

**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Evaluación de las Propiedades de Compuestos de  
Polietileno y Carbonato de Calcio”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**Byron Alfonso Zambrano Román**

GUAYAQUIL-ECUADOR

2007

## AGRADECIMIENTO

Al Ing. Andrés Rigail, director de tesis,  
por todo el apoyo brindado.

Al Sr. Carlos Correa, su ayuda  
desinteresada en el desarrollo de esta  
tesis

A instituciones como Amanco-  
Plastigama, Aseplas, Polimalla, Nutec,  
Plastigómez quienes dieron las  
facilidades necesarias ya sea con  
equipos o información.

## DEDICATORIA

A mis Padres, a mis  
Hermanas, a todas  
las personas que  
ayudaron directa o  
indirectamente a la  
obtención de este  
título

---

Ing. Duque Rivera Jorge  
PRESIDENTE

---

Ing. Andrés Rigail C.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Dra. Cecilia Paredes V.  
VOCAL

---

Ing. Bolívar Alban T.  
VOCAL

## **DECLARACION EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Byron Alfonso Zambrano Román

## RESUMEN

El presente trabajo analiza los efectos del carbonato de calcio como agente reforzante sobre las propiedades mecánicas del polietileno.

En los últimos 20 años, el uso de rellenos en la industria del plástico se ha hecho más frecuente ya que al ser mezclado con las resinas poliméricas, reduce los costos de los productos y adicionalmente mejora sus propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y al impacto.

En esta tesis se analizará el efecto de un masterbatch de carbonato de calcio y LLDPE sobre las propiedades del polietileno de alta densidad procesado en una extrusora de producción industrial. Nuestro objetivo principal es encontrar una relación óptima percentil del compuesto plástico que obtenga cuantitativamente el mejor desempeño en propiedades mecánicas. Con la obtención de porcentajes óptimos se podría desarrollar innovadores productos con potenciales aplicaciones en fundas y empaques en los que se requiere poca o nula elongación y alta resistencia a la tracción, pero particularmente en películas de alta respirabilidad para pañales, batas quirúrgicas, entre otros.

En el desarrollo de esta tesis, se detallará los materiales y procedimientos utilizados para la preparación de las probetas y la metodología a usarse en este análisis; se revisará los fundamentos teóricos de los materiales termoplásticos utilizados en la industria explicando con mayor énfasis en los polietilenos y sus familias; adicionalmente, se explicará acerca de los rellenos más usados en la industria y sus principales propiedades y aplicaciones.

Después de dar todos los fundamentos teóricos se realizarán los ensayos de tensión mecánica, impacto, temperatura de ablandamiento (VICAT), absorción de agua, índice de fluidez (MFI) y determinación de la densidad siguiendo normas ASTM. Luego se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos mencionados anteriormente presentando una interpretación de estos resultados obtenidos y las respectivas conclusiones de ésta investigación.

De esta investigación se espera obtener una comparación de las propiedades mecánicas de las mezclas con diferentes porcentajes de masterbatch que servirá para determinar el porcentaje óptimo para las diversas aplicaciones industriales y el ahorro de resina con el uso de estos rellenos.

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
ABREVIATURAS.....	XI
SIMBOLOGIA.....	XII
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS.....	XVI
TERMINOS Y DEFINICIONES.....	XVII
INTRODUCCION.....	XVIII

## CAPÍTULO 1

<b>1. INFORMACION GENERAL.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes y Justificación.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Metodología utilizada.....	7
1.3.1 Preparación de las Probetas.....	7
1.3.2 Equipos y materiales.....	8
1.3.3 Metodología de Análisis.....	11

## **CAPITULO 2**

<b>2. MATERIALES TERMOPLÁSTICOS Y SUS REFUERZOS.....</b>	<b>12</b>
2.1 Materiales termoplásticos.....	13
2.2 Rellenos.....	45
2.2.1 Mica.....	53
2.2.2 Carbonatos de calcio.....	54
2.2.3 Talcos.....	57
2.2.4 Arcillas.....	58
2.3 Masterbach de termoplásticos.....	59
2.4 Compuestos de polietileno.....	60
2.5 Aplicaciones.....	61

## **CAPITULO 3**

### **3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS**

<b>PE- <math>\text{CaCO}_3</math> .....</b>	<b>63</b>
3.1 Preparación de las probetas.....	63
3.2 Ensayo de tensión mecánica.....	72
3.3 Ensayo de Impacto.....	74
3.4 Ensayo temperatura de ablandamiento (VICAT).....	77
3.5 Ensayo de absorción de agua.....	79
3.6 Ensayo de índice de fluidez (MFI).....	81
3.7 Ensayo de determinación de densidad.....	83

## **CAPITULO 4**

### **4.DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....86**

#### **4.1 Análisis comparativo del costo del material.....101**

## **CAPITULO 5**

### **5.CONLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 106**

## **APENDICES**

## **BIBLIOGRAFIA**

## ABREVIATURAS

Kg	Kilogramo
mm	milímetros
lb/pulg <sup>2</sup>	Libras sobre pulgadas cuadradas
$\mu m$	micras
lb/pie <sup>2</sup>	Libras por pies cuadrados
g/cm <sup>2</sup>	Gramos por centímetro cuadrado
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
Mpa	Mega pascales
J/m	Joule por metros
Kv/mm	Kilovatio por milímetro
g/10 min	gramos por diez minutos
mm <sup>2</sup>	milímetros cuadrados
g	gramos
°C/h	grados centígrados por hora
min	minutos
J	Joule
kJ/m <sup>2</sup>	Kilojoule por metro cuadrado
W/m K	vatios por metro y por grados kelvin
pas	pascales
pas.seg	pascales por segundo
seg	segundos
cc/10 min	centímetros cúbicos por diez minutos

## SIMBOLOGIA

CaCo <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
PE	Polietileno
HDPE	Polietileno de alta densidad
LLDPE	Polietileno linear de baja densidad
ASTM	Sociedad americana de pruebas de materiales ( american society of testing materials)
L/D	Longitud del tornillo por el diámetro del mismo
VICAT	Temperatura de ablandamiento
H	Hidrogeno
C	Carbono
n	números de monómeros
LDPE	Polietileno de baja densidad
Tg	Temperatura de Transicion Vitrea
UV	Ultravioletas
RRI	resistencia al resquebrajamiento por intemperizacion
Na	Sodio
Ca	Calcio
K	Potacio
MFI	Indice de fluidez

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Formación de un Polímero.....	12
Figura 2.2	Clasificación General de los Polímeros.....	13
Figura 2.3	Formación de un Polietileno.....	14
Figura 2.4	Formación de un Polietileno de Alta Densidad.....	16
Figura 2.5	Diferencias entre Moléculas.....	17
Figura 2.6	Estructura del LLPDE.....	24
Figura 2.7	Efectos de la Densidad del Polímero sobre artículos hechos de LLDPE.....	25
Figura 2.8	Curvas características rapidez de corte vs viscosidad .....	29
Figura 2.9	Microestructura de la Mica.....	51
Figura 2.10	Microestructura del Carbonato de Calcio.....	52
Figura 2.11	Microestructura de los Talcos.....	54
Figura 3.1	Extrusora de Tornillo Simple.....	62
Figura 3.2	Mezcladores Dispersivos.....	63
Figura 3.3	Mezclador Distributivo Tipo Romboide.....	64
Figura 3.4	Tornillo Extrusor.....	65
Figura 3.5	Troquel Marca Ray-Ran.....	68
Figura 3.6	Distribución de Probetas en Placas.....	69
Figura 3.7	Medidas de Probetas de Tensión.....	70
Figura 3.8	Distancia L de la Probeta de Tensión.....	71
Figura 3.9	Medidas de Probeta de Impacto.....	73
Figura 3.10	Equipo Izod y ubicación de Probeta de Impacto .....	74
Figura 3.11	Equipo para Ensayo de Temperatura VICAT.....	75
Figura 3.12	Ubicación de la Probeta VICAT en Equipo.....	76
Figura 3.13	Equipo para Ensayo de Índice de Fluidez.....	80
Figura 4.1	Evolución del Modulo.....	87
Figura 4.2	Esfuerzos de Rotura Vs Porcentaje Caco <sub>3</sub> .....	89
Figura 4.3	Resistencia al Impacto Vs Proporción Caco <sub>3</sub> .....	91
Figura 4.4	Temperatura VICAT Vs Proporción Caco <sub>3</sub> .....	93
Figura 4.5	Absorción de Agua Vs Caco <sub>3</sub> .....	95
Figura 4.6	Índice De Fluidez Vs Proporción de Caco <sub>3</sub> .....	96
Figura 4.7	Densidad Vs Porcentaje de Caco <sub>3</sub> .....	98
Figura 4.8	Modulo Elástico Vs Costo de Compuesto.....	102
Figura 4.9	Esfuerzo de Rotura Vs Costo de Material.....	102
Figura 4.10	Energía de Impacto Vs Costo de Material.....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Efectos la Densidad, Índice de Fusión Y Distribución de Pesos Moleculares sobre propiedades en Estado sólido del LDPE.....	19
Tabla 2	Técnicas de Procesamiento.....	21
Tabla 3	Especificaciones de Propiedades.....	22
Tabla 4	Principales Aplicaciones de las Películas de LLDPE.....	27
Tabla 5	Procesabilidad del LLDPE.....	32
Tabla 6	Propiedades del LLDPE.....	33
Tabla 7	Propiedades del LLDPE.....	34
Tabla 8	Técnicas de Procesamiento.....	40
Tabla 9	Especificación de las Propiedades de el HDPE.....	41
Tabla 10	Propiedades del Polietileno de Alta Densidad Lg.....	66
Tabla 11	Porcentaje de Mezclas de HDPE con Caco3.....	67
Tabla 12	Módulos Elásticos Obtenidos.....	87
Tabla 13	Esfuerzos de Rotura Obtenidos.....	88
Tabla 14	Resistencia al Impacto Obtenida.....	90
Tabla 15	Temperatura VICAT Obtenida.....	92
Tabla 16	Datos de Absorción de Agua Obtenidos.....	94
Tabla 17	Datos de Densidad Obtenidos.....	97
Tabla 18	Determinación de Costos Vs Porcentaje de Caco3.....	101

## **TERMINOS Y DEFINICIONES**

Poliiolefinas	polímeros formados por monómeros de Hidrocarburos no saturados
ASTM	American Society of testing Material
PVC	Policloruro de Vinilo
Hidrofobia	Rechazo del material al agua
ASEPLAS	Asociacion ecuatoriana de plasticos

## **INTRODUCCIÓN**

Desde inicios de la industria plástica moderna a principios del siglo 20, los materiales termoplásticos han sido cada vez más demandados por la sociedad debido a su amplio abanico de aplicaciones, especialmente los plásticos “comodities” como el Polietileno y Polipropileno, por su bajo costo y alta reciclabilidad. En Ecuador ha habido un constante crecimiento de las importaciones de termoplásticos debido al alto consumo y a la ausencia de industria petroquímica nacional; sin embargo la tendencia se ha acentuado en los polietilenos.

En principio, el propósito de adicionar rellenos minerales a los polímeros, tanto comodities como de ingeniería, fue la reducción de costos por ahorro de resinas, ya que se usaban principalmente materiales que tenían un costo muy inferior a las resinas vírgenes. Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el uso de rellenos como una parte funcional en la industria de procesamiento de plásticos.

La ESPOL dentro de proyectos VLIR/ FUNDACYT ha realizado mejoras a una extrusora de tornillo simple para desarrollar compuestos y nanocompuestos de Termoplásticos con rellenos minerales varios.

El objetivo de esta tesis es determinar indirectamente la capacidad de mezclado de la extrusora de tornillo simple con diseños especiales mediante la evaluación mecánica de propiedades resultantes en compuestos realizados con la misma, utilizando polietileno de alta densidad con diferentes concentraciones de carbonato de calcio

Otro de los objetivos es determinar la tendencia de las diferentes propiedades del polietileno de alta densidad al ser mezclado con diferentes proporciones de carbonato de calcio

Una vez obtenidas las tendencias de estos materiales se realizara un análisis comparativo de costos con el cual analizaremos las ventajas económicas en torno al ahorro de resinas que conlleva utilizar el carbonato de calcio con las ventajas que presentan estos compuestos en la mejoras de las propiedades mecánicas para ser usadas en desarrollo de innovadores productos donde se requiera la mejora de estos materiales.

# CAPITULO 1

## 1. INFORMACION GENERAL

### 1.3 Antecedentes y Justificación.

El plástico es el material con mayor aplicación y desarrollo en los últimos años. Lo que hace diferente y excepcional a este material con relación a los otros materiales conocidos son sus propiedades las cuales han logrado que este material sustituya a otros materiales tradicionales.

Un ejemplo de estas propiedades es la densidad, la cual es de aproximadamente  $1/7$  de la del acero, es decir que con el peso de una ensaladera de acero se pueden construir 7 ensaladeras de plástico manteniendo las propiedades necesarias para la construcción de esta.

El plástico tiene su origen en el año de 1870, en donde John Wesley Hyatt inventa el Nitrato de Celulosa para entrar en un

concurso en el que se debía encontrar un sustituto del marfil para las bolas de billar cuando el negocio del marfil se había interrumpido en forma tajante por la guerra de recesión.[1]

El siguiente material plástico fue introducido por Leo Baekeland en 1907 que fue el formaldehído fenólico. Se requirieron cuatro décadas más y se desarrollaron unos 18 polímeros y la maquinaria necesaria para la producción de estos materiales para que a principios de 1945 se diera paso a los principios de lo que ahora se conoce como la industria del plástico.

Un auge significativo de la industria del plástico se da al final de la segunda guerra mundial cuando se lanza al mercado civil un material que se había mantenido en secreto durante la época de la guerra; el polietileno de baja densidad con uno de sus principales usos que fue para revestir los cables conductores de comunicaciones.

Desde 1945 hasta después de unos 43 años siguientes, es decir hasta 1988 la industria del plástico se levanta ante el mercado estadounidense con aumento en su volumen de ventas de 1300 a 26.000 millones de Kg. [1] [3]

En estas últimas décadas, la industria del plástico ha sufrido un gran crecimiento en el Ecuador, usando estos para diferentes aplicaciones como son, fundas, tuberías, utensilios de cocina, etc.

Sin embargo en los últimos años se ha visto un creciente incremento del costo del materia prima, esto plantea la necesidad de encontrar materiales alternativos que ayuden a disminuir los costos de producción; Además también se ha incrementado los costos de las maquinarias, siendo un factor influyente para la conservación o mejoras de maquinas con tecnología actuales.

La ESPOL dentro de proyectos VLIR/ FUNDACYT ha realizado mejoras a una extrusora de tornillo simple para desarrollar compuestos y nanocompuestos de Termoplásticos con rellenos minerales varios.

Esta tesis investigará la capacidad de mezclado del tornillo especial con polietileno en altas concentraciones de carbonato de calcio utilizando esta extrusora con un tornillo de dimensiones especiales.

### **1.3 Planteamiento del Problema**

El uso de materiales como refuerzos en los plásticos se ha hecho mucho más frecuente en los últimos años, los cuales empezaron a

usarse con el principal objetivo de disminuir los costos de producción debido a que la materia prima del plástico es elevado debido a que el Ecuador no cuenta con Industria Petroquímica.

Estos rellenos fueron introducidos por primera vez industrialmente en 1930 y han proporcionado un gran desarrollo a la sociedad desde la primera vez que fueron usados en la industria; posteriormente, cuando los precios de los polímeros empezaron a bajar, el costo de las resinas esta razón fue cada vez menos importante debido a la investigación en el aumento de propiedades que estos rellenos adicionaban a las matrices poliméricas. Así se estima que en los primeros años de uso de estos rellenos minerales se usaron alrededor de 1 millón de toneladas en aplicaciones de termoplásticos en el oeste de Europa por el años de 1986. [17]

En principio, el propósito de adicionar rellenos minerales a los polímeros, tanto commodities como de ingeniería, fue la reducción de costos por ahorro de resinas, ya que se usaban principalmente materiales que tenían un costo muy inferior a las resinas vírgenes. Sin embargo, en los últimos años se ha incrementado el uso de rellenos como una parte funcional en la industria de procesamiento de plásticos. Características multifuncionales como altas

propiedades mecánicas, térmicas, de barrera, ópticas y eléctricas son algunas de los objetivos que se han alcanzado con éxito con el desarrollo de compuestos de Polímeros rígidos con “rellenos funcionales”.

Existen algunos minerales utilizados en conjunto con los termoplásticos, sin embargo, el carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es una alternativa de importancia para nuestro país debido a su abundancia, disponibilidad y bajo costo; pero sobre todo por el aumento de propiedades mecánicas como resistencia a la tensión, módulo elástico, y resistencia al impacto, principalmente. En el presente trabajo se desarrollarán compuestos de Polietilenos con carbonatos de calcio, por ser las materias primas de mayor aceptación en la industria plástica ecuatoriana.

Las propiedades finales que tendrá el compuesto PE -  $\text{CaCO}_3$ , dependerán ampliamente del proceso de mezclado entre las fases del compuesto[1]

Para cumplir esta función con eficiencia, se diseñó un tornillo nuevo para la máquina con diferentes zonas de mezclado y se realizó un rediseño del cabezal de una extrusora de tubería de termoplásticos para transformarlo en un cabezal de una

peletizadora convencional. Finalmente se evalúa el comportamiento a la tensión de un compuesto ternario HDPE – LLDPE - CaCO<sub>3</sub>, realizado con la extrusora reconstruida, para constatar indirectamente el desempeño del equipo desarrollado. [16][17].

En La industria Ecuatoriana actualmente se usan rellenos minerales y especialmente el carbonato de calcio, sin embargo pocas industrias utilizan el carbonato de calcio en polietilenos y cuando los usan es en bajas proporciones; además no se conoce exactamente las propiedades de los productos a grandes proporciones.

### **Objetivos**

El objetivo de esta tesis es determinar la capacidad de mezclado de la extrusora de tornillo simple con diseños especiales mediante la evaluación mecánica de propiedades resultantes en compuestos realizados con la misma, utilizando polietileno de alta densidad con diferentes concentraciones de carbonato de calcio.

Otro de los objetivos es determinar la tendencia de las diferentes propiedades del polietileno de alta densidad al ser mezclado con diferentes proporciones de carbonato de calcio.

Una vez obtenida la tendencia de las propiedades debido a la adición carbonato de calcio en sus diferentes proporciones se detallara algunas posibles utilidades de estos compuestos en la industria de acuerdo a los resultados obtenidos. Se realizara también un análisis de costos de material en relación a las propiedades mecánicas resultantes.

### **1.3 Metodología usada**

Se realizarán cuatro mezclas de Polietileno de alta densidad con carbonatos de calcio en proporciones que van en un 90-10, 85-15, 75-25, 60-40 % respectivamente.

#### **1.3.1 Preparación de las probetas**

Para la realización de las probetas primero se calcularán los porcentajes de mezclas en base a un peso total de 500gr. las cuales se procederán a ser mezcladas de manera manual.

