forman.

El equipo para la compresión consiste en: prensa hidráulica, moldes y equipo auxiliar.

#### **3.6.1 Prensa hidráulica**

Es una de las piezas más importantes, debe de tener un mínimo de

presión de 70 Kg/cm<sup>2</sup>. En el moldeo de artículos con espesor inferior a 25 centímetros, las placas de la prensa deben tener capacidad de calentamiento y enfriamiento. Normalmente la temperatura de las placas es alrededor de 220 °C.

### **3.6.2 Molde**

Los moldes deben ser diseñados para soportar una presión de operación de 70 Kg/cm<sup>2</sup>, más un factor de seguridad, y deben ser la base para la capacidad de calentamiento y enfriamiento. El molde, para artículos con espesor de pared superior a 25 centímetros, debe tener controles separados sobre la temperatura de la parte superior e inferior.

Esto es necesario para prevenir el enfriamiento prematuro de la periferia, que puede causar formación de un sólido fuera del perfil del material.

### **3.6.3 Equipo auxiliar**

Se pueden emplear opcionalmente un mezclador y cargador neumático. El mezclador sirve para la adición de pigmentos y otros aditivos. Mientras que los cargadores neumáticos sirven para transferir el material de los tambores a los contenedores y luego a los moldes.

Una vez transformado el Polietileno de ultra alta masa molecular, puede ser procesado mediante máquinas que trabajan madera o herramientas para: aserrado, cepillado, fresado, barrenado y torneado.

## **3.7 Termoformado**

Este método de transformación es posterior al de Extrusión y se utiliza para el moldeo de laminas de plástico por la acción del calor y una fuerza de formado, que puede ser por presión o vacío.

El método para el Termoformado consiste en que el plástico en forma de lámina se calienta a una determinada temperatura, después es moldeado con presión o vacío y finalmente enfriado.

### **3.7.1 Calidad de la lamina**

La calidad de una pieza termoformada, no solo depende de los pasos del método de Termoformado, sino también de la calidad de la lamina extruida con la que se hace el formado. Debido a las propiedades que presentan las láminas de Polietileno, este puede ser Termoformado por cualquiera de las técnicas usadas por el Poliestireno o cualquier otro plástico.

La selección de la técnica depende de aspectos tales como: la dimensión de la pieza, el tipo de superficie (texturizado o lisa), espesor de paredes, profundidad del dibujo y otros.

### **3.7.2 Calentamiento**

El Polietileno de alta densidad es un material semicristalino provocando que debido a ello sufra contracciones, haciéndose más notoria con piezas largas, esto se resume en la tabla de la página siguiente.

Se recomienda que el rango de temperaturas para el Termoformado de Polietileno oscile entre 120 y 135 °C.

**Tabla XVII.** Valores típicos de Contracción en Termoformado de Polietileno de alta densidad

<b>Característica</b>	<b>Contracción dm/dt* (%)</b>
<b>PIEZAS GRUESAS</b>	
Medio Peso Molecular Molde Hembra	2.4/2.1
Alto Peso Molecular Molde Hembra	2.7/2.2
Alto Peso Molecular Molde Macho	2.0/1.6
<b>PIEZAS DELGADAS</b>	
Vacío en Molde a 76 °C	3.5/1.5
Presión en molde a 38 °C	2.0/1.4

DM/DT: Datos en la dirección máquina y dirección transversal de la lamina.

### **3.8 Acabado**

El acabado se refiere al proceso final que se da a los artículos fabricados por los diferentes métodos de transformación. Este consiste en la aplicación de tinta, como por ejemplo a las bolsas plásticas de Polietileno de alta densidad. Esto representa un problema ya que el Polietileno es un material apolar, y las tintas no logran anclar sobre el material. Es por ello que se requiere un tratamiento denominado “corona” en el que se oxida la cara de la pieza donde se desea imprimir.

El tratamiento corona consiste en una descarga de alto voltaje que genera una atmósfera de ozono y proporciona al material una energía superficial de 38 dinas/cm, la cual produce porosidad superficial al material y en consecuencia las tintas pueden anclarse.

El acabado es temporal, por lo que se recomienda que después de que se aplica el tratamiento corona, se realice la impresión, ya que de lo contrario, aproximadamente a los tres meses desaparecen los efectos superficiales.

## **4. APLICACIONES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

### **4.1 Clasificación de las aplicaciones del Polietileno de alta densidad**

Las aplicaciones del Polietileno de alta densidad son muy variadas, ya que debido a sus propiedades fisicoquímicas, fácil procesamiento y costo bajo lo hacen el termoplástico más usado en nuestra sociedad.

Las aplicaciones que se le pueden dar van desde materiales de construcción, aislantes eléctricos, empaque, tuberías, botellas, juguetes, cajas, bolsas, tanques para agua, pistas de patinaje, redes para pesca y chalecos antibalas. Esto no es más que una muestra de la versatilidad que posee este plástico.

Resulta evidente que el espectro de aplicaciones es muy amplio, y más aún, si exploramos la posibilidad de modificar el Polietileno de alta densidad como es el caso de la obtención del Polietileno entrecruzado.

Las aplicaciones del Polietileno de alta densidad se pueden clasificar de muchas formas, pero las más importantes son las siguientes:

- Por el método utilizado para la fabricación del producto
- Por el tipo de Polietileno utilizado

En la clasificación del producto por el método utilizado se encuentra la transformación por Extrusión, Inyección, Soplado, Rotomoldeo, Compresión y Termoformado que son los métodos utilizados para la transformación del Polietileno de alta densidad.