Una vez realizado el mezclado manual se procederá a meter la mezcla a la máquina extrusora la cual se encargará de fundir el material sacar como resultado una mezcla homogénea la cual ira a una prensa manual la cual posee calentamiento para sacar una placa de 200x70x3 mm la cual

una vez ingresada la mezcla y con una presión constante de 10Mpa se dejara enfriar en la prensa, rigiéndose con la norma ASTM-D1928

Una vez enfriada la mezcla se procederá a cortar la placa con un troquel con las cuales realizaremos los ensayos que son servirá para determinar las propiedades analizar.

### **2.3.2 Equipos y Materiales**

Los materiales a ser usado son Polietileno de alta densidad (HDPE) en pellets y materbatch de carbonato de calcio y LLPDE

Para la obtención de la mezcla homogénea se utilizará una máquina extrusora de producción industrial marca Construzioni de tornillo simple con una relación L/D= 20, que fue donada por la compañía Amanco Plastigama, para ser usada en mezclas de poliolefinas con diferentes tipos de rellenos a grandes proporciones.

Esta extrusora procesará la mezcla de polietileno y carbonato a una temperatura de 178°C. También utilizaremos una prensa manual, la cual es una adaptación

hecha para uso de materiales plásticos la cual nos proporcionará la placa con la que obtendremos las probetas.

Esta prensa estará a una temperatura promedio de 150°C para moldear el material y producir las placas, las mismas que se enfriarán en el molde para prevenir la cristalización de la mezcla.

Para cortar estas placas y darle la forma a las probetas se utilizará un Troquel marca RAY-RAN con un molde para probetas de tipo 1 según la norma ASTM-D638, utilizadas para poliolefinas.

Adicionalmente se utilizarán los equipos para la obtención de los datos de las diferentes propiedades.

Para la prueba de tensión, se tendrá de referencia la norma ASTM-D638 y se utilizará una Prensa universal marca LLOYD Instruments LR 10K, con su respectivo software que nos arrojará los datos de tensión.

Para el ensayo de impacto se tendrá de referencia la norma ASTM D256-06<sup>a</sup> y se utilizara una maquina para ensayos de impacto tipo Izod marca Tinius Olsen, la cual nos proporcionara la energía de ruptura del material

Para el ensayo de temperatura de ablandamiento (VICAT) nos apegaremos a la norma ASTM-D1525 y se utilizara un equipo Tinius Olsen modelo HD94, equipo utilizado para este tipo de ensayo que nos proporcionara los resultados esperados.

Para el ensayo de absorción de agua nos regiremos las recomendaciones que nos da la norma ASTM-D570 y se utilizara una recipiente lleno de agua destilada y una balanza analítica marca Sartorius con la que pesaremos la probeta antes y después de sumergirla en el agua

Para el ensayo de índice de fluidez se tendrá como referencia la norma ASTM D1238-90b, y utilizaremos un Plastometro marca Tinius Olsen modelo MP993 el cual nos arrojará los datos de índice de fluidez.

Para el ensayo de determinación de densidad nos regiremos a la norma de determinación de densidad por el método del gradiente ASTM-D1505 y se utilizara una probeta graduada, un calibrador, dos fluidos de densidad diferente, en este caso agua destilada y nitrato de calcio.

### **3.3.3 Metodología de análisis**

Como metodología de análisis se seguirán las normas ASTM para la obtención de los datos de las diferentes propiedades.

Una vez obtenidos los datos se realizará un análisis Propiedades vs. Proporciones con lo cual nos permitirá observar la tendencia de la propiedad observada a medida que aumenta la proporción de carbonato sobre la mezcla con polietileno.

# CAPITULO 2

## 2. MATERIALES TERMOPLASTICOS Y SUS REFUERZOS

Los polímeros son macromoléculas generadas a través de una secuencia repetitiva de unidades denominadas monómeros; siendo los monómeros, moléculas que reaccionan para formar una estructura determinada de polímero [2]

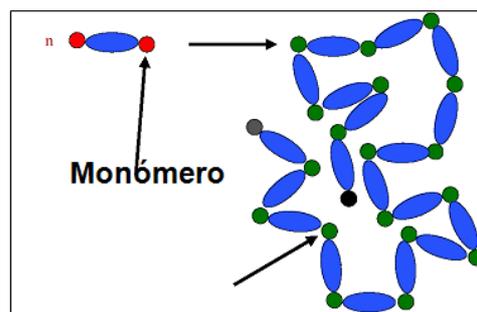
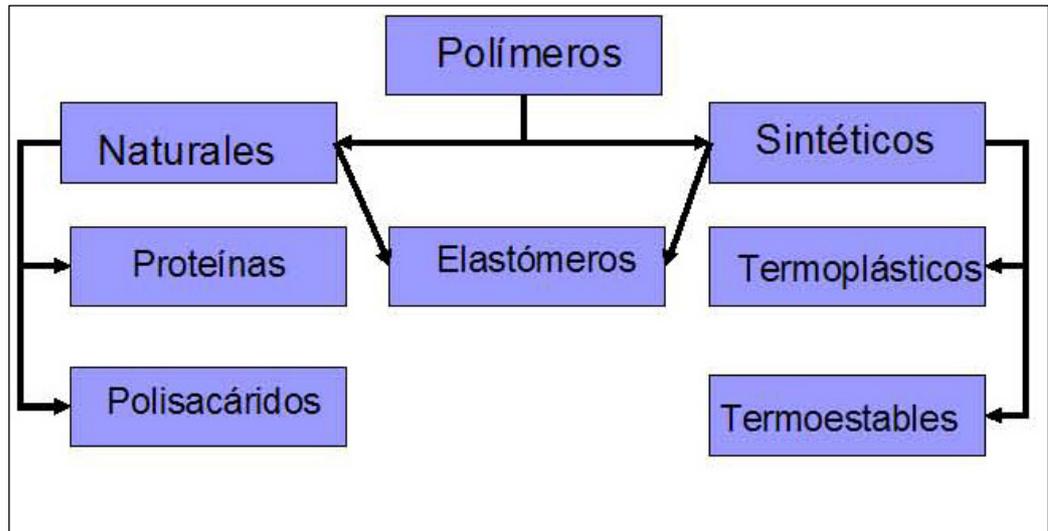


FIGURA 2.1 FORMACIÓN DE UN POLÍMERO

## 2.1 Materiales Termoplásticos

Los polímeros se clasifican generalmente de la siguiente manera:



**FIGURA 2.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS POLÍMEROS**

Dentro de esta clasificación los termoplásticos representan el grupo de materiales mayor dentro de los polímeros sintéticos [3].

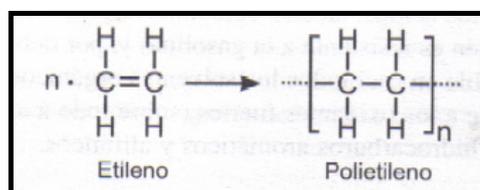
Solo entre los tres plásticos “comodities”, entre los que se comprende los tipos normales de poliolefina, poliestireno y policloruro de vinilo, ocupan más de 2/3 partes del total de los plásticos. No es posible definir una frontera clara entre los plásticos masivos y los técnicos. Mientras en las ultimas décadas se centro la atención en el desarrollo de termoplásticos basados en “nuevos” monómeros – sobre todo con el fin de aumentar la resistencia térmica - en los últimos años se dirigió más hacia la modificación de termoplásticos conocidos por medio de

la co-polimerización, aleación, influjo sobre la cristalinidad y otros para adecuar la producción de plásticos a las condiciones económicas del mercado, los desarrollos en este sentido no se han concluido aún.

Dentro de los termoplásticos; las poliolefinas (polímeros formados por monómeros de Hidrocarburos no saturados) son los más populares en la industria y se destacan en general por una buena resistencia química, altas tenacidad y elongación en la rotura, así como buenas propiedades de aislamiento eléctrico y reciclabilidad. Pueden ser procesados en prácticamente todos los procesos usuales, son económicos, y por ello, han encontrado una amplia aplicación. Hoy se han convertido en el grupo de plásticos más importante desde el punto de vista cuantitativo.

Dentro del grupo de poliolefinas, se encuentran los Polietilenos los cuales son los mas populares e importantes.

### Polietileno



**FIGURA 2.3 FORMACIÓN DE UN POLIETILENO**

Son polímeros oleofínicos importantes que cada año alcanzan un crecimiento significativo. La combinación de propiedades útiles, fabricación fácil y buenos aspectos económicos ha originado que se les considere como materiales comerciales [4].

### **Categorías**

Los polietilenos son resinas termoplásticas producidas mediante procesos a alta y baja presión en los que se usan varios sistemas catalíticos complejos [1]. Como resultado se obtienen varias familias de polímeros, los cuales son:

- Polietileno de baja densidad (LDPE)
- Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE)
- Polietileno de alta densidad (HDPE)

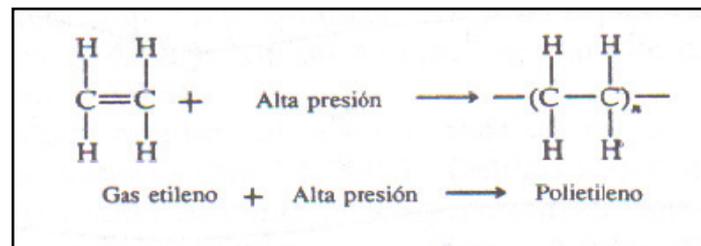
Cada uno de estos, poseen características muy diferentes de comportamiento y cualidades técnicas. Por lo general, todos los polietilenos poseen propiedades eléctricas excelentes, una resistencia inmejorable a los disolventes orgánicos y a compuestos químicos. Son materiales translucidos, de peso ligero, resistentes y flexibles.

El desarrollo de las familias del polietileno tiene su historia, en donde mediante descubrimiento, investigaciones, mejoramiento de procesos y maquinarias se han ido obteniendo estas diversas clases de

polietileno mejorando sus propiedades y teniendo una gama de clases a escoger. Así podemos decir que por medio de la polimerización bajo alta presión, desarrollada en 1939 por ICI en Inglaterra, se obtienen principalmente macromoléculas ramificadas. Este proceso produce el polietileno con baja densidad (LDPE) [3].

En la polimerización por baja presión, desarrollada en el año de 1953 por K. ZIEGLER y otros, se posibilita, por medio de catalizadores especiales, la polimerización a presión atmosférica. El polietileno obtenido de esta forma posee pocas ramificaciones; por ello la estructura molecular resulta lineal y tiene una mayor densidad (HDPE) que la que tiene el polietileno a alta presión (LDPE).

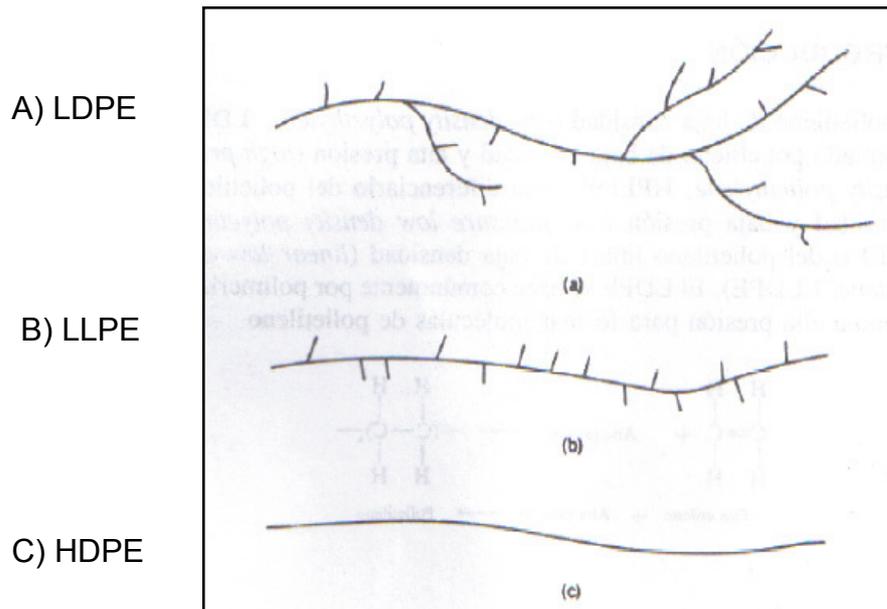
### Polietileno de baja densidad (LDPE)



**FIGURA 2.4 FORMACIÓN DE UN POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD**

El llamado a veces polietileno de baja densidad y alta presión es un polímero altamente ramificado con una densidad de 57.1 – 57.7 lb/pie<sup>2</sup> (0,915 a 0,925 g/cm<sup>2</sup>) y un peso molecular de hasta 4 x 10<sup>6</sup>.

Una de las diferencias entre el polietileno de alta densidad y los otros es que este es un polímero ramificado, a diferencia del polietileno de alta que es un polímero lineal



**FIGURA 2.5 DIFERENCIAS ENTRE MOLÉCULAS**

### **Descripción de las propiedades**

Las propiedades térmicas del LDPE incluyen un intervalo de fusión con una temperatura de fusión máxima de 223-234°F (106-112°C).

Su temperatura de fusión relativamente baja y su amplio intervalo de fusión caracterizan al LDPE como una resina que permite operaciones de termosellado rápida. La temperatura de transición vítrea  $T_g$  del LDPE está muy por debajo de la temperatura ambiente, explicando así

la naturaleza flexible y blanda del polímero. La combinación de fases cristalinas y amorfas en el LDPE hace difícil la determinación del Tg. Sin embargo, puede decirse que hay transiciones moleculares significativas en el LDPE a aproximadamente  $-4$  y  $-193^{\circ}\text{F}$  ( $-20$  y  $-125^{\circ}\text{C}$ ).

Las propiedades mecánicas del LDPE en el estado fundido son afectadas en su mayor parte por el peso molecular y la distribución de pesos moleculares. El alto peso molecular da por resultado una rapidez de flujo baja e índices de fusión bajos, de modo que el peso molecular es inversamente proporcional al índice de fusión.

La resistencia a la fusión es una indicación de que tan bien puede sostenerse el polímero fundido y la capacidad de estiramiento es una medida de que tan delgado puede extenderse el polímero fundido antes que se rompa.

**TABLA 1**

**EFFECTOS DE DENSIDAD, ÍNDICE DE FUSIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PESOS MOLECULARES SOBRE PROPIEDADES EN ESTADO SÓLIDO DE L LDPE**

<b>PROPIEDADES</b>	a medida que se incrementa la densidad	a medida que se incrementa el indice de fusion	a medida que se amplia la DPM
impacto de un dardo	Decrece	Decrece	Decrece
Resistencia al desgarre	Decrece	Se incrementa	Decrece
Resistencia a la tracción	Se incrementa	Decrece	Insignificante
Limite elástico	Se incrementa	Insignificante	Insignificante
Alargamiento	Decrece	Decrece	Insignificante
Rigidez	Se incrementa	Decrece	Ninguna
Permeabilidad	Decrece		Ninguna

**Aplicaciones.**

Entre las principales aplicaciones de las películas de LDPE tenemos:

- Bolsas para pan
- Plástico estirable para envolturas
- Bolsas para emparedados
- Bolsas para prendas de vestir

En los sustratos recubiertos por extrusión se utilizan:

- Cartones para leche
- Muchas aplicaciones de empaqueo de alimentos

Para recipientes de LDPE moldeados por soplado se usan para:

- Para envasar leche
- Para envasar productos químicos

En procesos de inyección se utilizan:

- Tapas de lata
- Juguetes y cubetas

Otros usos importantes incluye forrados de cables y alambres y como esponja para salvavidas.

### **Ventajas y desventajas**

Ventajas:

- Buen balance de propiedades
- Fácil procesabilidad
- Bajo costo
- Puede fabricarse mediante muchos métodos diferentes para una amplia gama de aplicaciones.

### **Desventajas.**

No puede ser adecuado en aplicaciones que requieran una rigidez extrema, buenas propiedades aislantes, una notable resistencia a la tensión o una alta resistencia a la temperatura.

**TABLA 2**

**TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO**

Proceso	A	B	C
Moldeado por inyección	x		
Extrusión	x		
Termoformado	x		
Moldeado con espuma	x		
Moldeado por inmersión			
Moldeado rotacional	x		
Revestimiento con polvo en lecho fluidificado			
Moldeado por compresión reforzados			
Moldado por compresión y transferencia			
Moldeado por inyección reactiva			
Moldeado mecánico			
Vaciador			

**TABLA 3**

**ESPECIFICACIONES DE PROPIEDADES**

PROPIEDADES	MÉTODOS DE PRUEBAS	UNIDADES METRICAS	VALOR
<b>MECANICAS</b>			
DENSIDAD	D792	g/cm3	0.915-0.925
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	D638	Mpa	6.9-19.2
MÓDULO DE TRACCIÓN	D638	MPa	158-310
MÓDULO DE FLEXIÓN	D090	Mpa	
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA	D638	%	100-700
IZOD CON MUESCA A LA TEMP. AMB.	D256	J/m	
DUREZA	D285		D285
<b>TÉRMICAS</b>			
DE DESVIACIÓN @ 264 Lb/pulg2	D648	°C	
DE DESVIACIÓN @ 66 Lb/pulg2	D648	°C	41-44
TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO VICAT	D1525	°C	90-102
INDICE DE TEMPERATURA. UL	ULT46D	°C	
CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS NORMAS DE INFLAMABILIDAD DE UL	UL94		
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA	D696	mm/mm°C	180-596x106
<b><u>AMBIENTALES</u></b>			
ABSORCIÓN DE AGUA EN 24 HORAS	D570	%	<0.01
CLARIDAD	D1003	% de transmisión	translucido
RESISTENCIA AMBIENTAL	D1435	%	
APROBACION POR LA FDA			si
<b><u>RESISTENCIA</u></b>			
QUIMICA A ACIDO DÉBIL	D561		no es atacado
ÁCIDO FUERTE	D543		minimamente atacado
DISOLVENTES DE BAJO PESO MOLECULAR	D543		minimamente atacado
ALCOHOLES	D543		no es atacado
<b><u>ELÉCTRICAS</u></b>			
RESISTENCIAS DIELECTRICAS	D149	Kv/mm	
CONSTANTE DIELECTRICA	D150		2.2
FACTOR DE POTENCIA	D150		0.0003
<b>OTRAS</b>			
TEMPERATURA DE FUSIÓN	D3418	°C	106-312
TEMPERATURA DE TRANSICION VÍTREA	D3418	°C	-126

## **Condiciones de Procesamiento**

En forma de comprimidos no requiere tratamiento especial, para extrusión a temperaturas por arriba de los 350°F (177°C) debe purgarse continuamente a baja velocidad para evitar la degradación térmica del polímero. Los fabricantes comerciales reciclan rutinariamente los recortes y el desecho de LDPE.

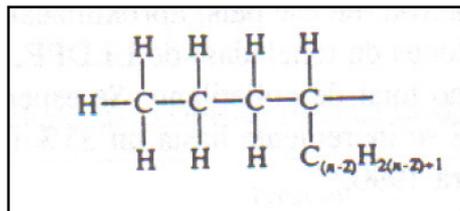
## **Propiedades que imparte el procesamiento**

Las condiciones de procesamiento afectan la orientación molecular y la densidad del LDPE que, a su vez, afectan las propiedades ópticas y mecánicas del producto final, las mismas que pueden reducirse aumentando la temperatura de procesamiento y velocidades de procesamientos mas lentas.