El problema en este tipo de clasificación es que se puede dar la posibilidad de que la fabricación de un producto se pueda dar por mas de un proceso de fabricación, incluso por tres métodos, provocando que se complique su clasificación.

La aplicación por el tipo de Polietileno utilizado se puede dividir en 4 tipos que son: Polietileno de alta densidad, Polietileno de alta densidad alta masa molecular, Polietileno de ultra alta masa molecular y Polietileno entrecruzado. Este tipo de clasificación es la más recomendada.

#### **4.2 Aplicaciones del Polietileno de alta densidad**

Las aplicaciones del Polietileno de alta densidad están encaminadas al sector del envase, empaque, industria eléctrica, automotriz y otros.

Estas aplicaciones son consecuencia de sus propiedades ya que es un material de bajo costo, no tóxico (característica muy importante en la industria del envase, empaque y usos domésticos), no conductor y resistente.

### **4.2.1 Envases**

El envase es un recipiente contenedor cuya función principal es proteger el producto y dar soporte para su transporte.

Se utiliza el envase de Polietileno de alta densidad debido a: su ligereza de peso, transparencia, resistencia a la rotura, manejabilidad, seguridad en uso y fundamentalmente en la versatilidad en cuanto a novedades de diseño. En el sector de envase se pueden encontrar botellas, envases y frascos.

Dentro de los productos que se envasan en Polietileno de alta densidad se encuentran principalmente los de consumo diario, tanto productos de limpieza del hogar como alimenticios, así como los de productos industriales.

En los envases destinados para la limpieza se pueden almacenar detergentes, limpiadores, jabones líquidos, shampoo y muchos más, ya que debido a sus propiedades químicas el Polietileno de alta densidad es completamente inerte. Generalmente los tamaños más empleados son de un contenido de 1 y 2 litros; el peso en vacío del envase oscila entre 75 y 160 gr.

En el sector alimenticio se pueden encontrar diferentes tipos, tamaños y estilos de envases, tan variado que sirve para cumplir todas las exigencias del consumidor. En ellos se pueden almacenar productos lácteos en general, agua, aceite y muchos más productos.

Tiene aplicación en muchos sectores industriales, como lo es la farmacéutica y cosmética. En ellos se pueden almacenar adhesivos, combustibles, detergentes químicos, fertilizantes, aceites minerales, vegetales, químicos, pinturas, tintas, productos de aseo, conservas, jabón en polvo,

alcoholes, ceras y muchos más.

Las tapas de los envases de Polietileno de alta densidad también se pueden fabricar de este mismo material, así que existe la misma variedad en cuanto a tapas de envases.

#### **4.2.2 Empaque**

El empaque es un recipiente contenedor o envoltura con características de flexibilidad y facilidad de doblar. Las propiedades fisicoquímicas del Polietileno de alta densidad lo colocan como un material flexible, transparente, resistente y químicamente inerte, provocando que se convierta en una de las mejores alternativas entre los materiales sintéticos utilizados para la fabricación de empaques.

El empaque se utiliza para proteger de contaminación el producto a envolver, así como de exhibición del mismo, ya que posee buenas propiedades ópticas como brillo y transparencia, pero también se puede pigmentar en colores e imprimir de acuerdo a los requerimientos. Las aplicaciones que se encuentran en el sector de empaque son: bolsas, empaques y recubrimientos de otros materiales.

#### **4.2.3 Tipo de empaques de Polietileno de alta densidad**

##### **4.2.3.1 Película plana**

La película plana se obtiene de cortar un tubo a lo largo de sus extremos cuando se extruye. Puede cortarse transversalmente para obtener áreas rectangulares de película o lienzos y también longitudinalmente en anchos variables, obteniendo bobinas de película muy larga.

Las películas se pueden utilizar para formar bolsas o utilizarlas como empaques.

Las películas que se utilizan para formar bolsas directamente en el proceso de empaque de diferentes productos, normalmente son bolsas con tres sellos (boca, fondo y longitudinal), para empaques de polvos, dulces y líquidos. Mientras las que se utilizan para empaques sirven para protección de rayos UV de vegetales en invernaderos, salineras para la obtención de ese mineral, empaque de alimentos, recubrimiento de latas, químicos, ropa, protección ante el polvo, contaminación, humedad y olores.

#### **4.2.3.2 Lámina**

Las laminas de Polietileno de alta densidad sirven para empacar y recubrir otros materiales como papel, cartón, aluminio, embalaje, sobres para correo y cubiertas de libros. Las laminas espumadas sirven para empacar artículos frágiles, aunque se puede utilizar en otros campos.

#### **4.2.3.3 Bolsas**

Existen muchos tipos de bolsas, entre las más utilizadas se encuentran las siguientes:

**Bolsas con sello lateral:** estas son selladas longitudinalmente a los lados con

el fondo sin costura o sello.

**Bolsas con sello de fondo:** son hechas a partir del tubo extruído y sin sellos a los lados, solamente con uno al fondo, el cual es transversal.

**Bolsas con sello de fondo y sello lateral:** las que se fabrican a partir de la película plana y tienen un sello longitudinal y otro transversal.

**Bolsas con fuelles:** los fuelles son dobleces que se hacen en los extremos de la bolsa, pueden estar tanto en el fondo como en los lados.

**Bolsas troqueladas:** del tipo gabacha o "t-shirt", ovalo y perforadas.

**Bolsas con asa:** las que tienen agarradores de plástico soldados en la boca de la bolsa.

**Bolsas con pestañas:** una de las caras de la bolsa es mas larga que la otra, quedando un excedente de película en uno de sus lados, el cual puede usarse para colgar la bolsa en ganchos o simplemente doblarse sobre la otra cara para efectos de cerrar el empaque.

**Bolsas con lip o labio:** son las que tienen un doblez en la boca de la bolsa en uno sus lados, puede ser interior o exterior y se usa comúnmente en empaque de ropa (camisas).

Este tipo de bolsas se utilizan para supermercado, basura, industriales, tejidas, bazar, menaje y cualquier otro tipo de uso, se pueden encontrar en el mercado en diferentes tamaños, colores e impresiones.

#### **4.2.4 Industria eléctrica**

Su principal aplicación en este sector es de aislante de cable, alambre y para conexiones y cuerpos de bobina. En este sector como en otros se recomienda que el Polietileno de alta densidad este acompañado con negro de humo, para proporcionar protección contra los rayos ultravioleta.

Se puede utilizar como aislante de cualquier calibre de cable y longitud, así como para cualquier tamaño de bobina.

#### **4.2.5 Automotriz**

Se utiliza principalmente en contenedores para aceite y gasolina, conexiones, tanques para agua, tubos y mangueras.

#### **4.2.6 Otras aplicaciones**

##### **4.2.6.1 Cajas**

Las cajas de Polietileno de alta densidad que se encuentran en el mercado, sirven para el almacenaje y distribución de un sin fin de productos, como lo son: para botellas, frutas, pescado, cervezas, leche, refrescos y más.

Se pueden encontrar en diferentes colores y tamaños, ya que de acuerdo

a la necesidad del producto así es el tipo de caja a buscar.

#### **4.2.6.2 Aplicaciones diversas**

Se puede utilizar para recubrimiento de sobres para correo, sacos para comestibles, bandejas, botes de basura, cubetas, platos, redes para pesca, regaderas para aceite mineral y agua, tejidos técnicos, artículos de cordelería tapices, cuerdas, cables, tinas de baño para bebé, toda clase de juguetes y otros.

#### **4.3 Aplicaciones del Polietileno de alta densidad alta masa molecular**

La principal aplicación de este tipo de Polietileno es la fabricación de películas, las cuales comprenden todo lo relacionado a empaque (bolsa, lámina y película en general). Estas películas también se pueden fabricar de Polietileno de alta densidad convencional, pero es mucho mejor la utilización de Polietileno de alta densidad alta masa molecular en lugar del convencional, debido a su mayor peso molecular, ya que este tiene mayor empaquetamiento de sus moléculas provocando mayor resistencia química y física y por ello, una mayor resistencia al rasgado; característica muy importante en este sector.

También se utiliza en aplicaciones industriales como tuberías por gravedad y a presión, parches para tubería, en distribución de gas, en servicios domésticos de agua, líneas de alcantarillado y contenedores. Algunas tuberías también se pueden fabricar de Polietileno de alta densidad convencional, pero son menos resistentes y regularmente solo se recomiendan para tuberías por

gravedad.

Actualmente existe una tendencia que es la fabricación de película multicapa por coextrusión, que consiste en la creación de un empaque con tres o más películas, provocando aun más la versatilidad en las aplicaciones de las películas de Polietileno. La aplicación más reciente es como ducto de fibra óptica para las instalaciones telefónicas.

#### **4.3.1 Tubería**

Las tuberías de Polietileno de alta densidad alta masa molecular se encuentran en el mercado tanto lisas como corrugadas. Las corrugaciones son costillas anulares que dan fortaleza a las paredes, reduciendo, al mismo tiempo, el peso de la tubería. El mercado ofrece una completa gama de tuberías y accesorios de Polietileno de alta densidad alta masa molecular.

Las tuberías de Polietileno de alta densidad alta masa molecular poseen excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas que las hacen ideales para el manejo de muchas sustancias; pero las más comunes son: el agua (potable, de riego, o de alcantarillado) y gas natural (redes de distribución). Se recomienda agregar negro de humo a las tuberías de Polietileno de alta densidad alta masa molecular, en especial a las que estarán expuestas a la luz solar. Esta practica prolonga la vida útil de las tuberías hasta aproximadamente 50 años. También se utiliza para protección de cables eléctricos y minería, instalaciones y desechos industriales (liquido y gas), sanitarios, etc.

Existen muchos mercados en los que se pueden utilizar las tuberías de Polietileno de alta densidad alta masa molecular, como lo son: en agricultura, áreas residenciales y recreación. En la tabla de la página siguiente se describen las principales aplicaciones de estas tuberías.

**Tabla XVIII.** Tipos de tubería de Polietileno de alta densidad

Mercados	Uso
Agricultura	Drenaje del terrero Irrigación de sembradíos Aireación de granos Rebalses de laguna Vías de agua Desagües
Recreación	Campos de golf / deportivos Campos de juego / parques Patios de estacionamiento Niveladores de lagunas Drenajes de bordes / Sub drenajes Sumideros Jardines ornamentales
Residencial	Rebalse de lagunas Sumideros / creces de drenajes Drenajes de bordes / sub drenajes Cimientos / maceteros Bajantes de jardines Bajantes / drenajes de techo Jardines ornamentales Manejo de basura

Mercados especiales	Drenaje de rellenos sanitarios Drenaje de minas Drenaje sobre la superficie Aplicaciones al vacío Desvíos temporales Rejas de seguridad Aplicaciones marinas Canchas de lixiviación Tuberías de contención Conducción de aire Emisarios submarinos Conducción de fluidos a presión y sólidos
---------------------	---

### 4.3.2 Tanques

Se fabrican tanques industriales de Polietileno de alta densidad alta masa molecular con capacidades desde 200 litros en adelante para el almacenaje de productos varios, como lo pueden ser: agua, materiales sólidos, ácidos, aceites y otros.