El parámetro crítico es la velocidad de enfriamiento, velocidades de enfriamiento rápidas, producen densidades más bajas afectando las propiedades mecánicas del LDPE.

## Polietileno lineal de baja densidad (LLDPE)

Se lo puede describir como un copolimero de etileno/ $\alpha$ -olefina que tiene una estructura molecular lineal.



**FIGURA 2.6 ESTRUCTURA DEL LLDPE**

Donde  $n$  indica el número de carbonos en el monómero que se usan para producir la resina. Los cronómetros más usados comercialmente son el butano, el enseño y el octeto.

### Categoría

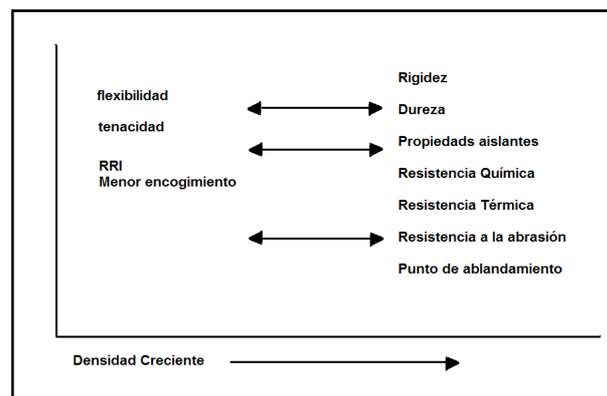
El LLDPE es un material termoplástico duro y resistente que consiste en un esqueleto lineal con ramificaciones laterales cortas. La longitud y posición de las cadenas laterales también afecta las propiedades del producto.

Existen muchos tipos de productos: el índice de fusión puede variar de 0,5 a 150 g/10 min.; la densidad de 56,4 – 58,9 lb/pie<sup>3</sup> (0,905 a 0,945 g/cm<sup>3</sup>). Las resinas en el intervalo de densidad de 58,4 – 58,9 lb/pie<sup>3</sup> (0,936 a 0,945 g/cm<sup>3</sup>) a menudo se conocen como resinas de

polietileno lineal de densidad media, mientras que aquellos con densidades de 56,4 – 57,0 lb/pie<sup>3</sup> (0,905 a 0,915 g/cm<sup>3</sup>) se consideran como polietileno de baja densidad de ultra baja linealidad.

### Descripción de las propiedades.

El LLDPE es un polímero de bajo costo, extremadamente versátil adaptable a muchas técnicas de fabricación. Duro, químicamente inerte y resistente a disolventes, ácidos y álcalis, el LLDPE también posee buenas propiedades dieléctricas y aislantes. La densidad de la resina tiene un efecto significativo sobre la flexibilidad, la permeabilidad, la resistencia a la tracción y las resistencias químicas y térmica del LLDPE. La figura 2.7 incluye una lista de algunos de los efectos de la densidad sobre varias propiedades de los artículos fabricados con LLDPE



**FIGURA 2.7 EFECTOS DE LA DENSIDAD DEL POLÍMERO SOBRE ARTÍCULOS HECHOS DE LLDPE**

Las resinas se pueden pigmentar y estabilizar a la radiación UV a través de métodos ordinarios.

### **Aplicaciones**

Entre las principales aplicaciones de las películas de LLDPE tenemos:

- Bolsas para basura
- Películas autoadheribles para envolturas
- Sacos para uso pesados

Las películas tienen una dureza, resistencia al desgaste, impacto al dardo y resistencia a la punción excepcionales en comparación con las películas comunes de LDPE de alta presión.

Adicionalmente las películas LLDPE sirven como envoltura debido a sus excelentes propiedades de resistencia al termosellado y termosoldado. En la Tabla 4 se resumen las principales aplicaciones de las películas que suman un 70% del LLDPE.

**TABLA 4**

**PRINCIPALES APLICACIONES DE LAS PELÍCULAS DE LLDPE**

<b>Bolsas para Basura</b>	<b>Película contraíble</b>
<b>Película para repostería</b>	<b>Película laminable</b>
<b>Bolsas para alimentos Congelados</b>	<b>Película para empaquetado</b>
<b>Bolsas para uso pesado</b>	<b>Película agrícola</b>
<b>Sacos para comestibles</b>	<b>Película para construcción</b>
<b>Bolsas para hielo</b>	<b>Película autoadherente</b>
<b>Bolsas para productos naturales</b>	<b>Forros para pañales</b>

Para el recubrimiento por extrusión no existen muchas aplicaciones y aunque el recubrimiento polimérico a menudo proporciona resistencia al agua y a la grasa, se dificulta debido a la estrecha distribución de pesos moleculares de los polímeros lineales.

Los artículos moldeados de LLDPE se fabrican por inyección y moldeo rotacional, entre las principales aplicaciones tenemos:

Moldeo por inyección:

- Botes de basura
- Contenedores de alimentos
- Tapaderas
- Cubetas
- Cierres

Entre las propiedades de realizar estos productos por inyección tenemos que la resistencia es mejorada al resquebrajamiento por interperización, encogimiento y combamiento reducidos y excelente dureza a baja temperatura en comparación a materiales comunes de LDPE.

Moldeados por rotación:

- Contenedores para embarque
- Tanques de almacenamiento
- Muebles para exteriores.

El LLDPE tiene un buen flujo y proporciona partes moldeadas por rotación con una excelente resistencia y dureza excepcionales.

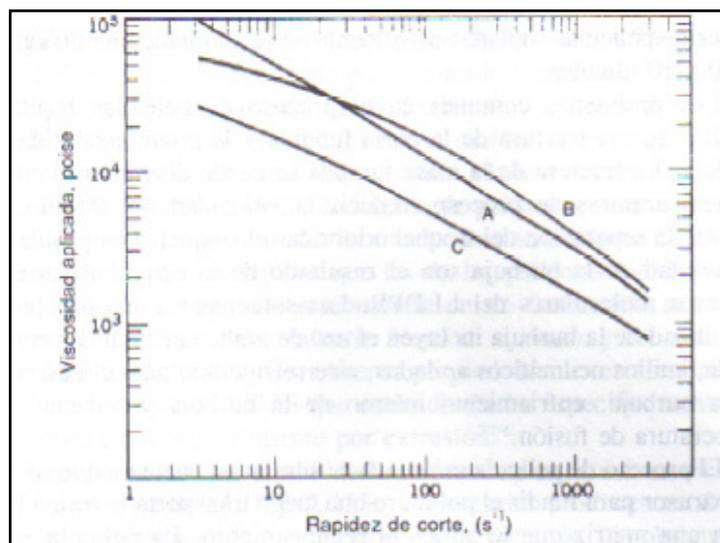
Para las operaciones de extrusión con el LLDPE las principales aplicaciones son:

- Recubrimiento para cables telefónicos, de alta tensión
- Tuberías

Las resinas de LLDPE ofrecen flexibilidad, y con una amplia distribución de pesos moleculares se extruyen, posibilitando el proceso a alta velocidad y permitiendo la producción de forros para cables y tuberías con superficie lisa [5].

## Ventajas y Desventajas

El comportamiento reológico de una resina es un indicador de su procesabilidad [1]. En la figura 2.8 se presentan curvas características de reología. Aquí se demuestra que el LLDPE es más viscoso que el LDPE a una velocidad de corte determinada. Como se ilustra la figura a medida que se incrementa la velocidad de corte, la viscosidad del LLDPE cae más lentamente que la de dos resinas LDPE. Lo que nos da como conclusión que es más difícil de procesar por extrusión.



**FIGURA 2.8 CURVAS CARACTERÍSTICAS RAPIDEZ DE CORTE VS. VISCOSIDAD**

Entre las principales ventajas tenemos:

- Se puede obtener un producto terminado con un funcionamiento equivalente y usualmente mejor que el de un producto de LPDE usando menos kilogramos de material.
- La temperatura de fusión más elevada hace posible la formación de recipientes para el almacenamiento de alimentos que puedan lavarse en máquinas lava platos.
- Los termosellos son mucho mas resistentes que los de LDPE

Entre las principales desventajas tenemos:

- Es mucho más difícil de procesar por extrusión como lo comentamos anteriormente.
- Fluyen a temperaturas más altas, de modo que la velocidad de enfriamiento se vuelve un factor que se debe observar en la fabricación de enfriamiento para fabricación de productos a velocidades considerables.

En la actualidad, muchos sistemas comerciales de extrusión que permiten a un convertidor procesar resinas de LLDPE a velocidades que sean bien aceptadas por la industria.

## **Técnicas de procesamiento**

Las técnicas de procesamiento del LLDPE más usadas son la extrusión de películas moldeadas y por soplado, el moldeo por inyección, el moldeo rotacional y el recubrimiento por extrusión. Las características del procesamiento del LLDPE vienen determinadas por la reología de la resina y por las condiciones del proceso.

Las resinas usadas en aplicaciones de películas sopladas usualmente tienen un índice de fusión de 0,8 a 0,6 g/10 min.

Los problemas comunes en el proceso de películas sopladas de LLDPE son la fractura de la masa fundida y la pobre estabilidad de la burbuja.

El proceso de la película soplada es similar en cuanto se emplea un extrusor para fundir el polímero que luego transporta la resina fundida hasta la matriz que le aplica el recubrimiento.

Los problemas de procesabilidad comúnmente se resuelven mediante el uso de mezclas de LLDPE/LDPE. Las mezclas producen estabilidad de la burbuja, reducen los requerimientos de potencia.

**TABLA 5****PROCESABILIDAD DEL LLDPE**

Proceso	A	B	C
Moldeado por inyección	x		
Extrusión	x		
Termoformado	x		
Moldeado con espuma	x		
Moldeado por inmersión			
Moldeado rotacional	x		
Revestimiento con polvo en lecho fluidificado			
Moldeado por compresión reforzados			
Moldado por compresión y transferencia			
Moldeado por inyección reactiva			
Moldeado mecánico			
Vaciado			

**TABLA 6**

**PROPIEDADES DEL LLDPE  
(DE DENSIDAD DEL 56,7 A 57,6 LB/PIE<sup>3</sup>)**

PROPIEDADES	MÉTODOS DE PRUEBAS	UNIDADES METRICAS	VALOR
<b>MECANICAS</b>			
DENSIDAD	D792	g/cm <sup>3</sup>	0.910-0.925
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	D638	Mpa	14-21
MÓDULO DE TRACCIÓN	D638	MPa	137-486
MÓDULO DE FLEXIÓN	D090	Mpa	248-563
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA	D638	%	200-1200
IZOD CON MUESCA A LA TEMP. AMB.	D256	J/m	
DUREZA	D285		C73, D45, D47-53
<b>TÉRMICAS</b>			
DE DESVIACIÓN @ 264 Lb/pulg <sup>2</sup>	D648	°C	
DE DESVIACIÓN @ 66 Lb/pulg <sup>2</sup>	D648	°C	6-56
TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO VICAT	D1525	°C	30-54
INDICE DE TEMPERATURA. UL	ULT46D	°C	
CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS NORMAS DE INFLAMABILIDAD DE UL	UL94		
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA	D696	mm/mm°C	160-198x10 <sup>4</sup>
<b><u>AMBIENTALES</u></b>			
ABSORCION DE AGUA EN 24 HORAS	D570	%	<0.01
CLARIDAD	D1003	% de transmision	
RESISTENCIA AMBIENTAL	D1435	%	
APROBACION POR LA FDA			si
<b><u>RESISTENCIA</u></b>			
QUIMICA A ACIDO DÉBIL	D561		no es atacado
ÁCIDO FUERTE	D543		minimamente atacado
DISOLVENTES DE BAJO PESO MOLECULAR	D543		insoluble
ALCOHOLES	D543		insoluble
<b><u>ELECTRICAS</u></b>			
RESISTENCIAS DIELECTRICAS	D149	Kv/mm	
CONSTANTE DIELECTRICA	D150		2.3
FACTOR DE POTENCIA	D150		<0.0008
<b>OTRAS</b>			
TEMPERATURA DE FUSIÓN	D3418	°C	125
TEMPERATURA DE TRANSICION VÍTREA	D3418	°C	-130

**TABLA 7**

**PROPIEDADES DEL LLDPE  
(DE DENSIDAD DEL 57,7 A 58,6 LB/PIE<sup>3</sup>)**

PROPIEDADES	MÉTODOS DE PRUEBA	UNIDADES METRICAS	VALOR
<b>MECANICAS</b>			
DENSIDAD	D792	g/cm <sup>3</sup>	0.926-0.980
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	D638	Mpa	14-24
MÓDULO DE TRACCIÓN	D638	MPa	
MÓDULO DE FLEXIÓN	D090	Mpa	248-365
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA	D638	%	200-1200
IZOD CON MUESCA A LA TEMP. AMB.	D256	J/m	
DUREZA	D285		D55,D59
<b>TÉRMICAS</b>			
DE DESVIACIÓN @ 264 Lb/pulg <sup>2</sup>	D648	°C	
DE DESVIACIÓN @ 66 Lb/pulg <sup>2</sup>	D648	°C	6-64
TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO VICAT	D1525	°C	102-114
INDICE DE TEMPERATURA. UL	ULT46D	°C	
CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS NORMAS DE INFLAMABILIDAD DE UL	UL94		
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA	D696	mm/mm°C	147-300x10 <sup>4</sup>
<b><u>AMBIENTALES</u></b>			
ABSORCION DE AGUA EN 24 HORAS	D570	%	<0.01
CLARIDAD	D1003	% de transmision	
RESISTENCIA AMBIENTAL	D1435	%	
APROBACION POR LA FDA			si
<b><u>RESISTENCIA</u></b>			
QUIMICA A ACIDO DÉBIL	D561		no es atacado
ÁCIDO FUERTE	D543		minimamente atacado
DISOLVENTES DE BAJO PESO MOLECULAR	D543		insoluble
ALCOHOLES	D543		insoluble
<b><u>ELECTRICAS</u></b>			
RESISTENCIAS DIELECTRICAS	D149	Kv/mm	
CONSTANTE DIELECTRICA	D150		2.3
FACTOR DE POTENCIA	D150		<0.0005
<b>OTRAS</b>			
TEMPERATURA DE FUSIÓN	D3418	°C	125
TEMPERATURA DE TRANSICION VÍTREA	D3418	°C	-130

## **Propiedades que imparte el procesamiento**

Las temperaturas del proceso y las velocidades de enfriamiento y de fabricación afectan las propiedades finales. Éstos son parámetros críticos en la producción de películas moldeadas y sopladas, el moldeo, el recubrimiento por extrusión y la extrusión. La magnitud de los efectos varía, dependiendo de los procesos de fabricación. Las propiedades de desgarramiento, el comportamiento, la tensión y las características ópticas.

## **Polietileno de alta densidad (HDPE)**

La densidad del HDPE se controla en el proceso de manufacturación mediante la cantidad de comonomero añadido al reactor. Los comómeros comunes usados con el etileno en el HDPE son el propileno, buteno, hexeno y octeno. A medida que se incrementa el peso molecular del polietileno, las cadenas poliméricas más largas no se cristalizan tan fácilmente y una cristalinidad más baja reduce aún más la densidad de un homopolímero de HDPE.

## **Categorías**

El HDPE es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino. El grado de cristalinidad depende del peso

molecular, de la cantidad de comonomero presente y del tratamiento térmico aplicado.

La cristalinidad de una resina de HDPE determinada puede variar dentro de una amplia gama debido a la tasa de enfriamiento de la masa fundida, entre más lenta es la tasa de enfriamiento mas cristalino se vuelve el material. El intervalo de cristalinidad del HDPE normalmente abarca de un 50 a un 80%. Debido a que el grado de cristalinidad del HDPE es variable, éste puede considerarse como un polímero amorfo con una cantidad variable de carga cristalina.

### **Descripción de las propiedades**

En el caso del HDPE se incrementan las propiedades de resistencia a la cedencia tensil, rigidez, resistencia a la deformación, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, contracción en el moldeo y dureza al incrementarse la densidad. Por otra parte, se incrementa la resistencia al impacto, la flexibilidad y la resistencia al resquebrajamiento por intemperización (RRI) al disminuir la densidad.

No es posible maximizar todas las propiedades del HDPE en una sola resina, es por eso que la mayoría de los fabricantes de HDPE ofrecen muchos tipos de resina de HDPE en su mezcla de productos. La selección de una resina de HDPE para una aplicación determinada

tiene que ver con una evaluación cuidadosa de los requerimientos de aplicación a fin de seleccionar la resina de HDPE que más satisfaga los requerimientos más importantes.

La temperatura de transición vítrea  $T_g$  del polietileno está muy por debajo de la temperatura ambiente. Esto proporciona al polietileno una naturaleza más elástica. La naturaleza elástica del HDPE también limita su temperatura de servicio en comparación con la de un polímero de una  $T_g$  por arriba de la temperatura ambiente. Se le han asignado valores diferentes a la  $T_g$  del HDPE mediante diferentes técnicas de medición, lo cual ha dado pie a muchas controversias. Existen tres intervalos de temperatura comúnmente asignados como temperatura de transición vítrea del polietileno;  $-207$  a  $171^\circ\text{F}$  ( $-133$  a  $113^\circ\text{C}$ ),  $-126$  a  $99^\circ\text{F}$  ( $-88$  a  $37^\circ\text{C}$ ),  $-45$  a  $9^\circ\text{F}$  ( $-43$  a  $-13^\circ\text{C}$ ).

Debido a que el HDPE es elástico, su módulo de deformación es más importante que, por ejemplo, su módulo de flexión en la determinación de la resistencia durante el servicio de una parte hecha de HDPE que deba soportar una carga de trabajo por un periodo prolongado.

## **Aplicaciones**

En forma de películas las principales aplicaciones son:

- Empaques para bocadillos
- Recubrimientos de cajas de cereales

En forma de botellas modeladas por soplado las aplicaciones son:

- Para contener lácteos
- Algunas bebidas no carbonatadas

En forma de recipiente modelado por inyección :

- Empaquetamientos para margarina
- Crema batida para decorar
- Recipientes para productos químicos, caseros e industriales
- Cubetas para líquidos de limpieza
- Para contener pintura

En resumen, el HDPE es un termoplástico versátil que tiene muchas aplicaciones exitosas que maximizan sus propiedades.

## **Técnica de procesamiento**

El HDPE puede hacerse en forma de película mediante los procesos de película colada y película soplada por extrusión. Se extruye

eficazmente en láminas y perfiles y se moldea fácilmente por inyección, soplado y rotacionalmente. Cuando se añade un agente de soplado, el HDPE puede fabricarse en formas esponjadas. El HDPE también puede moldearse por compresión, aunque es raro encontrar un sistema comercial que lo realice. El HDPE puede forjarse y modelarse a temperaturas por debajo de su temperatura de fusión, pero esto no se hace comercialmente. Un trabajo de desarrollo prometedor está en curso en la producción de fibras de HDPE.

La mayoría de los agentes de refuerzo y de relleno (cargas) pueden usarse en el HDPE. La adición de una carga usualmente mejora la resistencia a la flexión, la resistencia a la deformación y la dureza, pero las ganancias en las propiedades físicas pueden ser contrarrestadas por una resistencia al impacto, elongación a la tracción y procesabilidad reducidas. La adición de una carga también puede incrementar la densidad del HDPE.