### 4.4 Aplicación del Polietileno de ultra alta masa molecular

Debido a sus propiedades mecánicas de resistencia al impacto, a la abrasión y autolubricación su principal aplicación se encuentra en partes y refacciones de maquinaria, como lo es en engranes que pueden sustituir a los de metal, debido a una mejor disipación de calor. Se puede utilizar también para la fabricación de chalecos antibalas, fibras y fabricación de grandes laminas en reemplazo de hielo para pistas de patinaje.

También se utiliza en refacciones de maquinaria de la industria del embotellado, en fundiciones, en aserraderos, en la industria eléctrica, para manejo de productos químicos, minería y manejo de materiales en general. En

la industria del embotellado sirve como estrellas, tornillo sin fin, espaciadores, placas de desgaste, bujes, levas, guías y otros. Para fundiciones se utiliza para manejar arena húmeda en sus tolvas y silos, y en los pernos para la transmisión de la potencia de los motores.

En aserraderos se utiliza para fabricar planchas de deslizamiento, canales y soleras de desgaste para cadenas. En la industria eléctrica se utiliza para partes de motores eléctricos, interruptores y acopladores.

En el manejo de productos químicos sirve para bombas, filtros, partes de válvulas, juntas y empaques. En minería se utiliza en rodillos o camisas de desgaste, recubrimientos para bandas transportadoras, ruedas y bujes. En el manejo de materiales en general se puede utilizar en soleras de fricción, cintas guías, canales, cintas de desgaste, placas deslizantes, tolvas y rodamientos.

#### **4.5 Aplicación del Polietileno entrecruzado**

Las aplicaciones de este tipo de Polietileno se encuentran en los mercados del envase - embalaje, eléctrico - electrónico, automotriz y otros. Dentro de estos propios mercados sus aplicaciones son específicas y selectas constituyendo un mayor costo.

En el mercado de envase - embalaje predominan la fabricación de películas entrecruzadas para tratar productos Boil in bag (para hervir dentro del envase). En el mercado eléctrico - electrónico el Polietileno entrecruzado se utiliza para aislamiento de cable de media y alta tensión, ya que resiste temperatura de conducción alta. En la construcción se utiliza para tuberías que conducen fluidos calientes y gases, ya que resiste altas temperaturas y

presiones de operación.

#### **4.6 Aplicaciones de los plásticos reciclados**

Los artículos que se realizan a partir de resina reciclada de Polietileno de alta densidad son los siguientes: Bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura, envases para productos de limpieza, recipientes para basura, cajas, tarimas, contenedores industriales, tuberías y otros.

### **5. RECICLAJE DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

#### **5.1 Generalidades**

El Polietileno de alta densidad es el plástico de mayor uso en el mundo, debido a sus excelentes propiedades. Es ligero, resistente tanto mecánicamente como químicamente, no se corroe, tiene bajo costo y sobre todo presenta la versatilidad de ser fabricado a medida de las necesidades del consumidor. Todas estas características hacen que el Polietileno de alta densidad posea una larga vida, cualidad útil, cuando se usa, pero un problema cuando se quiera desechar. Es por ello que se deben de tener técnicas de tratamiento para este plástico. La más recomendada es la de las 3R; Reducir, Reutilizar y Reciclar.

El problema radica en crear conciencia ecológica del impacto ambiental del uso descontrolado e irresponsable del Polietileno de alta densidad por parte del consumidor. Mientras que para la industria constituye un reto, para hacer

más eficiente su proceso y no generar desperdicios innecesarios.

## **5.2 Identificación del Polietileno de alta densidad**

### **5.2.1 Codificación**

El sistema de clasificación fue desarrollado por: The Society of the Plastics Industry (SPI) y ha sido adoptada por todo el mundo.

Se basa en una simbología simple que permite en el proceso de recolección y reciclamiento, identificar y separar los diferentes productos.

Está compuesto por tres flechas que forman un triángulo con un número en el centro y letras en la base. El símbolo es moldeado mediante un inserto o grabado, ya sea en el fondo del recipiente, o cerca de este, según permita la geometría del artículo.

**Figura 1.** Identificación del Polietileno de alta densidad



El tamaño mínimo recomendado es de 2.5 cm. Para lograr su rápido reconocimiento. Envases de bases pequeñas, pueden llevar el símbolo en un tamaño proporcional; sin embargo, otras dimensiones reglamentadas son 1.2 cm y 1.6 cm.

Si un envase es fabricado en un nuevo modelo y con resinas diferentes a las tradicionalmente empleadas, es responsabilidad del transformador o fabricante de los moldes, cambiar el código mediante un inserto, para identificar la materia prima utilizada.

### **5.3 Soluciones para minimizar los residuos plásticos**

Existe un sistema que indica la forma de tratar los desechos, en ella se muestran las actividades a seguir tomando en cuenta que no se debe de considerar una sin antes haber agotado la anterior. Los pasos son los siguientes:

- Reducir
- Reutilizar
- Reciclar
- Recuperar
- Basura

La reducción se inicia desde el origen. Consiste en utilizar la menor cantidad posible de materiales que se vayan a desechar. Es por ello que se han desarrollado plásticos más resistentes, aditivos y procesos que permiten fabricar productos más livianos y de menor espesor. En este punto tienen mayor incidencia en la generación de desechos las fabricas que se dedican a la

transformación de plástico y en menor grado el consumidor.