Algunas de las cargas usadas para el HDPE son el talco, el carbonato de calcio, la fibra de vidrio y la mica; alguna de las cuales detallaremos más adelante.

**TABLA 8****TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO**

Proceso	A	B	C
Moldeado por inyección	x		
Extrusión	x		
Termoformado	x		
Moldeado con espuma	x		
Moldeado por inmersión			
Moldeado rotacional	x		
Revestimiento con polvo en lecho fluidificado			
Moldeado por compresión reforzados			
Moldado por compresión y transferencia			x
Moldeado por inyección reactiva			
Moldeado mecánico			x
Vaciado			

**TABLA 9**

**ESPECIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE EL HDPE**

PROPIEDADES	MÉTODOS	UNIDADES	VALOR
	DE PRUEBA	METRICAS	
<b>MECANICAS</b>			
DENSIDAD	D792	g/cm3	0.941-0.967
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	D638	Mpa	18.6-20.3
MÓDULO DE TRACCIÓN	D638	MPa	
MÓDULO DE FLEXIÓN	D090	Mpa	689-1654
ALARGAMIENTO A LA RUPTURA	D638	%	100-1000
IZOD CON MUESCA A LA TEMP. AMB.	D256	J/m	27-160
DUREZA	D285		
<b>TÉRMICAS</b>			
DE DESVIACIÓN @ 264 Lb/pulg2	D648	°C	
DE DESVIACIÓN @ 66 Lb/pulg2	D648	°C	65-93
TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO VICAT	D1525	°C	120-130
INDICE DE TEMPERATURA. UL	ULT46D	°C	
CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS NORMAS DE INFLAMABILIDAD DE UL	UL94		
COEFICIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA	D696	mm/mm°C	108-198x106
<b><u>AMBIENTALES</u></b>			
ABSORCION DE AGUA EN 24 HORAS	D570	%	
CLARIDAD	D1003	% de transmision	
RESISTENCIA AMBIENTAL	D1435	%	
APROBACION POR LA FDA			si
<b><u>RESISTENCIA</u></b>			
QUIMICA A ACIDO DÉBIL	D561		no es atacado
ÁCIDO FUERTE	D543		minimamente atacado
DISOLVENTES DE BAJO PESO MOLECULAR	D543		minimamente atacado
ALCOHOLES	D543		no es atacado
<b><u>ELÉCTRICAS</u></b>			
RESISTENCIAS DIELECTRICAS	D149	Kv/mm	15.7-23.6
CONSTANTE DIELECTRICA	D150		2.2-3.0
FACTOR DE POTENCIA	D150		0.000005-0.025
<b>OTRAS</b>			
TEMPERATURA DE FUSIÓN	D3418	°C	125
TEMPERATURA DE TRANSICION VÍTREA	D3418	°C	-130

## **Condiciones del procesamiento**

El HDPE sin carga reforzante no es higroscópico y, por lo común no requiere de un secado previo al proceso. El HDPE con carga absorberá pequeñas cantidades de humedad, de manera que puede requerir de un desecado.

Las temperaturas normales de proceso del HDPE varían de 350 a 600°F (177 a 316°C). La estabilidad térmica del HDPE es, por lo general buena en todos los intervalos de temperatura si los tiempos de exposición a las altas temperaturas son relativamente cortos. De otro modo, la resina se puede degradar por entrecruzamiento. Es normal que ocurra un ligero cambio en el índice de fusión durante el procesamiento del HDPE.

Los artículos de HDPE pueden pulverizarse y reciclarse. El HDPE reciclado normalmente se mezcla con HDPE nuevo antes de reusarse, por lo común son proporciones de un 10% o menos del producto remolido, por arriba de los 10%, las propiedades físicas del producto fabricado pueden ser afectadas adversamente. Para mejores resultados, el producto remolido debe protegerse de la contaminación por otros polímeros, la suciedad, el papel, etc.

## **Propiedades que imparten el procesamiento**

La resistencia al impacto, la rigidez y la estabilidad térmica de los artículos de HDPE son profundamente afectados por las condiciones de procesamiento. Por ejemplo, la orientación unidireccional o el sobre empacamiento de un moldeado puede disminuir grandemente la resistencia funcional al impacto. Si se mantienen elevadas temperaturas del proceso y si este tiene un largo periodo de residencia, la estabilidad térmica del artículo terminado puede reducirse grandemente. La rapidez de enfriamiento afectara la rigidez y la resistencia al impacto del articulo; con una rapidez de enfriamiento más lenta, la rigidez se incrementa y disminuye la resistencia al impacto.

## **2.2 Rellenos**

Los rellenos minerales, desde el inicio, han hecho una gran contribución a los polímeros termoplásticos [5]. Estos, en sus inicios, fueron introducidos para extender el volumen del material y con esto reducir costos [6] y aunque después debido a la relativa baja de costos de los polímeros, esta razón empezó a ser menos importante y se empezó a prestar atención científica a las propiedades mecánicas que estas cargas impartían a las matrices poliméricas, por lo que se comenzó a hablar ya de rellenos funcionales, en vista del incrementos

de propiedades mecánicas que estos rellenos ofrecían a la mayoría de los plásticos [5].

Los rellenos minerales son usados prácticamente para todas las aplicaciones comerciales de los polímeros termoplásticos, en términos de volumen, el principal mercado de aplicación son el PVC y las poliolefinas, donde el carbonato de calcio domina el mercado de los rellenos en un 80% del volumen consumido.

### **Efectos de rellenos minerales en polímeros termoplásticos.**

La importancia del uso de los rellenos minerales al crecimiento de las aplicaciones para los polímeros termoplásticos ha sido descrita, la incorporación de estos afecta a la mayoría de las propiedades de la matriz de los polímeros, algunos de estos beneficiándolos, otras veces perjudicándolos. La apreciación de estas propiedades es un tema crítico para la identificación de aquellas características que son importantes en el entendimiento de cómo ciertos tipos de rellenos y métodos de producción han sido dominantes en el mercado de los plásticos.

La necesidad de optimizar los beneficios de los usos de los rellenos sobre las potenciales desventajas es un tema que concierne a la industria envuelta en la producción y uso de estos rellenos. Estas

importantes propiedades son discutidas a continuación las cuales nos ayudan a la buena selección de rellenos como a los métodos de producción que van a ser empleados.

### **Costo**

La necesidad de minimizar los costos de producción fue una de las principales razones para usar estos rellenos en el pasado, siendo en la actualidad menos importante que antes debido a la caída de los precios de los materiales termoplásticos.

Para calcular el efecto de los rellenos sobre los costos cabe recordar que los polímeros son usados para ser procesados y vendidos por volúmenes, mientras que los rellenos y polímeros son comprados por peso. Muchos de los rellenos son considerablemente mas densos que los polímeros (normalmente 2 0 3 veces) y con esto su costo efectivo es considerablemente alto como aparenta ser a primera vista.

La ventaja que presentan los rellenos en el Ecuador en relación a costos es que el relleno sigue siendo considerablemente bajo en relación al polímero siendo con esto muy atractivo el uso de estos para las diferentes aplicaciones.

## **Procesamiento**

Los rellenos minerales están en un mercado influenciado sobre procedimientos de composición usados para procesamiento de termoplásticos.

Los rellenos en general elevan la viscosidad de fundido del polímero, siendo esto un serio problema, especialmente en procesos de extrusión. La medida en la que este efecto ocurre depende de la forma y tamaño de la partícula y de las propiedades de superficie de los rellenos. Estos parámetros son controlados durante el procesamiento de estos rellenos para obtener una baja viscosidad.

## **Encogimiento en el moldeado**

Debido a su naturaleza semicristalina, los termoplásticos presentan un considerable encogimiento al enfriarse desde el punto de fusión, y esto puede causar problemas en el momento del moldeado. La presencia de los rellenos reduce el nivel de encogimiento.

## **Rigidez y temperatura de distorsión de calor**

Uno de las principales limitaciones de los termoplásticos es su baja rigidez, especialmente a elevadas temperaturas (temperatura de distorsión).

Algunos tipos de polímeros son muy buenos para manejar este tipo de propiedades y esta es otra de las principales razones de por qué usar rellenos.

### **Apariencia**

El uso de los rellenos en polímeros termoplásticos usualmente afecta a la apariencia de estos. Esto es generalmente convertido como un beneficio si el relleno produce una buena apariencia blanca o no tiene efecto en el color. Es considerado una desventaja si el relleno produce un color negro ya que hace la composición difícil de pigmentar.

### **Envejecimiento**

Algunos termoplásticos, notablemente el polipropileno, son inestables al calor y a encenderse a menos que los aditivos presenten algún tipo de estabilizador.

Los rellenos minerales pueden producir un efecto de pro-degradante y estabilizador en los polímeros termoplásticos.

### **Características de los Rellenos**

Muchas de las propiedades Físicas y Químicas son importantes en la aplicación de los rellenos en los Termoplásticos. Estos incluyen,

Pureza, Peso específico, Dureza, Propiedades eléctricas, térmicas y ópticas, área de superficie, forma y tamaño de las partículas.

### **Pureza**

La alta pureza no es siempre esencial o no siempre se alcanza en muchas aplicaciones. Muchas impurezas tienen pequeñas o a veces no tienen efectos perjudiciales. Las impurezas tienen algunos efectos perjudiciales tales como:

- Efectos adversos sobre el relleno o sobre el color del compuesto.
- Incremento de la abrasividad.
- Incremento de la absorción de agua y reducción de la propiedades de conductividad eléctrica.

### **Peso Específico**

Los materiales termoplásticos tienen un peso específico de 0,9-1,4. Muchos rellenos minerales tienen un peso específico en los rangos de 2,3-2,8 y con esto podemos ver que el uso de los rellenos tiene un incremento considerable de la gravedad específica al ser mezclado con los polímeros termoplásticos.

## **Dureza**

La dureza de los rellenos es de considerable importancia en los termoplásticos. En general, se requiere rellenos suaves.

La dureza en medida en la escala Mohs, clasificando a los materiales de acuerdo a su dureza, la escala va desde el talco que tiene una dureza de 1 hasta el diamante que tiene una dureza de 10.

## **Propiedades térmicas**

La principal propiedad térmica de importancia en el presente análisis es el calor específico, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión y estabilidad.

- **Calor específico:** Es de principal importancia en el procesamiento determinando la tasa de acuerdo a la composición usada que se calentara o enfriara. El calor específico en la mayoría de los rellenos es de la mitad del de los polímeros, pero cuando se lo mezcla en proporciones indicadas se puede llegar a una diferencia mínima.
- **Conductividad térmica:** Es también de importancia en comportamiento en el momento de ser procesado. La conductividad térmica del relleno es más alta que la del polímero. Este efecto es benefactorio en el procesamiento

como en el moldeo ya que tiene la capacidad de calentarse y enfriarse rápidamente, conduciendo a un ciclo mas corto de procesado.

- **Coeficiente de expansión térmica:** El coeficiente de expansión térmica es considerablemente más bajo en el de los polímeros, y con la inserción de estos puede ayudar de gran manera a reducir uno de los problemas de procesamiento.
- **Estabilidad térmica:** la estabilidad térmica es una característica importante en los rellenos, ya que los polímeros tienen una temperatura de procesabilidad y una de degradación; muy cerca de la temperatura de degradación, un incremento de esta, puede dar paso a la degradación del polímero. La mayoría de los rellenos tienen una estabilidad térmica a mucha más alta temperatura no afectando así al proceso de procesamiento del polímero.

### **Propiedades ópticas**

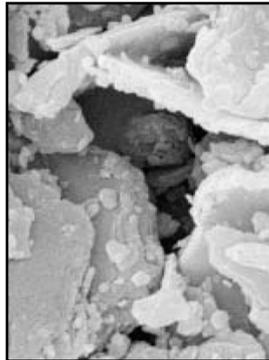
El índice de refractividad es la propiedad óptica más importante y este efecto es determinante en la apariencia del polímero la cual ya describimos en una de las propiedades anteriores.

## Forma y tamaño de las partículas

La forma y tamaño de las partículas tiene una importante consecuencia en la habilidad de llenar el espacio intermolecular. Esta habilidad determina la efectiva fracción del volumen del relleno que se puede incorporar al polímero.

A continuación hablaremos acerca de los principales rellenos utilizados en la industria:

### 2.2.1 Mica



**FIGURA 2.9 MICROESTRUCTURA DE LA MICA**

Mica es el nombre dado a un grupo de minerales de silicio que poseen la siguiente fórmula química:

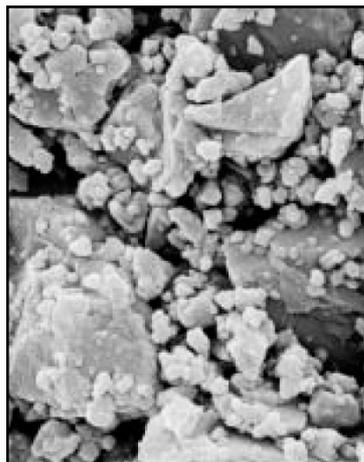


Donde M puede ser AL, Fe o Mg.

El uso de la mica en los polímeros es un resultado de su estructura cristalina. Las micas comerciales tienen varían en su composición química y su dureza Moh que varia de 2-2,5 y poseen un peso específico que se encuentra entre 2,75-2,90.

El principal uso de la mica en los polímeros es como un relleno reforzante.

### **2.2.2 Carbonato de calcio**



**FIGURA 2.10 MICROESTRUCTURA DEL CARBONATO DE CALCIO**

El carbonato de calcio natural, es el principal relleno mas usado para materiales termoplásticos. Los usos principales en gran medida están en el PVC, pero cantidades significativas también se usan en otros polímeros como el polipropileno, polietileno y poliamidas. Una amplia gama de tamaños se usan de acuerdo a la naturaleza de las aplicaciones.

Las razones principales de su uso son la abundancia relativa, bajo costo de producirla relativamente fina y su granulometría.

El carbonato de calcio tiene un numero de modificaciones cristalina, pero la forma de la calcita es el que se utiliza principalmente para los usos de relleno. La calcita pura es un material suave con un peso específico de 2.7

Los depósitos de calcita son muy comunes, pero se diferencian en su origen exacto y ese es el factor principal que determina la característica de este relleno y el método exacto de producción.

El carbonato de calcio como relleno para termoplásticos tiene las siguientes características:

- Alta pureza química
- Alto grado de blancura
- Bajo índice de refractividad, haciendo posible llegar a tonos pasteles y blancos
- Bajo índice de abrasividad, aumentando el tiempo de vida de las partes de la maquina.
- Buena dispersión.
- Aprobado para el uso de materiales en contacto con alimentos, ideal para el uso de recipientes contenedores de

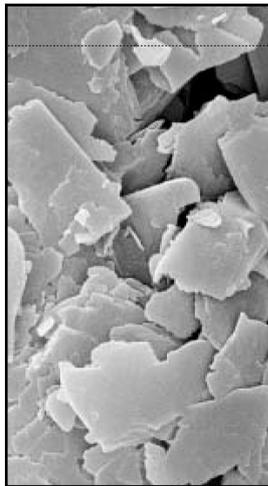
plásticos y fundas debido a su características no tóxicas e inodoras.

- Bajo costo.[7]

Los principales aplicaciones del carbonato de calcio para la industria del plástico son:

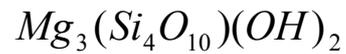
- **PVC rígidos:** para el uso de tuberías, marcos de ventanas,
- **Polipropileno:** para el uso en la elaboración de muebles de jardín, películas.
- **Polietileno:** usado como agente antibloqueante en películas
- **Plastificado de PVC:** como aislante para cables, cobertura de pisos.

### 2.2.3 Talcos



**FIGURA 2.11 MICROESTRUCTURA DE LOS TALCOS**

El talco es una forma cristalina de silicato de magnesio cual en su forma pura tiene la siguiente formula



Los usos de talcos en los polímeros es largamente determinada por su estructura cristalina. [5]

La dureza Moh es 1, y tiene un peso específico de 2,8. El principal uso en materiales termoplásticos es con el polipropileno donde la alta homogeneidad en su tamaño da una significativa reducción al encogimiento en el moldeado, siendo este la principal razón para su uso.

En la practica, para aplicaciones para polímeros solo dos tipos de minerales son de importancia, el talco puro y el chlorite ( es una mezcla de silicato de magnesio y hidróxido con alguna sustitución de hierro y aluminio). Los productos comerciales de talcos tienen una mezcla con distintas proporciones de estos dos.

#### **2.2.4 Arcillas.**

Las arcillas se las usa mezcladas con el polietileno de alta densidad mediante un tratamiento que se obtiene a partir de estas las llamadas Nanoarcillas

##### **Nanoarcillas.**

Las nanoarcillas son arcillas modificadas mediante manipulación controlada a nivel nanométrico, con un diseño específico de su estructura para cada aplicación. [8] [16]

El nombre reconocido científicamente es organoarcilla. La nanoarcilla es un material híbrido (orgánico e inorgánico) donde los cationes orgánicos entre las capas de arcillas como  $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $K^+$ , etc., son reemplazados por cationes orgánicos, lo que conlleva a un incremento entre las capas tetraédricas de silicio promovido por la penetración de modificaciones orgánicas entre las capas.

Las características híbridas de las nanoarcillas las hace compatibles con muchos más materiales orgánicos y las hace repulsivas al agua, lo que permitirá absorber del 40 al 70% de su peso en aceites y bajar la absorción de agua de 700% hasta un 7% de su peso.

## **Ventajas**

Las nanoarcillas aparte de reducir costos de a los polímeros propiedades especiales tales como:

- Incremento del modulo de young
- Incremento del esfuerzo de tensión
- Incremento de las propiedades de barrera a humedad, Solventes, Vapores químicos, gases y sabores

### **2.3 Masterbatch en Termoplásticos.**

Los masterbatches en termoplásticos haciendo analogía con los fármacos son capsulas que contienen grandes concentraciones de diferentes sustancias así como antibloqueantes, estabilizadores, cargas, pigmentos, etc.

La aplicación de un masterbatch durante el procesamiento de los polímeros es una de las maneras más fáciles de dosificar diferentes tipos de aditivos y pigmentos a los materiales plásticos

En el caso de los pigmentos es la manera mas conveniente de aplicarlos a la resina termoplástica ya que con este tenemos un proceso mas limpio, permite un cambio rápido de color ya que no se tiene la necesidad de mezclar pigmentos líquidos.

Existen diferentes tipos de masterbatch de acuerdo a las necesidades de las diferentes empresas, uno de estos tipos, los masterbatch de carga, es el que se usara en este trabajo, ya que nos proporciona una mayor exactitud de las proporciones necesitadas para el desarrollo de este trabajo.

#### **2.4 Compuestos de polietileno.**

Los compuestos de polietileno son las mezclas hechas entre diferentes tipos de polietileno y/o cargas y aditivos que se realizan para obtener las mejores propiedades de los materiales puros.

A los compuestos en los cuales se mezclan 2 tipos de polietilenos se les denomina compuestos binarios y a los que realizan con 3 tipos de polietileno se les denomina compuestos ternarios.

La mezcla que se realiza entre los polietilenos, aditivos, cargas y pigmentos, depende de las aplicaciones para las cuales se esta diseñando el articulo plástico en particular y de los procesos de fabricación usados.