La reutilización de los plásticos consiste en aprovechar al máximo la vida útil de los productos a través de un sistema de retornabilidad, sin la necesidad de destruirlos o reciclarlos.

Como ejemplo se pueden citar las bolsas plásticas, que se pueden utilizar más de una vez para actividades diversas, dando de esta manera una mayor vida útil al producto.

La mayor cantidad de desperdicios se generan en el hogar (60% aprox.), es por ello que se debe de crear conciencia ecológica dentro de todos los hogares para disminuir los desechos plásticos.

Reciclar debe ser la tercera opción y se realiza una vez que los productos ya no puedan ser utilizados para su objetivo original. Consiste en recolectar y separar el plástico del resto de los residuos sólidos, para luego ser procesado y transformado en un nuevo producto.

Los plásticos reciclados se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones no alimentarias, debido a requisitos sanitarios de garantizar que ningún contaminante pueda migrar a la superficie del producto.

El concepto de Recuperar es la utilización de métodos químicos para obtener materias primas o energía a partir de desechos plásticos.

La última etapa en el tratamiento de residuos es la basura, que se define como cualquier objeto que ya no tiene uso o valor, y solo debe ser considerada cuando los productos hayan alcanzado su máximo uso y no se justifique su

reciclamiento.

#### **5.4 Métodos utilizados para la separación de plásticos**

En la actualidad se han desarrollado muchos métodos destinados a la separación de los diferentes plásticos que existen. Estos se basan en ciertas características que poseen, como lo puede ser comportamiento ante rayos X, espectroscopia infrarroja, diferencias de color, técnicas físicas, disolventes y marcadores químicos.

El primer paso que se realiza es la separación manual de residuos en las plantas de trillaje. En estas, los operarios gracias a su experiencia son capaces de separar los materiales simplemente observándolos.

Pero este método de diferenciación no es suficiente para hacer una buena separación de los plásticos por componentes. Una mala separación de los plásticos puede tener consecuencias graves. Es por ello que se deben de utilizar otros métodos para la separación de plásticos.

El método de fluorescencia de rayos X se utiliza por ejemplo para separar PVC de PET y consiste en irradiar el plástico con dichos rayos para detectar la radiación secundaria emitida por los átomos de cloro del PVC.

La espectroscopia infrarroja permite identificar los diferentes plásticos analizando la luz reflejada por la superficie del material cuando es sometido a la radiación infrarroja. Cada material emite una serie de radiaciones características en función de su propia estructura molecular.

Las cámaras detectoras de color y opacidad de los plásticos se utilizan

conjuntamente con las de infrarrojos para separar en proceso continuo.

Las 3 técnicas anteriores se pueden utilizar para separar PET, PVC, PEAD, PEBD y PP, pero tienen el inconveniente de que el equipo tiene un costo muy elevado.

Dentro de las técnicas físicas se encuentra el Hidrociclón, separación triboeléctrica y diferencia de densidades.

En el Hidrociclón un flujo de agua y de partículas plásticas es lanzado de forma tangencial hacia la parte superior del cono. La fuerza centrífuga concentra a las partículas más pesadas hacia el exterior, cayendo a la parte inferior por donde son recogidas mientras que las partículas más ligeras se desplazan hacia la parte superior. Este método de separación no da muy buenos resultados, siendo necesario practicar posteriormente otro tipo de operación.

La separación triboeléctrica está basada en la diferente carga electrostática de pequeñas partículas de los polímeros, provocada por la fricción en la pared de un remolino de aire y donde se proyectan a un campo electrostático generado entre dos placas, a las que se aplica un potencial eléctrico.

El método de diferencia de densidades que tienen los polímeros se conoce con el nombre de hundimiento / flotación, el cual es un sistema que consigue separar una mezcla de HDPE, LDPE, PP, PS Y PVC. La pequeña diferencia en el valor de la densidad de estos compuestos es suficiente para conseguir buenos resultados con este sistema.

El procedimiento consiste en introducir la mezcla de plásticos (troceados) en agua, la cual tiene una pequeña cantidad de surfactante, con el objeto que el agua moje al plástico. Las poliolefinas quedan flotando en la superficie mientras que el PS y PVC se hunden en el fondo.

La fracción sobrenadante se introduce en una mezcla de menor densidad que el agua, agua-alcohol. De esta manera el HDPE se hunde y queda flotando el PP y el LDPE.

Un tratamiento similar se hace con la mezcla PS, PVC que se separa mediante una solución de agua salina.

Con este método se obtienen las poliolefinas y el poliestireno en fracciones relativamente limpias del 97 y 95% respectivamente, no siendo así para el PVC que se recoge contaminado por otros materiales.

El procedimiento basado en la solubilidad de los plásticos en distintos disolventes, consiste en la utilización de un disolvente, para separar una mezcla de PEAD, PEBD, PP, PS Y PVC. Como disolvente se puede utilizar por ejemplo una mezcla de ciclohexanoxileno, provocando la separación de tres fases distintas; una de PS, otro de PVC y una tercera de poliolefinas con purezas por fase que oscilan entre el 96 y 99%. En todos los casos la recuperación del polímero se hace por precipitación mediante un agente precipitante.

El método de marcador químico consiste en la incorporación específica de un determinado marcador para cada polímero, pero debido a que la aplicación principal que se le da al plástico es en la industria del Envase-Empaque, los aditivos a incorporar deben ser completamente inocuos.