#### **2.6 Aplicaciones**

Dentro de las aplicaciones podemos destacar las más importantes, las cuales radican en la transmisión de vapor de agua. Debido a

que los polietilenos se funden a una temperatura de 190 °C y el carbonato de calcio se funde a una temperatura de 600 °C en el momento del mezclado los compuestos que se funden son los polietilenos quedando el carbonato suspendidos alrededor de la matriz polimérica. En el momento de realizarse una aplicación de películas, una vez enfriada esta luego de su procesamiento, se le aplica una precarga que es una pequeña deformación plástica que se le realiza a la película con el objetivo de que la frontera entre la partícula de carbonato de calcio y la matriz se originen pequeños orificios los cuales que permitan el paso de vapor de agua. A este tipo de películas se les denomina Respirables (Breathable) [13]. Esta creación de micro-orificios, ocasionan la salida fácil del vapor de agua.

Esta aplicación es usada en muchos productos en los cuales se necesita un desfogue de vapor de agua. Entre estos productos tenemos, las películas de polietileno usadas en los panales, las cuales permiten una salida de vapor proporcionando comodidad a los niños.

Otra de las aplicaciones debido a este fenómeno esta en los suplementos médicos, ya sean batas, cobertores de pies, etc. Así

también en el caso de la industria alimenticia donde se le brinda facilidad de que esta funda permita la salida de vapor de agua; un ejemplo de esto son las fundas para almacenar pan, ya que estas necesitan una salida de vapor de agua evitando que la funda sude y a la vez no permitiendo que ingrese aire que deteriore el producto, aprovechando el buen desenvolvimiento de estos materiales a temperaturas elevadas.

Aprovechando las mejoras de ciertas propiedades mecánicas, también se las usa para fundas para compras, carpetas plásticas, entre otras.

# CAPITULO 3

## 3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS PE-CaCO<sub>3</sub>

### 3.1 Preparación de las probetas.

Para preparar las probetas, se usó una extrusora de tornillo simple Construzioni, con un dado para fabricación de tubería de termoplásticos, con una relación de  $L/D=24$  (se reconstruyó a  $L/D=26$ ), donada por la compañía Amanco – Plastigama. Dicha extrusora fue adaptada para transformarla en una máquina para fabricación de compuestos de poliolefinas con rellenos varios y nanocompuestos.



**FIGURA 3.1 EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE**

Dado que el diseño mecánico de componentes en extrusoras está ampliamente estudiado [9], el rediseño de esta extrusora se basó en tres variables claves para obtener con eficacia un compuesto: la operación de dispersión y distribución del relleno en la mezcla dentro de la máquina (diseño del tornillo), y el rediseño del dado de la extrusora.

### **Sistema Tornillo – cañón**

El término mezclado en extrusión se refiere a todas las operaciones que tienen tendencia a aumentar la uniformidad en los gradientes de concentración, temperatura, tamaño de la fase dispersa u otras propiedades de los materiales [10].

Generalmente, se divide este proceso de mezclado en dos partes:

### Mezcladores dispersivos

Estos mezcladores se encargan de dar uniformidad al tamaño de las partículas, rompen los aglomerados y los dispersan en la mezcla. Se incorporan al diseño del nuevo tornillo un mezclador tipo Maddox (figura 3.2 B) y tres mezcladores tipo anillo (figura 3.2<sup>a</sup>) para cumplir los siguientes objetivos:

#### 4. TIPO ANILLO



#### B) TIPO MADDOX O LE ROY



**FIGURA 3.2 MEZCLADORES DISPERSIVOS**

El plástico fundido debe ser sometido a altos esfuerzos, minimizando los cortantes y maximizando los de elongación[11]

- Los elementos del flujo deben pasar por las regiones de esfuerzo varias veces para incrementar la acción de mezclado.

### **Mezcladores Distributivos**

Este tipo de mezcladores se encargan de dar uniformidad a la distancia entre partículas, es decir, repartir las partículas de relleno a través de toda la mezcla.

Se incorporo un mezclador tipo romboide al final del tornillo para cumplir con los siguientes objetivos:



**FIGURA 3.3 MEZCLADOR DISTRIBUTIVO  
TIPO ROMBOIDE**

- El plástico fundido debe ser sometido a un gran esfuerzo cortante.
- El flujo debe ser partido y reorientado constantemente.



**FIGURA 3.4 TORNILLO EXTRUSOR**

### **Materiales utilizados**

Los materiales utilizados para preparar las probetas es Polietilenos de alta densidad (HDPE) virgen LG – Lutene FE0070 el cual tiene las siguientes características

**TABLA 10**

**PROPIEDADES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD LG**

ITEM	TEST METHOD	UNIT	VALUE
Melt Index 190/2.16	ASTM D1238	g/10min	0.05
Density (23 °C)	ASTM D1505	g/cm <sup>3</sup>	0.953
Melting Point	DSC	°C	133
Vicat Softening Point	ASTM D1525	°C	128

Con una temperatura de procesamiento en los rangos de 180-230°C

El carbonato de calcio es utilizado es un masterbatch de origen japonés comercializado por la empresa Nutec

**Procedimiento experimental**

Se ha dispuesto realizar 4 mezclas con porcentajes del 10, 15, 25 y 40 % de Carbonato de Calcio.(TABLA 11)

**TABLA 11**

**PORCENTAJE DE MEZCLAS DE HDPE CON CaCO<sub>3</sub>**

<b>MEZCLA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>% HDPE</b>	87,5	81,25	68,75	50
<b>%Masterbatch</b>	12,5	18,75	31,25	50
<b>%CaCO<sub>3</sub></b>	10	15	25	40
<b>%LLDPE</b>	2,5	3,75	6,25	10

Cada mezcla se realizará en sus diferentes porcentajes teniendo el peso total de la muestra como una constante que será de 500gr.

Una vez pesados los porcentajes de los componentes estos se los mezcla manualmente para tener un producto homogéneo antes de ser introducido a la extrusora FIMCP-ESPOL, la cual se encuentra configurada con temperaturas de 175°C Para la zona de alimentación, 185°C para la zona de plastificación y de 190°C para la zona de dosificación, La extrusora realizará un mezclado dispersivo y distributivo en estado fundido y el resultado de este compuesto homogéneo obtenido de la extrusión será moldeado por compresión por una prensa hidráulica modificada para termoformar, a una temperatura de 150°C y 10 MPa de presión, placas de 200mm X 70mm X 3mm según el procedimiento indicado en la norma ASTM-D1928.

Esta norma nos dice también que las placas de polietileno deben de ser moldeadas colocando una placa de aluminio de un espesor

de 0.05 a 0.2 mm la cual debe limpiar con acetona la superficie y ser limpiada con papel absorbente. Se refiere también que la placa tiene que tener un exceso de su peso de un 2 a un 10% adicional debido a la rebaba que se va a generar cuando una vez moldeada se genere debido a que el material va a fluir y que para polietileno se debe de usar densidades de polietileno de 0.92. g/cm<sup>3</sup>

Una vez moldeada la placa se deja enfriar en la prensa hasta temperatura ambiente para obtener un tiempo largo de enfriamiento que evite la cristalización del material.

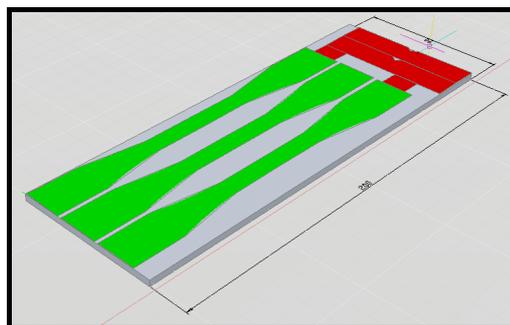
Con estas placas obtenidas, se fabricarán las probetas para los diferentes ensayos mecánicos mediante el uso de un troquel marca RAY-RAN.



**FIGURA 3.5 TROQUEL MARCA RAY-RAN**

Se realizaron tres placas por mezcla, y de cada placa se obtendrán 3 probetas para el ensayo de tensión, 2 probetas para ensayo de impacto. 2 probetas para ensayo de temperatura de ablandamiento y para los ensayos de absorción de agua cuyas medidas se detallaran mas adelante en este capitulo.

Todas las placas de donde se sacan las probetas de los diferentes ensayos se las prepararon bajo una velocidad del tornillo predefinida y constate de 20 RPM



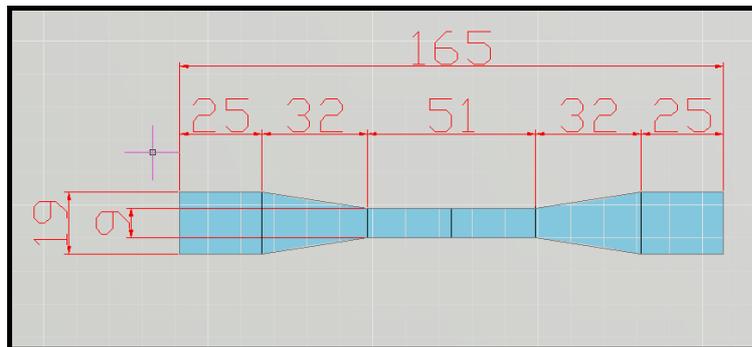
**FIGURA 3.6 DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS EN PLACAS**

### 3.2 Ensayo de Tensión Mecánica

Este ensayo determina las propiedades de tensiles para materiales reforzados y sin reforzar. Se utilizó el procedimiento especificado en la norma ASTM-D638, la cual tomamos como referencia para su realización.

Con este ensayo esperamos obtener el esfuerzo máximo o de fluencia, el esfuerzo de rotura y la elongación máxima de cada mezcla.

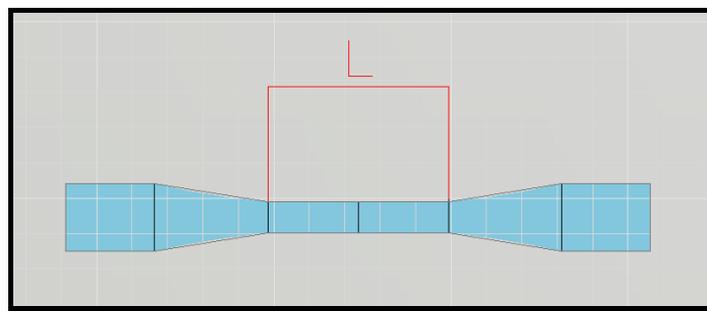
Para realizar este tipo de pruebas para materiales reforzados se debe de utilizar el tipo de probeta I, cuyas dimensiones las detallamos en el grafico siguiente.



**FIGURA 3.7 MEDIDAS DE PROBETAS DE TENSION TIPO 1 SEGÚN ASTM-D638**

Teniendo un espesor de  $3.2 \pm 0.4$  mm

Para una mejor aproximación de los datos a obtener la norma nos exige un numero de ensayos mínimo de 5 por mezcla, para obtener una confiabilidad del 95%, por lo que se decidió realizar 8 ensayos descartando aquellas probetas que se rompan a fuera de la longitud L. (Figura 3.8)



**FIGURA 3.8 DISTANCIA L DE LA PROBETA DE TENSION**

Los ensayos se realizaron a una velocidad de deformación de  $50 \pm 25\%$  mm/seg. Y con una temperatura ambiente de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ , las cuales son apropiadas para probetas tipo I, en una máquina universal Lloyd Instruments modelo LR 10K

### **Formulas para obtener datos**

Para calcular el esfuerzo máximo de tensión o esfuerzo de fluencia dividimos la fuerza máxima aplicada para el área transversal de cada probeta.

El esfuerzo de rotura se lo obtuvo dividiendo la fuerza rotura del material para el área transversal de cada probeta

Para el cálculo de la elongación máxima se divide la elongación en el punto de rotura para la elongación inicial.

Se debe calcular para cada mezcla la media de los 8 datos obtenidos para obtener el resultado promedio

### **3.3 Ensayo de Impacto**

En los ensayos de tensión medimos como el material se comporta al absorber energía lentamente, pero en circunstancias reales, los materiales también se someten a fuerzas de impacto para lo cual necesitamos medir cuan rápido el material absorbe fuerzas este tipo de fuerzas

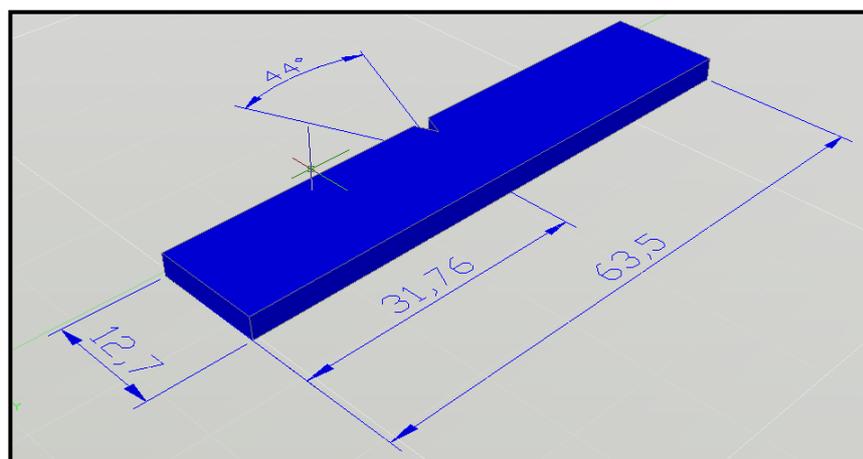
Con este ensayo estandarizado se trata de medir el comportamiento de este material con golpes, colisiones y caídas.

Para realizar este ensayo nos regimos con la norma ASTM D256-06<sup>a</sup>, que nos proporciona 4 métodos diferentes los cuales miden diferentes rangos de energía de impacto, el que debemos usar depende de el tipo de material a ser ensayado.

El método usado para este ensayo es el Método A, de acuerdo a la norma que nos indica que este método se usa para materiales que poseen una fuerza de impacto mayor a 27 J/m.

Estas pruebas se realizaron en una maquina Izod marca Tinius Olsen que fue facilitada por ASEPLAS, la cual consta de un brazo que posee un peso determinado y que tiene un movimiento de péndulo que impacta sobre la probeta con una velocidad tal que mida la cantidad de energía absorbida por el mismo. Posee un panel electrónico donde se ingresa el espesor de cada probeta y esta arroja los resultados de la prueba.

Para realizar este tipo de pruebas la norma nos dice que las probetas deben tener las dimensiones que detallamos en el grafico siguiente:



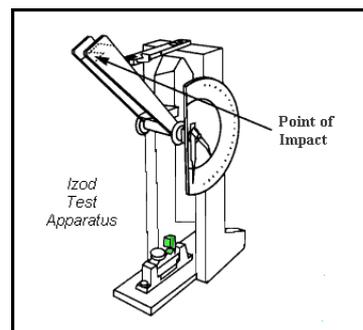
**FIGURA3.9 MEDIDAS DE PROBETA DE IMPACTO**

Todas las medidas presentadas en el grafico están en milímetros y el espesor debe tener un rango entre 3 mm y 12,7 mm.

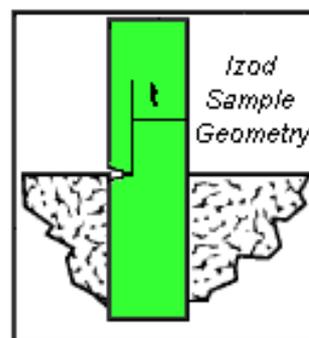
Dentro de las precauciones que se debe tener para realizar esta prueba esta en que las dimensiones estén de acuerdo a la norma, las superficies laterales (63,5mmxespesor) deber estar paralelas, completamente planas y lisas, se debe realizar una inspección visual antes de realizar el ensayo.

La posición de la probeta esta detallada en el grafico a continuación:

#### 4. Equipo Izod para Impacto



#### B) Posición de Probeta En Equipo Izod



**FIGURA 3.10 EQUIPO IZOD Y UBICACIÓN DE PROBETA DE IMPACTO**

La norma nos aconseja realizar 5 ensayos de cada muestra hecha con la misma maquina, en el mismo laboratorio con las mismas condiciones para obtener una confiabilidad del 95%.

### **3.4 Ensayo temperatura de ablandamiento (VICAT)**

Este método determina la temperatura denominada VICAT, la cual es la temperatura mínima a la cual el material empieza a sufrir cambios en su estructura. Esta prueba fue realizada teniendo como referente la norma ASTM D1525

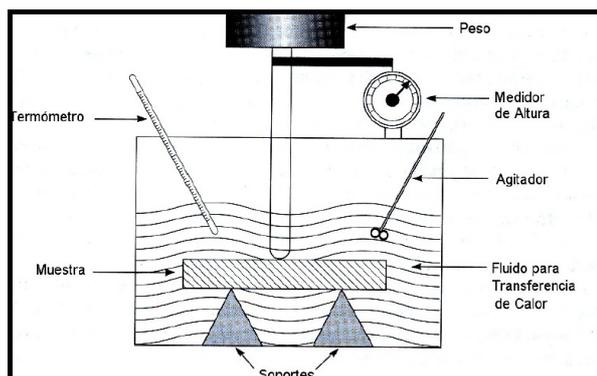
Este ensayo principalmente se basa en subir gradualmente la temperatura del material hasta que un dispositivo de  $1\text{mm}^2$  de área el cual presiona el material con un peso de  $1000, \pm 40, 0\text{ g}$ , penetre la superficie a una profundidad de 1 mm de su espesor



**FIGURA 3.11 EQUIPO UTILIZADO PARA ENSAYO DE TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO VICAT**

Este Ensayo se lo realizó con una maquina marca TINIUS OLSEN modelo HD94 que posee dos celdas para realizar estos tipos de ensayos la cual nos facilito la ASEPLAS y que comprende de los siguientes componentes:

- Baño de inmersión, es un baño de glicerina que es un liquido de transferencia de calor, con un termómetro, un agitador y unos calentadores los cuales nos permitan una tasa de elevación constante de temperatura.
- Este liquido de transferencia de calor, debe tener una elevación moderada de temperatura y se prefiere líquidos de viscosidades bajas a temperatura ambiente.
- El dispositivo de penetración debe de tener un coeficiente de expansión no mayor de 0,02 mm.



**FIGURA 3.12 UBICACIÓN DE LA PROBETA VICAT EN EQUIPO**

La forma de las probetas, según la norma especificada, tiene que ser cuadrada con un área de  $144 \text{ mm}^2$  y un espesor de 3 mm.

## **Procedimiento**

La prueba se inicia a la temperatura del lugar donde se realiza la prueba la cual fue de 23°C

Con la tasa de elevación de temperatura es de  $120 \pm 12$  °C/h se debe controlar el termómetro cada 5 min. Y la temperatura deber elevarse  $10 \pm 1$  °C.

Una vez que este dispositivo penetra el material se toma la temperatura.

La norma nos indica que tomando dos muestras de cada placa y siguiendo todas las indicaciones mencionadas continuación el ensayo tendrá aproximadamente un 95% de confiabilidad.

### **3.5 Ensayo de absorción de agua**

Este método mide una relativa taza de absorción de agua cuando el material se encuentra sumergido.

Esta prueba es importante en los casos en los que la relación entre humedad y las propiedades eléctricas y mecánicas son determinantes para obtener una uniformidad del material.

Para realizar este ensayo nos apegamos a la norma ASTM D 570-98 el cual nos indica que para la realización de este ensayo necesitamos de un recipiente de agua, condiciones de temperaturas constantes y de una balanza marca Sartorius con una capacidad de lectura de 0.0001 g

Las probetas para materiales que son moldeados deben ser en forma de discos con un diámetro de 50,8 mm. Y con un espesor de 3.2 mm.

Estas probetas deben estar libres de rasgaduras, es decir tienen que ser moldeadas para que estén completamente lisas.

El ensayo consiste en sumergir las probetas pesadas previamente en agua destilada por un tiempo que depende del tipo de material que va desde 2 horas, hasta 24 horas.

Para el polietileno se recomienda que debe de tener un tiempo de 24 horas con una tolerancia de +30 min.

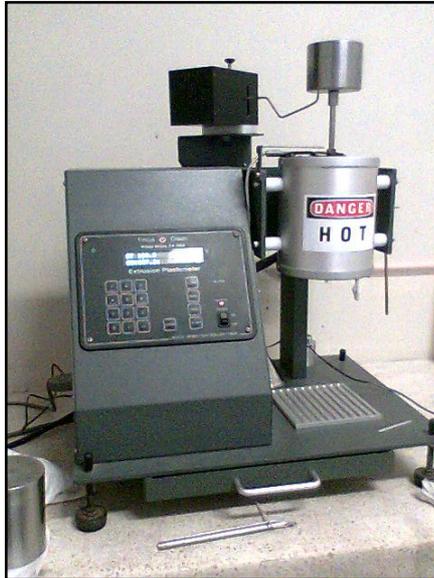
Después de ser sumergida por ese tiempo se extrae, se la limpia con una toalla limpia y debe ser pesada nuevamente para poder sacar el porcentaje de peso a adquirido.

### **3.6 Ensayo índice de Fluidéz (MFI)**

La prueba de índice de fluidéz es un método para una rápida determinación de las propiedades de fluidéz de las masas de termoplásticos. La norma que tomamos como referencia es la ASTM D1238-90b.

El índice de fluidéz no es más que la masa en gramos de un fundido de plástico que se hace pasar a través de una boquilla normalizada durante 10 min. Con una fuerza del pistón y temperatura determinadas.

El equipo utilizado para realizar este ensayo es un melt plastometer marca Tinius Olsen modelo MP993 el cual nos fue facilitado por ASEPLAS. Este aparato de ensayo está formado por un cilindro vertical, que se calienta a una temperatura constante y que tiene una boquilla en su parte interior. La masa a ensayar (3.5 gr.) se introduce en el cilindro, un pistón de peso determinado presiona la masa a través de la boquilla.



**FIGURA 3.13 EQUIPO UTILIZADO PARA ENSAYO DE INDICE DE FLUIDEZ**

El material al ser calentado empieza a fluir por el orificio; el primer material saliente se descarta. Si la masa no tiene burbujas, se cortan con una espátula o cuchilla trozos a espacios de tiempo constante y se pesan. Este es el método apropiado para poliolefinas.

Los resultados de las mediciones, para una misma serie de materiales permiten sacar conclusiones sobre el peso molecular medio. Un índice de fluidez alto nos indica que la capacidad de fluir del material es mayor y un bajo grado de polimerización.

El peso que utiliza el pistón para presionar el material depende del tipo de material a usarse, para el polietileno se pueden usar pesos de 2,16 y de 10 Kg. Para este ensayo usamos un peso de 2,16 Kg.

Para este ensayo se requiere cortar el material en pequeños pedazos como unas lentejas las cuales tienen que sumar un peso de 3.5 gr.

Para el cálculo de el índice de fluidez se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{índice de fluidez} = \frac{(427 \times L \times d)}{t}$$

Donde:

L=longitud que tiene que recorrer el pistón.

D= densidad de la resina a la temperatura del test g/cm<sup>3</sup>

t= tiempo en que tarda el pistón en recorrer la distancia L

427= área estandarizada del pistón y cilindro x 600

### 3.7 Ensayo de determinación de densidad

Este ensayo nos permite determinar la densidad de un sólido y está basado en observar el nivel en que se sumerge la muestra de determinada proporción en una columna de fluido en comparación de estándares de densidades.

Para esta prueba nos regimos con la norma ASTM D1505 la cual nos da las recomendaciones necesarias para poder obtener el mayor grado de confiabilidad a este ensayo.

Los instrumentos usados para este ensayo son:

- Dos líquidos, el líquido "a" menos denso que el líquido "b", para esta prueba se utilizó como líquido "a" alcohol industrial que posee una densidad de  $0,82 \text{ g/cm}^3$  y nitrato de calcio como líquido "b" el cual posee una densidad de  $1,65 \text{ gr/cm}^3$
- Tubo de ensayo que tenga una medida de la altura.

El material a ser ensayado debe tener una forma cualquiera siendo cortado de tal manera que sea fácil de ser medido.

La preparación de la solución en el que va a ser sumergida la muestra consiste en mezclar el líquido a y el líquido b obteniendo

una solución entre 400 y 600 ml. Se deben mezclar estos dos fluidos de manera que cuando se introduzca una probeta se sumerja muy suave hasta el fondo. Una vez obtenido el fluido para el ensayo se debe calibrarlo vertiendo el equivalente a 0,0001 g/cm<sup>3</sup> de cada fluido de manera que el material emerja, se estabilice manera muy suave hasta que la probeta se mantenga suspendida en la solución.

La norma nos dice que debemos realizar esta prueba con 3 muestras de cada proporción.

Antes de ser introducidas estas muestras deben ser primero remojadas en el líquido más denso e introducirlas suavemente y esperar hasta que la muestra se estabilice.

Para calcular la densidad de cada muestra se debe aplicar la siguiente formula que se la obtiene por interpolación.

$$\text{Densidad a } x = a + [(x-y)(b-a)/(z-y)]$$

Donde:

“a” y “b” = densidades de los dos fluidos utilizados

“y” y “z” = distancias de el fondo y de la superficie de el tubo con respecto a un punto arbitrario

$X$ = distancia a la que esta sumergida la muestra con respecto a el mismo punto arbitrario punto.

# CAPITULO 4

## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la discusión de los resultados obtenidos se comenzará por presentar los datos de cada uno de los ensayos realizados haciendo un análisis de cada uno de ellos para luego obtener una visión general de todas las propiedades analizadas independientemente.

Se realizaron 4 mezclas con diferentes Porcentajes de Carbonato de calcio, se utilizó un masterbatch compuesto de un 20% de LLDPE con un 80% de Carbonato de calcio.

La proporción final del compuesto es la que se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA 11**

**PORCENTAJE DE MEZCLAS DE HDPE CON CaCO<sub>3</sub>**

<b>MEZCLA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>% HDPE</b>	87,5	81,25	68,75	50
<b>%Masterbatch</b>	12,5	18,75	31,25	50
<b>%CaCO<sub>3</sub></b>	10	15	25	40
<b>%LLDPE</b>	2,5	3,75	6,25	10

Se puede notar en la tabla que con el aumento del porcentaje del CaCO<sub>3</sub> aumenta el porcentaje de LLDPE, esto sucede debido a la utilización de la composición del masterbatch. El presente trabajo se concentrara esencialmente en el efecto del carbonato de calcio sobre las propiedades de compuestos de polietileno reforzado con particulas de CaCO<sub>3</sub>.

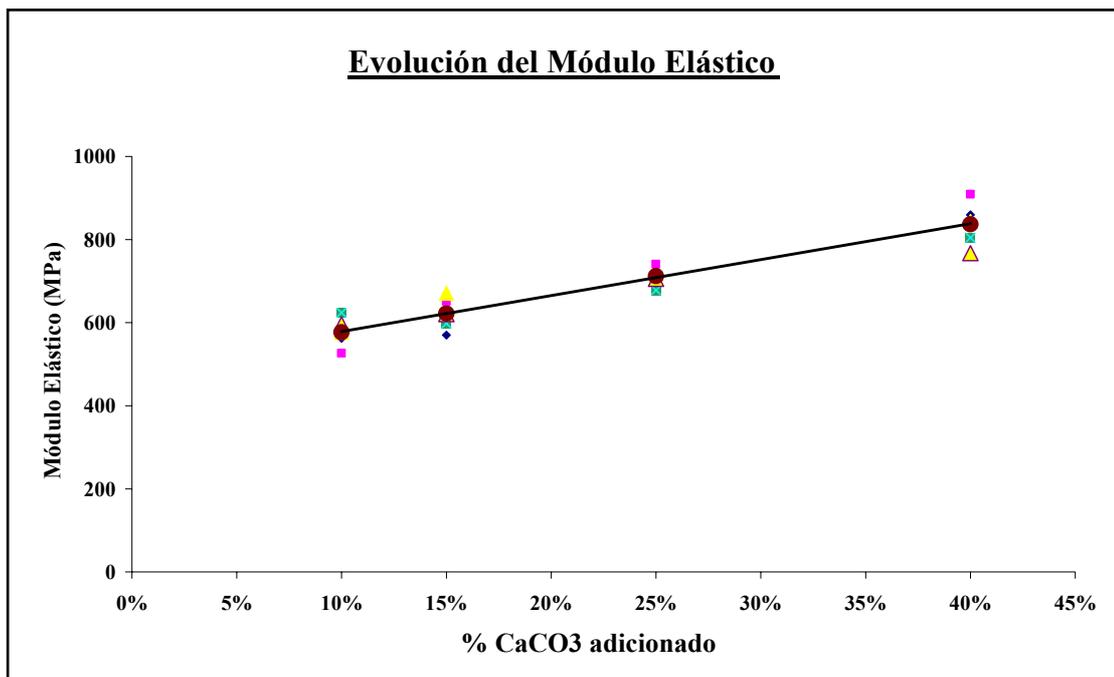
**Ensayo de Tensión Mecánica**

En el ensayo de tensión mecánica, realizado según la norma ASTM-D638, obtuvimos los siguientes datos:

**TABLA 12**

**MODULOS ELASTICOS OBTENIDOS**

<b>Resultados de la variación del Módulos Elásticos</b>						
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 4</b>	<b>Ensayo 5</b>	<b>Media</b>
10%	562,2	526,46	576,64	623,71	595,82	576,966
15%	569,88	651,46	670,73	597,81	620,6	622,096
25%	726,4	741,05	706,67	678,31	705,39	711,564
40%	859,47	908,9	844,24	804,28	767,2	836,818



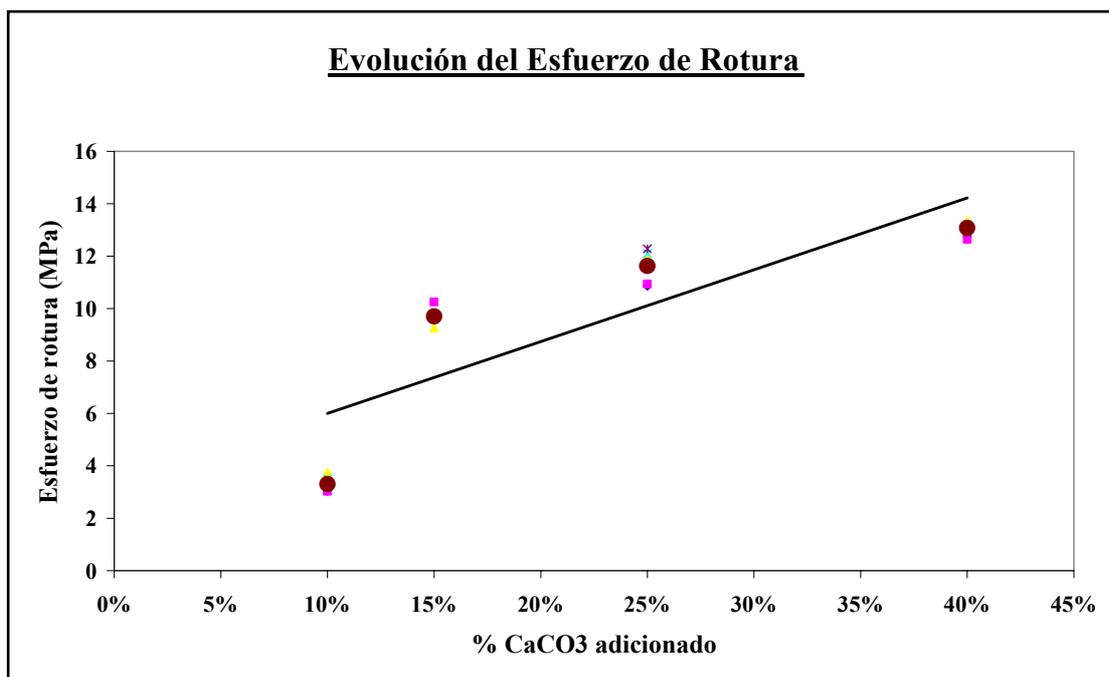
**FIGURA 4.1 EVOLUCION DEL MODULO ELASTICO EN RELACION AL CARBONATO DE CALCIO**

En la figura 4.1 se puede apreciar existe un incremento del modulo elástico o módulo de Young a medida que se incrementa el porcentaje de carbonato de calcio. De la misma manera en la Figura 4.2 podemos apreciar un crecimiento del esfuerzo de rotura con la misma tendencia. Estos incrementos del modulo elástico y esfuerzo de rotura surgen debido a que el carbonato de calcio es un material particulado propiedades de rigidez mucho mejores que las matrices termoplasticas, por lo que al ser dispersado dentro de la matriz polimérica este restringe la elongación de la matriz provocando un decrecimiento de la elongación y por consiguiente aumentando el modulo de elasticidad y el esfuerzo a la rotura, como una consecuencia del aumento de la rigidez ante las cargas aplicadas. [14]

**TABLA 13**

**ESFUERZOS DE ROTURA OBTENIDOS**

<b>Resultados de la variación Esfuerzos de Rotura</b>						
<b>CaCO3 (%)</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>	<b>Ensayo 4</b>	<b>Ensayo 5</b>	<b>Media</b>
10%	3,04	3,03	3,76	3,5	3,19	3,304
15%	9,79	10,25	9,27	9,58	9,64	9,706
25%	10,86	10,93	11,95	12,1	12,28	11,624
40%	13,26	12,64	13,36	13,21	12,91	13,076



**FIGURA 4.2 ESFUERZOS DE ROTURA VS PORCENTAJE CaCo3**

Es crucial en el análisis de estos resultados, mencionar que la clave para poder obtener una mejora de las propiedades mencionadas anteriormente adicionando rellenos de carga a grandes proporciones, radica en una correcta distribución y dispersión del carbonato de calcio, ya que si se realiza mal este proceso de uniformización de la concentraciones de la cargas minerales dentro de la matriz polimérica, el carbonato tendera a aglomerarse en ciertos puntos que actuaran como concentradores de esfuerzos en el momento en que se aplican cargas mecánicas a los compuestos, es decir, se producirán puntos débiles por donde se propagara rápidamente la falla de estos materiales.

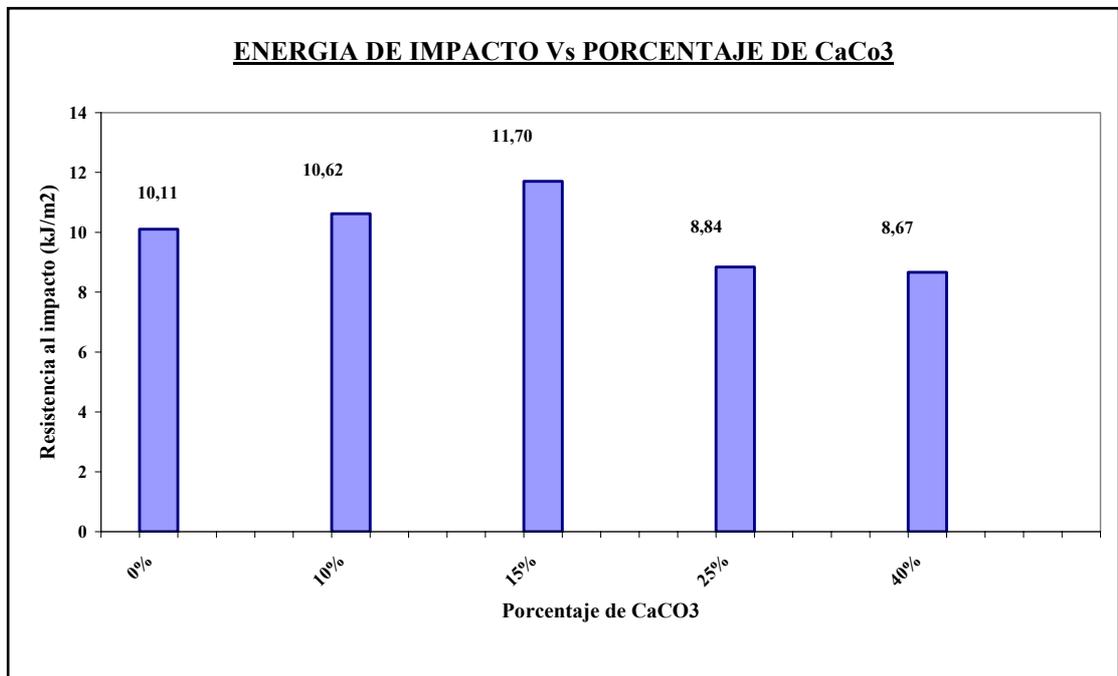
## Ensayo de Impacto

Con los ensayos de impacto obtuvimos los siguientes resultados:

**TABLA 14**

### RESISTENCIA AL IMPACTO OBTENIDA

MEZCLA (%)	Espesor (mm)	Energía de rotura (J)	Energía de impacto(J/m)	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
0%	4,7	0,332	110,25	10,11
	4,7	0,469	110,1	
	4,1	0,446	108,7	
	4,5	0,406	102,3	
	4,4	0,504	114,5	
10%	6	0,397	122,81	10,62
	7,1	0,087	98,8	
	5,9	0,115	112,24	
	6,1	0,152	122,56	
	5,3	0,621	117,17	
15%	3,6	0,477	132,4	11,70
	3,7	0,501	145,2	
	3,6	0,465	129,3	
	4,4	0,477	108,5	
	4,1	0,448	116,5	
25%	6,6	0,433	75,62	8,84
	5,2	0,503	106,64	
	6,8	0,485	91,36	
	6,3	0,471	103,8	
	4,9	0,489	99,81	
40%	5,1	0,417	87,56	8,67
	5,1	0,338	62,25	
	4,3	0,1472	96,68	
	3,9	0,501	92,86	
	3,6	0,499	128,6	



**FIGURA 4.3 RESISTENCIA AL IMPACTO VS PROPORCION CaCo3**

En los resultados obtenidos se puede observar que en pequeñas proporciones que van hasta un 15% la energía de impacto por unidad de área aumenta y después de este 15 % la energía empieza a decrecer.