También se ha propuesto la utilización de código de barras específico para cada polímero, pero debido a la diversidad de tamaños y geometrías es difícil poder llegar a poner en práctica este método. Lo que sí esta en práctica, y se muestra en la tabla de la página siguiente es la identificación de los 7 plásticos más utilizados, con sus respectivos símbolos, que una vez impresos en cada artículo, permite su separación de forma rápida y segura; este método ya fue descrito anteriormente.

**Tabla XIX.** Identificación de plásticos reciclables

<b>Número</b>	<b>Abreviatura</b>	<b>Nombre completo</b>
1	PET, PETE	Polietilén tereftalato
2	HDPE	Polietileno de alta densidad
3	V, PVC	Cloruro de polivinilo
4	LDPE	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	Otro	

## 5.5 Tipos de reciclaje

Debido a la necesidad de encontrar soluciones para manejar los desechos plásticos, se han desarrollado diversas técnicas de reciclaje, ya que como hay diferentes tipos de plásticos, la separación y reciclaje es distinta.

El reciclaje de plásticos puede ser Físico, Químico, Térmico y en último caso disposición final en un Relleno sanitario. La práctica de cualquier tipo de

estos depende del resultado de un estudio de Ecobalance ( Análisis del Ciclo de Vida de un Producto), que permita determinar que tipo de reciclaje es el más adecuado medioambiental.

Para el Polietileno de alta densidad el único que no se recomienda es el Reciclaje Químico, ya que económicamente y medioambientalmente no es factible. Es mucho mejor el Reciclaje Mecánico y Térmico.

### **5.5.1 Reciclaje mecánico**

El reciclaje mecánico del Polietileno de alta densidad consiste en la recepción y almacenaje de los materiales, selección del plástico o identificación, triturado del mismo a modo que el producto quede en forma de granza, para poder incorporarlo de nuevo a la cadena productiva, cerrando el círculo de producción limpia. Se recomienda un lavado del material previo a la selección del plástico con el objeto de eliminar impurezas que puedan afectar de sobremanera las propiedades del Polietileno de alta densidad reciclado.

La etapa más importante es la selección del Polietileno de alta densidad, que puede realizarse en el sitio del reciclaje denominado "recolección selectiva" o en lugares construidos con esa finalidad. Los diferentes métodos utilizados para la selección e identificación del Polietileno de alta densidad ya han sido descritos anteriormente.

Este tipo de reciclaje no es destructivo como el reciclaje térmico y se recomienda cuando el Polietileno de alta densidad se encuentra relativamente libre de contaminantes.

### 5.5.2 Reciclaje térmico

Es un método destructivo que consiste en la combustión del plástico, transformando los desechos en gases, cenizas y escorias. Esto con el objeto de obtener energía, ya que los plásticos son compuestos con un alto poder calorífico. Para realizar esta técnica, es preciso antes realizar estudios de ecobalance, para determinar si este tipo de reciclaje es favorable.

Para realizar esta técnica de recuperación de energía, es necesario tener un estricto control de la emisión de gases contaminantes, porque aun teniendo un control cuidadoso, se emiten productos gaseosos perjudiciales a la atmósfera. Las principales ventajas y desventajas del tratamiento térmico del Polietileno de alta densidad se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA XX.** Ventajas y desventajas del reciclaje térmico del Polietileno alta densidad

<b>Tratamiento Térmico</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Polietileno de alta densidad	Favorece el control sanitario Elimina infecciones Reducción de volumen Recuperación de energía Recuperación de metales	Emisión de gases a la atmósfera Áreas próximas al centro de incineración Tecnología sofisticada Costo elevado Pérdida de productos útiles

Como se puede observar en la tabla de la página siguiente, el Polietileno contiene energía comparable con la de los combustibles fósiles, es por ello que

constituyen una excelente alternativa para ser usados como combustibles para producir energía eléctrica y calor.

El reciclaje térmico esta especialmente indicado para aquellos residuos que presentan deterioro o suciedad, como es el caso de una parte de los plásticos que proceden de la agricultura o en determinados casos de residuos sólidos urbanos.

**TABLA XXI.** Contenido energético de diferentes plásticos

<b>Producto</b>	<b>Energía Kj/Kg</b>
Poliestireno	48
Polietileno	46
Polipropileno	40
Policloruro de Vinilo	18.90
Gas natural	48
Fueloil	44
Hulla	29
Lignito	20
Cuero	18.90
Papel	16.80
Madera	16
Grasas	7.80
Conjunto de RSU	8

### 5.5.3 Relleno sanitario

Es el último paso que se debe considerar, y solo debe ser justificable cuando los anteriores hayan sido agotados. El relleno sanitario se define como un lugar legalmente autorizado donde la basura municipal se deposita y clasifica para su posterior entierro.

El terreno de un relleno sanitario tiene que ser grande y se debe preparar antes de su utilización con el objeto de evitar filtraciones de contaminantes en la tierra.

Los pasos generales a seguir son los siguientes: Compactación del terreno, Colocación de liner de Polietileno de alta densidad; filtros de grava y capas de tierra. Cuando la vida de un relleno sanitario ha terminado, se rellena con filtro de grava, geotextil, liner de Polietileno de alta densidad, geotextil, filtro de grava, geotextil y por último, una capa de tierra.

## **5.6 Propiedades del Polietileno de alta densidad reciclado**

Las resinas recicladas de Polietileno de alta densidad pierden aproximadamente el 20% de sus propiedades con respecto a las resinas vírgenes, aunque esto se trate de evitar incorporando a la resina aditivos.

Las propiedades que más se modifican son la densidad, resistencia a la tensión y elongación, relacionadas con el contenido de humedad y tipo de contaminante que presenten, esto se puede observar en la tabla de la siguiente página.

El material procesado en condiciones óptimas, puede utilizar 25% de regranulado combinado con material virgen sin exponer la funcionalidad y calidad del producto. Los contaminantes que afectan el reciclado del Polietileno

de alta densidad son los siguientes:

- Residuos de comida y polvo
- Tintas y etiquetas
- Elastómeros
- Cobre

**TABLA XXII.** Comparación de las propiedades del Polietileno de alta densidad Virgen Vrs. Reciclado

<b>Propiedad</b>	<b>PEAD Virgen</b>	<b>PEAD Reprocesado Una Vez</b>
Índice de Fluidez g/10 min.	0.77	0.79
Densidad g/cm <sup>3</sup>	0.963	0.961
Módulo de Flexión Kg/cm <sup>2</sup>	15,396	15,396
Resistencia al Impacto Izod Kg. cm/cm	13	9
Resistencia a la Tensión a la Ruptura Kg/cm <sup>2</sup>	155	175
Elongación %	555	613

Con el objeto de que la resina reciclada conserve sus propiedades, se mezcla con aditivos especiales, ya que de lo contrario se crearían problemas en su transformación, tal es el caso que la reducción del índice de fluidez origina que se presente ineficiencia en producción y mala calidad del producto.

Se han desarrollado estabilizadores para el Polietileno de alta densidad

recuperado, para mantener el índice de fluidez constante durante las primeras cinco historias térmicas.

## RESULTADOS

Las aplicaciones de los diferentes tipos de Polietileno de alta densidad que se encuentran en el mercado se pueden resumir en la siguiente tabla:

**TABLA XXIII.** Resumen de las aplicaciones del Polietileno de alta densidad

SECTOR DE APLICACIÓN	TIPO DE POLIETILENO	USO MAS COMÚN
Envase – Empaque	HDPE, HMW-HDPE, Polietileno entrecruzado	Botella, envase, frasco, bolsa, empaque, lámina, película de recubrimiento en general de materiales, películas para productos Boil in bag
Industria eléctrica	HDPE, Polietileno entrecruzado, UHMWPE	Aislantes de cables en general; media y alta tensión, alambre, conexiones, cuerpos de bobina, partes de motores eléctricos, interruptores y acopladores.

Automotriz	HDPE	Contenedores para aceite y gasolina, conexiones, tanques para agua, tubos, mangueras
Construcción	HDPE, HMW-HDPE, Polietileno entrecruzado	Tuberías para conducción de agua, fluidos caliente y gases; tubos, accesorios, ducto para fibra óptica, protección de cables eléctricos, minería, instalaciones y desechos industriales
Tanques	HMW-HDPE	Tanques industriales para almacenar agua, materiales sólidos, ácidos, aceites y otros
Refacciones de maquinaria	UHMWPE	Engranajes, estrellas, tornillos sin fin, espaciadores, placas de desgaste, bujes, levas y guías
Aplicaciones diversas	HDPE	Recubrimiento de sobres para correo, sacos para comestibles, bandejas, botes de basura, platos, redes, regaderas, tejidos técnicos, artículos de cordelería, tapices, cuerdas, cables, tinas de baño para bebé, cajas, juguetes
Aplicaciones especiales	UHMWPE	En fundiciones, en aserraderos, minería, Manejo de materiales en general como químicos, fibras, chalecos antibalas, pistas de patinaje

Polietileno Reciclado	Reciclado	Bolsas de residuos, caños, madera plástica, para postes, marcos, film para agricultura, envases para productos de limpieza, recipientes para basura, cajas, tarimas, contenedores industriales, tuberías
--------------------------	-----------	--

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El Polietileno de alta densidad es el polímero sintético más utilizado en el mundo, debido a muchas características que tiene que algunos plásticos no poseen buenas propiedades fisicoquímicas, métodos de transformación sencillos, no tóxico, reciclable y, a la vez, un polímero de bajo costo.

La diversidad de aplicaciones del Polietileno de alta densidad como lo es en el sector de Envase-Empaque, Industria Eléctrica, Automotriz, Construcción y otros, son el resultado de las excelentes propiedades fisicoquímicas que posee, las cuales, a su vez, dependen de la estructura química del polímero.

El Polietileno de alta densidad es un polímero de alto peso molecular y

cristalino por lo que sus largas cadenas de moléculas están, lo suficientemente, juntas y ordenadas para resistir golpes, deformaciones, ataques químicos y filtración de sustancias, lo que provoca que sea un polímero con buenas propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas. También, es una macromolécula apolar, lo que significa que no es conductor de la electricidad.

Especialmente, debido a lo anterior y que no es tóxico es que el Polietileno de alta densidad es el plástico más utilizado en nuestra sociedad.

Además, contribuye, el hecho de que los métodos de transformación del Polietileno de alta densidad que se utilizan son económicos, eficientes, sencillos y versátiles como lo son principalmente: el de Extrusión e Inyección, provocando la fabricación de productos acordes a las necesidades del consumidor.

Otro factor muy importante es que el Polietileno de alta densidad es reciclable, ya sea por medio del proceso de reciclaje Mecánico o Térmico. Con el primero se puede obtener materia prima para la fabricación de nuevos productos para aplicaciones no alimentarias y con el segundo se puede obtener energía.

De esta manera, constituye un material que se puede reutilizar constituyendo un ahorro económico para la industria o aprovechar su energía para diferentes usos, básicamente industriales.