La causa del incremento inicial en esta propiedad mecánica se debe a la adición de carbonato de calcio, el cual es un material rígido y en pequeños porcentajes entrega lo mejor de las propiedades del relleno, ya que a nivel micro la generación de puntos concentradores de esfuerzos es mínima, lo cual implica que aumenta la propiedad de impacto por unidad de área; sin embargo, cuando la proporción

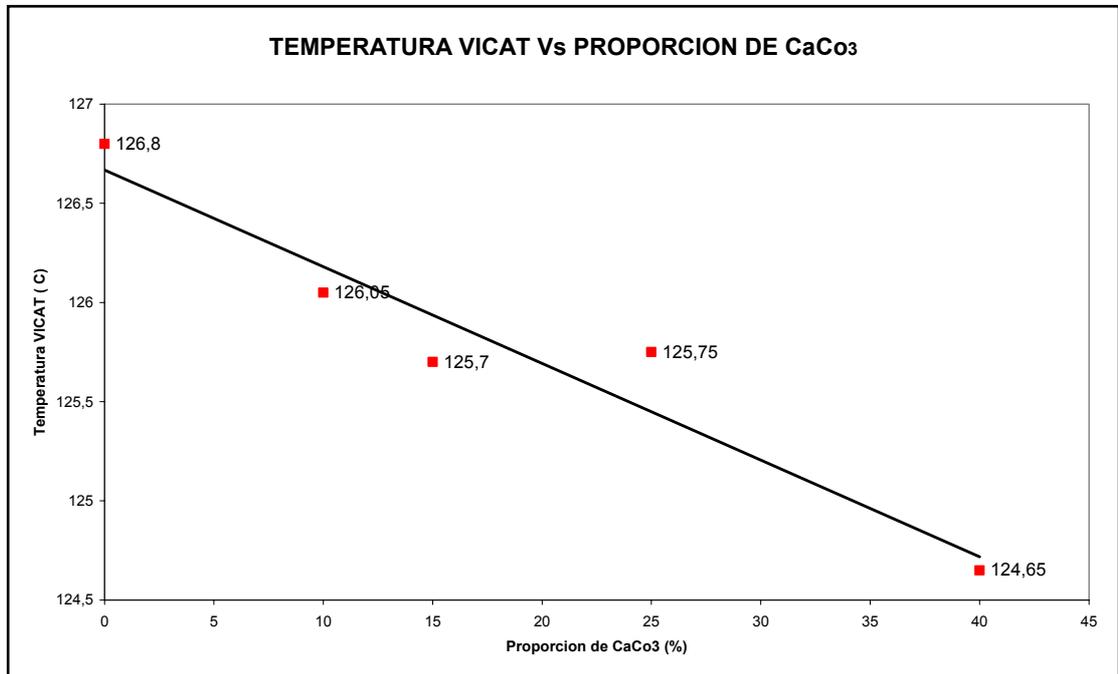
aumenta sobre el 15 %, a pesar de que a nivel macro las propiedades tensiles aumentan debido al aumento de rigidez del compuesto, se cree que las propiedades de impacto comienzan a decrecer debido a que nivel micro se comienzan a generar concentradores de esfuerzos debido a ínfimos aglomeramientos dentro de los compuestos, por lo que las grietas se propagan inmediatamente a través de estos puntos débiles impidiendo el relajamiento del material, y por consiguiente produciendo la rápida falla del material por fractura, originando una caída de la energía de impacto.[15]

### Ensayo de Temperatura de Ablandamiento (VICAT)

**TABLA 15**

#### TEMPERATURA VICAT OBTENIDA

Proporción de CaCO <sub>3</sub>	Numero de muestra	Espesor	Temperatura VICAT	Promedio VICAT
%		mm.	°C.	°C.
0	1	3,2	127	126,8
	2	3,1	126,6	
10	1	3,1	126,1	126,05
	2	3,09	126	
15	1	3,8	125,6	125,7
	2	3,4	125,8	
25	1	3,6	125,6	125,75
	2	3,6	125,9	
40	1	3,2	124,6	124,65
	2	3,15	124,7	



**FIGURA 4.4 TEMPERATURA VICAT VS PORPORCION CaCo3**

En los resultados de estas pruebas, es apreciable un decrecimiento de la temperatura de ablandamiento VICAT. Y esto es claramente entendible ya que la diferencia de la conductividad térmica es considerable ya que mientras que los polietilenos tienen un coeficiente de conductividad térmica entre 0,45 – 0,55 W/m K el coeficiente de conductividad térmica del carbonato de calcio esta en el orden de 125 W/m K. Con el aumento de la proporción de carbonato de calcio tenemos un aumento en la tasa de transferencia de calor en los puntos donde se encuentra el carbonato, y con esto la matriz de polietileno tiende a llegar a un ablandamiento mas rápido debido a la

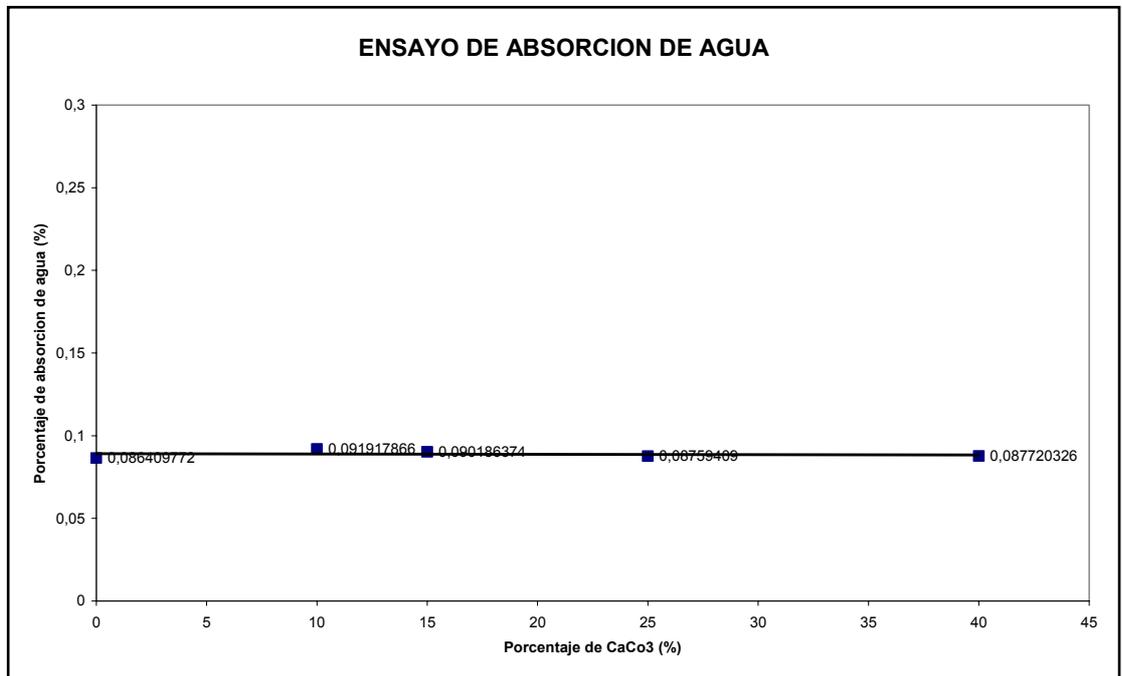
conducción de calor desde las partículas de carbonato, permitiendo mas fácilmente el ingreso del punzón al material, produciendo el efecto de reducción de la temperatura de ablandamiento.

### Ensayo de absorción de agua

**TABLA 16**

**DATOS DE ABSORCION DE AGUA OBTENIDOS**

Proporción de CaCO <sub>3</sub>	Numero de muestra	Peso antes del ensayo	Peso después del ensayo	Porcentaje de absorción de agua	Promedio de absorción de agua
%		gr.	gr.	%	%
0	1	5,1518	5,1559	0,0796	0,086409772
	2	5,2644	5,2689	0,0855	
	3	5,0974	5,1022	0,0942	
10	1	5,9650	5,9706	0,0939	0,091917866
	2	6,0971	6,1023	0,0853	
	3	6,0050	6,0108	0,0966	
15	1	6,7634	6,7686	0,0769	0,090186374
	2	6,4635	6,4698	0,0975	
	3	6,8604	6,867	0,0962	
25	1	7,3650	7,3713	0,0855	0,08759409
	2	7,2832	7,289	0,0796	
	3	7,1716	7,1786	0,0976	
40	1	8,4228	8,4303	0,0890	0,087720326
	2	8,3615	8,3697	0,0981	
	3	8,1527	8,1589	0,0760	

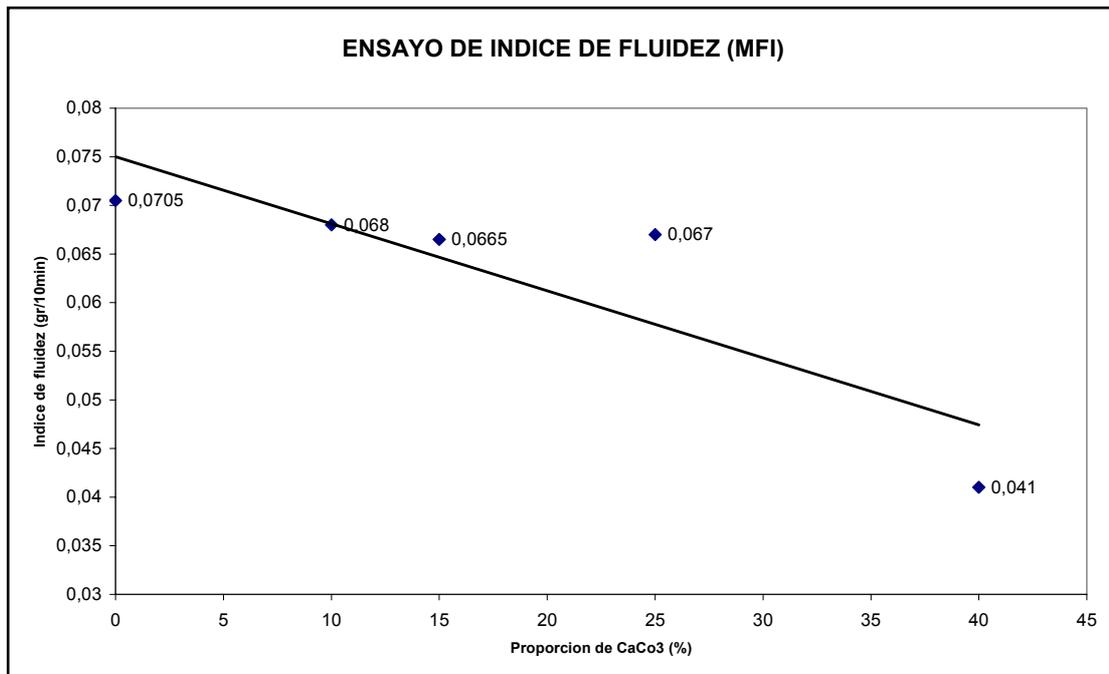


**FIGURA 4.5 PORCENTAJE ABSORCION DE AGUA VS PORCENTAJE DE CaCO3**

Con los resultados siguientes vemos que la proporción de absorción de agua es insignificante y que varían de entre un 0,086 % a un 0,0919% y podemos decir que la absorción de agua es 0.

Esto es dado a que tanto como el polietileno como el carbonato de calcio no tienen afinidad por el agua. [15]

## Ensayo de Índice de Fluidéz (MFI)



**FIGURA 4.6 ENSAYO DE INDICE DE FLUIDEZ VS PROPORCION DE CaCo3**

En el ensayo de índice de fluidéz (MFI) los resultados obtenidos, presentados en el apéndice A y la figura 4.6, arrojaron una disminución de esta propiedad conforme aumenta el porcentaje de carbonato de calcio. Esto se debe al aumento de la viscosidad del material cargado, en este caso el polietileno; el porcentaje de carga mineral es inversamente proporcional al índice de fluidéz, debido a que a temperaturas de procesamiento (195 °C) el material que se funde es la matriz polimérica, es decir, el polietileno, quedando el carbonato de calcio como un sólido en suspensión, haciendo más viscosa la mezcla,

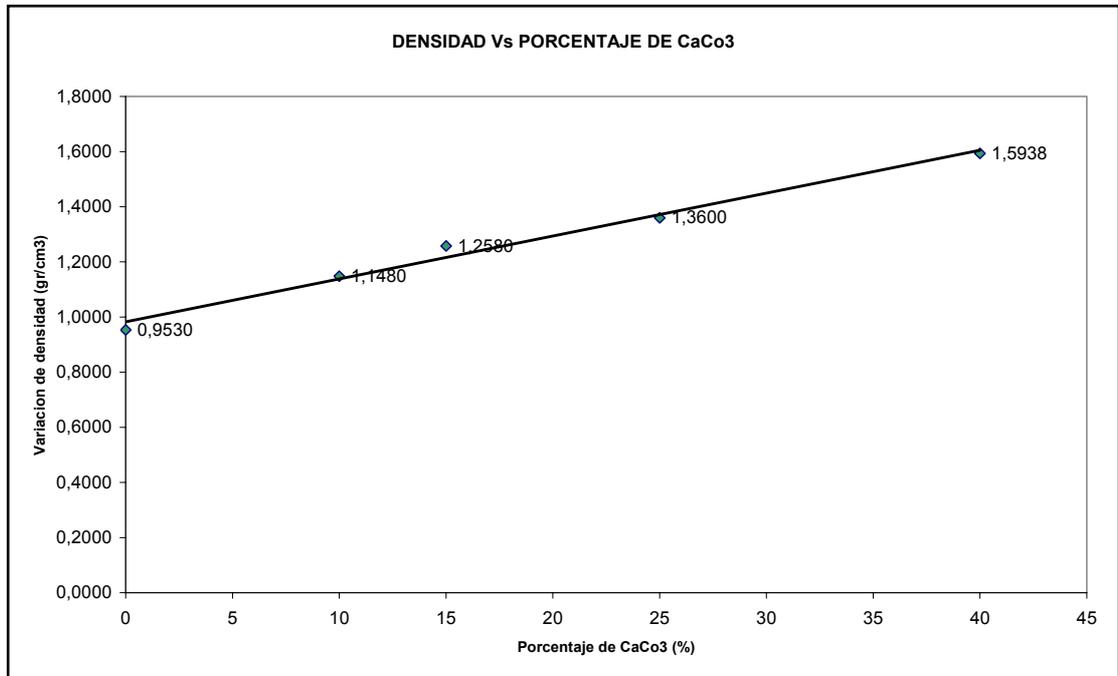
aumentando la inercia del compuesto fundido, afectando por consiguiente al índice de fluidez, disminuyéndolo. [15]

### Ensayo de determinación de densidad

**TABLA 17**

#### **DATOS DE DENSIDAD OBTENIDOS**

proporción de CaCo3	muestra #	altura de la muestra	densidad de la muestra	Media de la densidad
(%)		cm	gr/cm3	gr/cm3
0	1		0,953	0,953
	2		0,953	
	3		0,953	
10	1	350	1,18	1,148
	2	380	1,144	
	3	400	1,12	
15	1	300	1,24	1,258
	2	280	1,264	
	3	275	1,27	
25	1	200	1,36	1,36
	2	190	1,372	
	3	210	1,348	
40	1	5	1,594	1,5938
	2	6	1,5928	
	3	4,5	1,5946	



**FIGURA 4.7 DENSIDAD VS PORCENTAJE DE CaCo3**

Con los resultados obtenidos en este ensayo se puede observar que existe un incremento en la densidad con el aumento del porcentaje de  $\text{CaCO}_3$ , esto se debe a que la densidad del Carbonato de calcio es de  $2,7 \text{ gr/cm}^3$  y la densidad del polietileno es de  $0,953 \text{ gr/cm}^3$ , por lo que es fácilmente entendible que a mayor porcentaje de carbonato de calcio la mezcla aumente su densidad.

En el apéndice B se muestra los resultados de las propiedades con relación al incremento de carbonato de calcio, mostrando por medio de las flechas cual propiedad tuvo un incremento, cual tuvo un decrecimiento y cual no sufrió cambios.

El Grafico en el apéndice C nos permite tener una referencia de cuanto porcentaje de carbonato de calcio se debe introducir a un polietileno de para obtener un mejoramiento en la propiedad que se necesite para un producto determinado.

Entre las aplicaciones de compuestos de polietilenos de alta densidad reforzados con carbonatos de calcio tenemos por ejemplo las fundas multipropósito utilizadas para cargar pesos; se necesita que esta película tenga como propiedades mas importantes un alto modulo elástico y una alta resistencia manifestado por una alta rigidez ante la aplicación de cargas mecánicas, ya que en estas aplicaciones requerimos que la funda tenga poca o nula elongación. Asimismo, las películas plásticas cargadas con carbonato de calcio son altamente requeridas en aplicaciones donde se requiera una alta transmisibilidad de vapor de agua como en los panales y películas quirúrgicas donde dichas películas al ser estiradas, se producen poros por donde se difunden fácilmente el vapor de agua. Mediante los resultados mostrados en este trabajo podemos ver que es posible utilizar altos

porcentajes de cargas, mediante la utilización de monohusillos especialmente diseñados para cumplir con la operación de dispersión de las cargas minerales con eficacia y eficiencia hasta a un 40% de  $\text{CaCO}_3$ , disminuyendo los costos ampliamente como demostraremos en el siguiente análisis.

#### **4.1 Análisis comparativo del costo del material**

En este análisis nos enfocaremos en la ventaja económica de introducir el carbonato de calcio sobre compuestos de polietileno, sin considerar otras variables como, energía eléctrica, vida útil del tornillo, tiempos de producción, entre otras.

Sin duda una de las mejores ventajas de adicionar carbonato de calcio a polietilenos de alta densidad es la diferencia de precios que existen entre estos dos materiales. Ya que mientras el HDPE tiene un costo de 1.600\$ la tonelada, el masterbatch de polietileno tiene un costo de 320\$ la tonelada, lo cual influye enormemente en el precio del producto final, y si podemos adicionar este masterbatch de carbonato de calcio sin descuidar las propiedades necesarias para la elaboración de nuestro producto tendríamos un ahorro significativo.