## CONCLUSIONES

1. Las propiedades físico – químicas del Polietileno de alta densidad son de las mejores entre los plásticos debido a su estructura molecular ya que es una molécula apolar, lineal, químicamente estable y relativamente cristalino.
2. Los procesos mas utilizados para la transformación del Polietileno de alta densidad son la Extrusión e Inyección; seguidos del Soplado, Rotomoldeo, Termoformado y Compresión, que se utilizan para fines más específicos.
3. Las aplicaciones del Polietileno de alta densidad son muchas y variadas debido a que es un polímero fácil de obtener, barato, inocuo y con

propiedades físico – químicas inigualable entre los plásticos.

4. Las mejores técnicas de reciclaje del Polietileno de alta densidad de acuerdo con estudios de Eco-balance son el reciclaje mecánico y térmico.

## **RECOMENDACIONES**

1. Utilizar aditivos como colorantes, agentes antiestáticos, estabilizantes, lubricantes, rellenos, plastificantes, retardadores de llama y antioxidantes en el proceso de fabricación de artículos hechos de Polietileno de alta densidad con el objeto de mejorar las propiedades físico-químicas y visuales del producto terminado.
2. Realizar un enfriamiento lento en el proceso final de transformación de los productos hechos de Polietileno de alta densidad para obtener productos con mejores propiedades ópticas y más cristalinos.
3. Evitar la utilización de Polietileno de alta densidad como materia prima en la fabricación de artículos y/o productos que puedan estar en contacto

con ácidos concentrados, aceites, grasas, ceras y, en general, disolventes orgánicos; sobre todo, si tienen similitud química con el Polietileno de alta densidad, ya que lo degradan.

4. Crear conciencia ecológica a todos los niveles sociales y, especialmente, en el hogar, el Polietileno de alta densidad es reciclable y, en general, todos los plásticos termoplásticos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Enciclopedia del Plástico**, Capítulos 3,4 y 29, Tomo 1 y 3
2. Gómez, Ma. Rosa / Gil, José. Educación Medio Ambiental: **Los plásticos y su Reciclado**, Madrid: UNED.
3. Gómez, Ma. Rosa / Gil, José. **Hablemos de Plásticos**, Parte I, Madrid: UNED, 1995.
4. Horta, A. / Fernández, I. / Pérez, A. / Sánchez, C. **Los Plásticos más usados**, Madrid: UNED, 1996.
5. Sapón, M. **Diseño de un Sistema de Control de Calidad en la**

**Industria del Empaque Flexible de Polietileno.** Guatemala. Tesis  
USAC. 1999

## **BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA**

1. Recicladores y Suministradores  
<http://www.plasticsplasticos.com/camericaes.htm>.  
Consultada 18-12-03.
2. Grupo de Polímeros. <http://www.publinet.com.co/2/paolaamar/polim.html>.  
Consultada 18/12/03
3. El Plástico Flexible. [http://canales.laverdad.es/cienciaysalud/7\\_2\\_11.htm](http://canales.laverdad.es/cienciaysalud/7_2_11.htm).  
Consultada 27/04/04
4. Polietileno. <http://www.psrc.usm.edu/spanish/pe.htm>.  
Consultada 26/05/04

5. Polímeros Hidrocarburos Tacticidad Isómeros.  
<http://members.tripod.com/fotografia/textos/polimeros1.htm>.  
Consultada 18/12/03
  
6. Propiedades Mecánicas de los Polímeros.  
<http://www.psrc.usm.edu/spanish/mech.htm>.  
Consultada 26/05/04
  
7. Plásticos / PE. <http://www.plastics-plasticos.com/pe.htm>.  
Consultada 18/12/03
  
8. Museo del Plástico Sandretto.  
<http://www.sandretto.it/museo/SPAGNOLO/default.htm>.  
Consultada 27/05/04
  
9. Museo de Plástico.  
<http://www.sandretto.it/museo/SPAGNOLO/splasti.htm>.  
Consultada 27/05/04
  
10. Transformación de Resinas. <http://www.indesca.com/boletin.htm>.  
Consultada 27/05/04
  
11. Catálisis. <http://www.catalisisfrc.utn.edu.ar/resumenes%20posters.htm>.  
Consultada 27/05/04
  
12. Ingeniería en Procesos Industriales.  
[http://www.procesosvirtuales.com/Gratis/DB\\_Poletileno.asp](http://www.procesosvirtuales.com/Gratis/DB_Poletileno.asp).

Consultada 27/05/04

13. Acuerdo entre Nova Chemicals y BP Petrochemicals – Noticias.

<http://www.quimicauniversal.com/Noticias/Noticia.asp?ID=7353>.

Consultada 27/04/05

14. Catalizadores en la Industria. <http://html.rincondelvago.com/catalizadores-en-la-industria.html>. Consultada 27/04/04

15. Curso Básico Intensivo de Plásticos.

<http://www.jorplast.com.br/cbipep/cbip4ep.html>.

Consultada 27/04/04

16. Proceso de Elaboración de Polipropileno.

<http://www.procesosvirtuales.com/descripcion.asp?id=65>.

Consultada 27/04/04

17. Polimerización en Emulsión.

<http://www.psrc.usm.edu/spanish/emulsion.htm>.

Consultada 26/05/04

18. Termoplásticos. <http://www.psrc.usm.edu/spanish/plastic.htm>. Consultada 26/05/04

19. Polímero. <http://www.quajara.com/wiki/es/wikipedia/p/po/polimero.html>.

Consultada 26/05/04