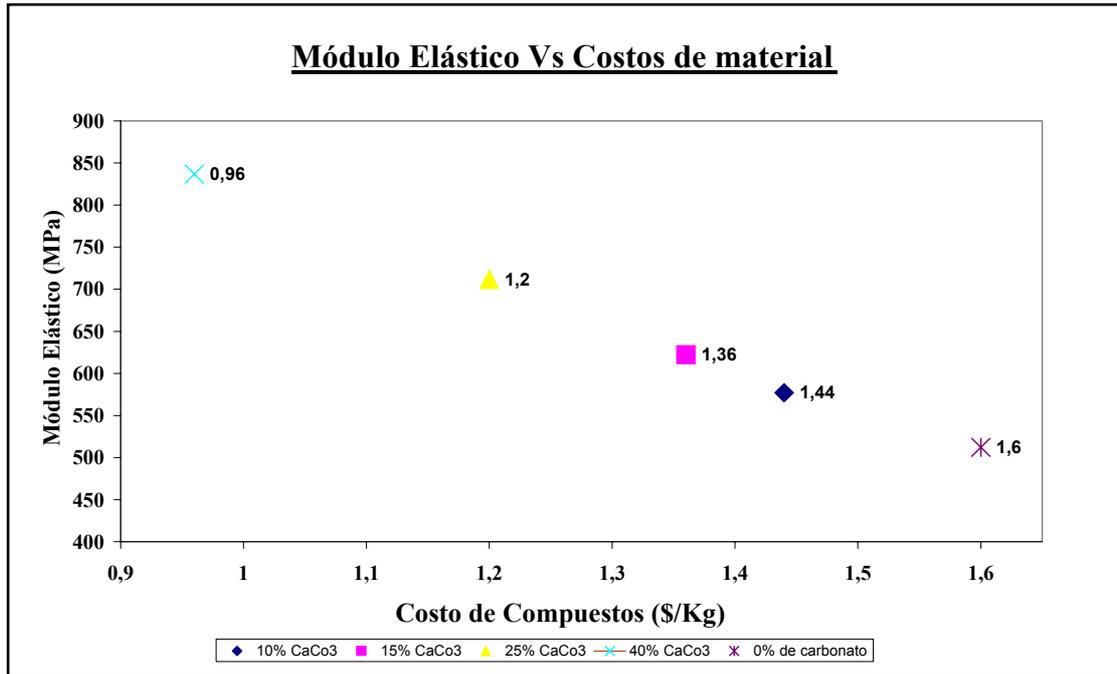
En el apéndice B mostramos una tabla que nos relaciona , los diferentes porcentajes de carbonato de calcio, las propiedades de cada proporción, y los costos por kilogramo de cada mezcla, indicando con una flecha cual es la tendencia de cada dato mostrado.

A continuación presentaremos gráficos en los cuales ilustraremos las propiedades mecánicas en relación a los costos de material.

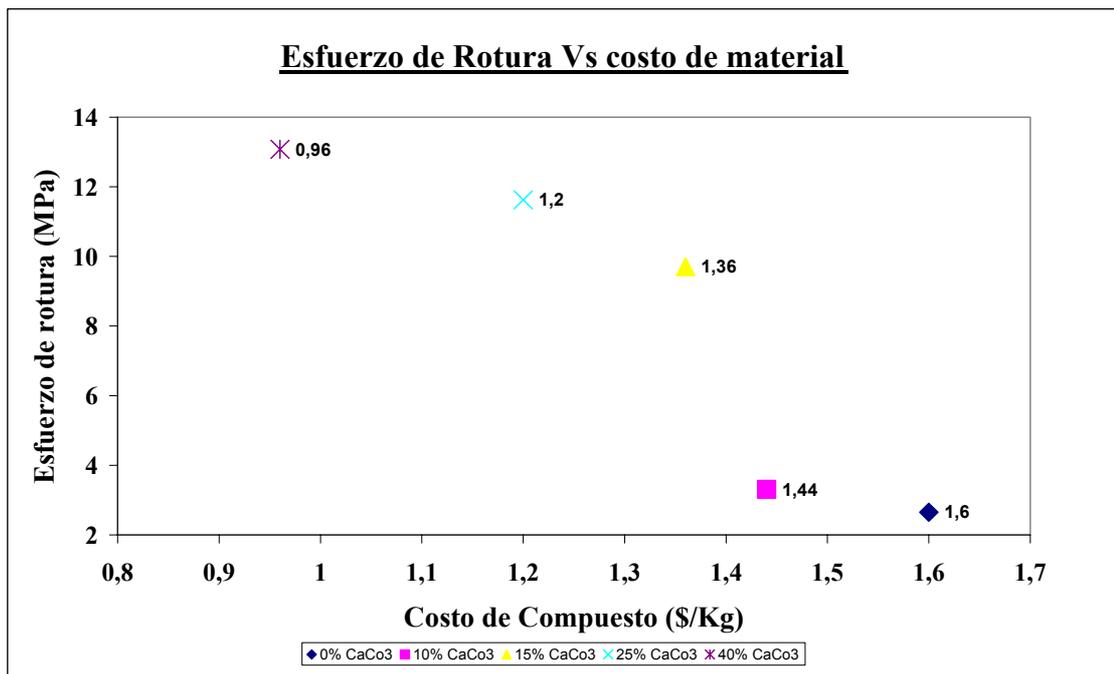
**TABLA 18**

**DETERMINACION DE COSTOS VS PORCENTAJE DE  $\text{CaCo}^3$**

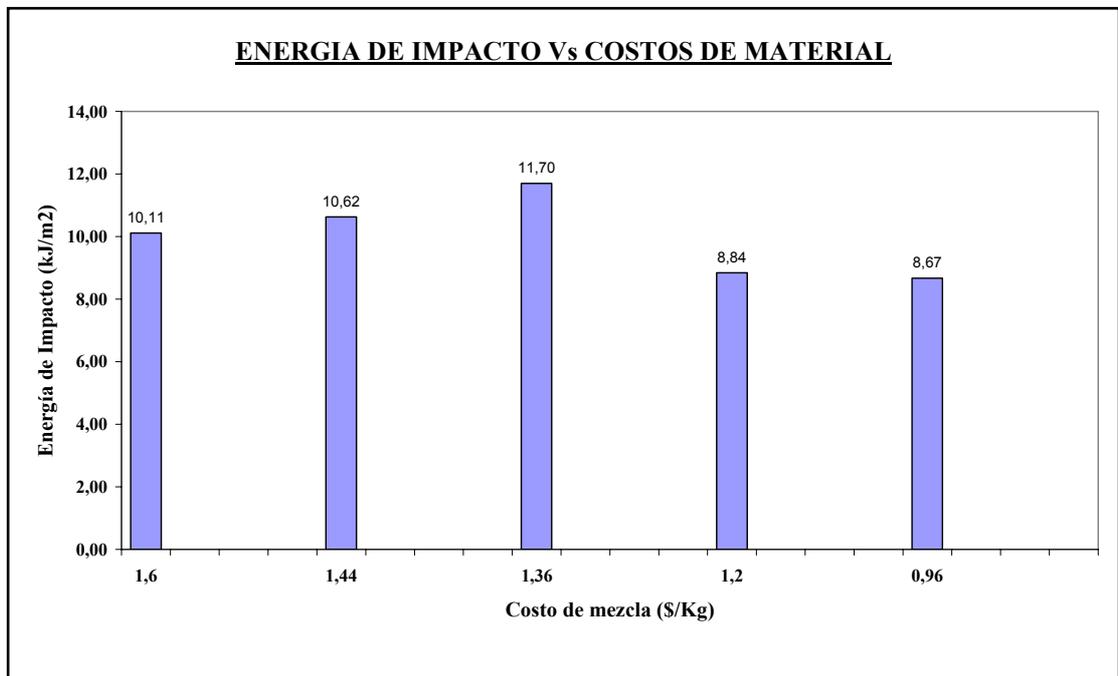
<b>MEZCLA (%)</b>	<b>Impact Strength (kJ/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Costo de material (\$/Kg)</b>
<b>0%</b>	10,11	1,6
<b>10%</b>	10,62	1,44
<b>15%</b>	11,70	1,36
<b>25%</b>	8,84	1,2
<b>40%</b>	8,67	0,96



**FIGURA 4.8 MODULO ELASTICO VS COSTO DE COMPUESTO**



**FIGURA 4.9 ESFUERZO DE ROTURA VS COSTO DE MATERIAL**



**FIGURA 4.10 ENERGIA DE IMPACTO VS COSTO DE MATERIAL**

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, si pensamos en desarrollar en una aplicación, como en las fundas multipropósitos la mezcla recomendada sería de 15% aproximadamente ya que con este porcentaje obtenemos las mejores propiedades de impacto, con una proporción mayor las propiedades decaerían y utilizando esta proporción tendríamos un ahorro de 0,24 \$/Kg que para una empresa que procesa alrededor de 50Kg/h de material representaría un ahorro en material de alrededor de 8000 dólares al mes.

Para aplicaciones de fundas respirables donde la resistencia al impacto no es tan relevante como las propiedades tensiles se

recomienda una proporción aproximada del 40% que para la misma empresa que produce 50 Kg/hr de material produciría un ahorro de alrededor de 23.000 \$

# CAPITULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- La utilización del carbonato de calcio como relleno funcional nos proporciona una serie de ventajas en propiedades mecánicas así como una ventaja económica por la abundancia de este mineral en el país.
- Se evidencia un aumento significativo en las propiedades mecánicas como el modulo elástico y el esfuerzo a la rotura con el aumento de porcentaje en peso de carbonato de calcio, debido a la naturaleza rígida del relleno.

- En todos los experimentos se observó cierta dispersión de los datos; esto indicaría que no tenemos una alta reproducibilidad en los experimentos realizados. Se estima este efecto se debe a que los experimentos no son realizados a escala laboratorio, sino a escala industrial, donde todas las condiciones no se pueden controlar con el grado de exactitud que se tiene en un laboratorio experimentando sobre una muestra de masa ínfima.
- Se evidencia una elevación de la energía de impacto hasta determinada proporción y después de esta proporción decrece. Si bien la energía de impacto absorbida por el material es importante para evaluar el comportamiento de los materiales ante cargas repentinas, el decrecimiento no es tan relevante teniendo en cuenta los incrementos significativos que se alcanzan en propiedades tensiles como el modulo elástico y el esfuerzo de rotura.
- Se evidencia una disminución de la temperatura de ablandamiento (VICAT) debido al alto índice de conductividad térmica del relleno en comparación con el de la matriz polimérica. En el caso del Índice de Fluidez (MFI) decrece con

el aumento de carbonato de calcio debido a que aumenta la viscosidad con el aumento de partículas rígidas minerales en la matriz polimérica, esto ocasiona que el flujo de plástico fundido por unidad de tiempo a través del plastometro disminuya.

- No se dieron cambios significativos en la absorción de agua debido a la naturaleza hidrofóbica tanto del HDPE como del carbonato de calcio. En el caso de la densidad, esta se incrementa con proporcionalmente al porcentaje de carbonato adicionado al compuesto, debido a que el carbonato de calcio posee una densidad apreciablemente mayor que el HDPE.
- Los resultados obtenidos muestran un marcado aumento de las propiedades mecánicas en compuestos de polietilenos con carbonatos de calcio; siendo así, podemos estimar indirectamente que tenemos una buena capacidad de mezclado en la peletizadora desarrollada.

- Se puede afirmar que la adición de rellenos de carbonato de calcio sobre polietilenos representa una alternativa altamente económica en relación de costos de material y a su vez aumentar las propiedades requeridas para la elaboración de productos.

### **Recomendaciones**

- Se recomienda realizar un estudio comparativo de consumo eléctrico de la maquina al procesar plástico puro y al procesar compuestos con carbonato, ya que debido a la reducción del índice de fluidez (MFI), es claro que el torque necesario en el tornillo tiene que ser mayor para hacer fluir un material mas viscoso; con esto se aumentaría el consumo eléctrico de la maquina viéndose afectado directamente en los costos de procesamiento.
- Se recomienda realizar un estudio comparativo de productividad entre un tornillo simple y el tornillo reacondicionado utilizado para este trabajo ya que los mezcladores utilizados proporcionan una caída de presión en el que se ve directamente afectado el flujo de material y con esto disminuyendo la producción.

- Se recomienda también realizar un estudio comparativo que relacione la vida útil del tornillo utilizando material puro y procesando material con carga de carbonato de calcio, debido a que el carbonato tiene cierto grado de abrasividad, provocando desgaste tanto en el tornillo como en el canon de la extrusora; esto puede causar una reducción de la productividad prematura en la maquina.

# **APENDICES**

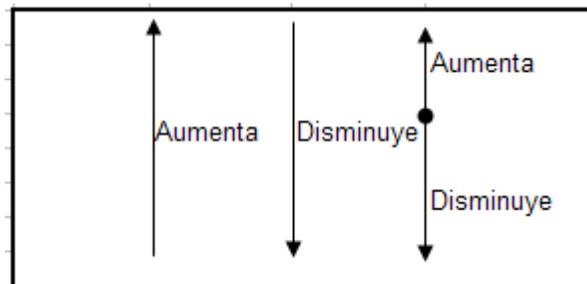
APENDICE A

ENSAYO DE INDICE DE FLUIDEZ (MFI)

Proporcion de CaCo3 (%)	Número de corte	Peso de corte	tiempo de captura	viscosidad	taza de fluidez	taza de flujo volumetrico	Media de taza de fluidez
		gr	seg	pas.seg	gr/10min	cc/10min	gr/10min
0	1	0,34	3219,95	130566,7	0,069	0,084	0,0705
	2	0,34	3076,97	122406	0,072	0,088	
10	1	0,37	3396,53	130566,7	0,066	0,08	0,068
	2	0,37	3179,22	122406,3	0,07	0,085	
15	1	0,34	3430,4	139892,9	0,065	0,079	0,0665
	2	0,34	3272,03	130566,7	0,068	0,083	
25	1	0,38	3431,24	139892,9	0,065	0,075	0,067
	2	0,39	3416,75	130566,7	0,069	0,079	
40	1	0,27	3979,65	163208,3	0,041	0,068	0,041
	2	0,27	3993,42	163208,3	0,041	0,068	

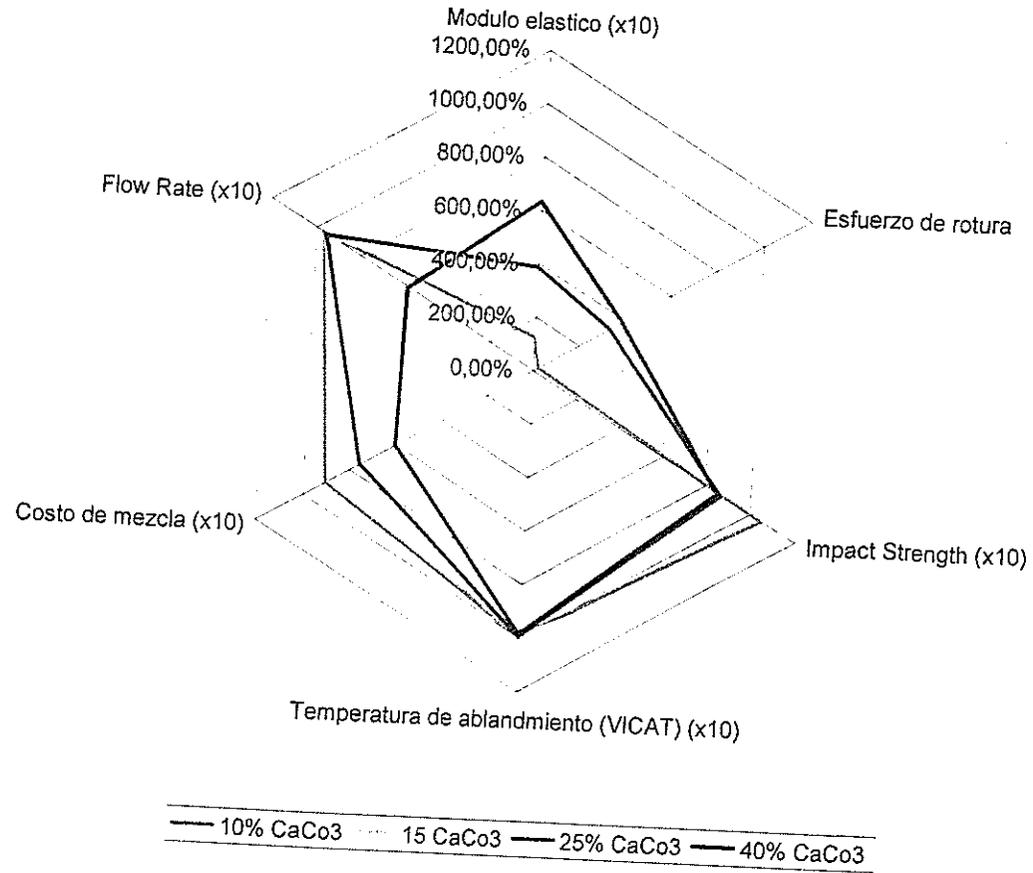
APENDICE B  
 TABLA GENERAL DE PROPIEDADES VS CARBONATO DE CALCIO

Proporcio n de CaCo3 %	Modulo elastico Mpa	Esfuerzo de rotura Mpa	Impact Strength Kj/m2	Temperatura de ablandmiento (VICAT) °C	Porcentaje de absorcion de agua %	Flow Rate gr/10min	Densidad gr/cm3	Costo de mezcla \$/Kg
0	512,17	2,653	10,11	126,8	0,0864	0,0705	0,953	1,6
10	576,966	3,304	10,62	126,05	0,0919	0,068	1,15	1,44
15	622,096	9,706	11,70	125,7	0,0902	0,0665	1,26	1,36
25	711,564	11,624	8,84	125,75	0,0876	0,067	1,36	1,2
40	836,818	13,076	8,67	124,65	0,0877	0,041	1,59	0,96



# APENDICE C

## Grafico de Propiedades



## BIBLIOGRAFIA

1. **RUBIN IRVIN**, Materiales plásticos (propiedades y aplicaciones),  
limusa noriega editores.
2. **RIGAIL C. ANDRES**, “Ciencias de los materiales”(apuntes de clases,  
Escuela superior politécnica del litoral, 2005)
3. **SCHWARZ OTTO**, Ciencia de los Plásticos , primera edición, editorial  
Costa Nogal
4. **J.C. SWALLOW**, Polyethylene: Technology and Uses of Ethylene  
Polymers. Iliffe and Sons, london.
5. **MANCHESTER METROPOLITAN UNIVERSITY**, Mineral Fillers in  
Thermoplastics: filler Manufacture and Characterization, department of  
materials technology,
6. **FILLES , ANDY H. TSOU, WALTER H. WADDELL**, Exxon Mobil  
chemical c.o.
7. **OMYA**, Technical Information plastics R1-01, Omya international AG.
8. **PERUGACHI B. RODRIGO, PAREDES V. CECILIA, CORNEJO M.  
MAURICIO**, Las nanoarcillas y sus potenciales aplicaciones en el  
Ecuador, revista tecnológica ESPOL.
9. **RAUWENDAAL C**, (2001), “Polymer Processing: Principles and  
design”, Wiley Inter-science, 135

10. **BAIRD D, COLLIAS D**, (1998) "Polymer Extrusion", Hanser Publishers.
11. **RAUWENDAAL C**, "Extrusion", Encyclopedia of Polymer Science and Technology, vol 2, 533-546.
12. **VUKOTA B**. (2004) "Die design Fundamentals", Hardcover 125-128
13. **W.R. HALE, K.K. DOHRER, M.R. TANT, I.D. SAND (2001)** "A diffusion model for water vapor transmission through microporous polyethylene/CaCO<sub>3</sub> films", Revista tecnologica ELSEVIER
14. **S.N. MAITI, P.K. MAHAPATRO**, appl. polym. sci. 42 (1991) 3101.
15. **LAWRENCE E. NIELSEN, ROBERT F. LANDEL**, Mechanical properties of polymers and composites, Segunda Edicion.
16. **HORNSBY PR. IN: JANCAR J**, 1999). Rheology, compounding and processing of filled thermoplastics. Mineral fillers in thermoplastics I., Raw materials and processing. Advances in polymer science, vol.139, 1999. p. 67. 1999. p. 155.
17. **Revista Integra ASEPLAS** (2005) (2006) (2007) "*Estadísticas de Importaciones de Resinas*", ASEPLAS.