

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL  
LITORAL**

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

**“Evaluación de propiedades reológicas y mecánicas de  
polietilenos reciclados en la ciudad de Guayaquil”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentada por:

**Juan Fernando Bravo Collahuazo**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2009**

## **AGRADECIMIENTO**

Al Msc. Andrés Rigaíl por su colaboración. A la Ing. Jenny Venegas por la ayuda prestada en la elaboración de los ensayos. A Polimallas, por el préstamo del Tensómetro para las pruebas realizadas. A los Señores Carlos Correa A. y Víctor Chicaíza P. por la ayuda valiosa en el desarrollo y finalización del presente trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios.

A mi madre Sra. Blanca Collahuazo por ser la fuente de mi inspiración y ejemplo de superación.

A mi familia por apoyarme todos estos años de estudios.

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Andrés Rigáil C.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Clotario Tapia B.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN 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)

---

Juan Fernando Bravo Collahuazo.

## RESUMEN

El plástico es difícilmente biodegradable y por esta razón se convierte en un producto altamente contaminante. El 90% de los plásticos es reciclable y podemos encontrarlo en diferentes formas y presentaciones. El reciclaje de plásticos es una práctica muy útil para reducir los desperdicios sólidos, tanto para la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales.

Los productos reciclados deben ser capaces de cumplir con las características de desempeño requeridas para su aplicación final. Conociendo sus propiedades inherentes y su virtual desempeño se pueden mejorar los productos finales para determinadas aplicaciones de acuerdo a la demanda del mercado.

Para el presente proyecto, se tomó material reciclado post-consumo de polietileno de alta densidad el cuál después de ser escogido, lavado, secado se dividió en dos grupos, el primer grupo se mezcló con aditivo-antioxidante y el segundo grupo quedó sin este aditivo. Una vez el material separado y aditivado, después de este proceso el material fue sometido a diferentes ciclos

de extrusión, por cada ciclo que se fabrican cinco probetas tanto para material con aditivo como para material sin aditivo.

Luego de realizados los cinco ciclos de extrusión, se sometieron todas las probetas a los diferentes ensayos tales como MFI, tensión mecánica e impacto charpy. Posteriormente los resultados de los ensayos fueron sometidos a un análisis comparativo con la finalidad de determinar cualitativamente el efecto del aditivo en las muestras de PEAD reciclado post-consumo, para reducir la degradación termo-mecánica que afectaron a los polietilenos sin aditivo a través de los ciclos de extrusión. Se presenta tablas comparativas de la variación de propiedades tanto mecánicas como reológicas y la relación entre dichas propiedades.

## INDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
INDICE GENERAL.....	II
ABREVIATURAS .....	III
SIMBOLOGÍA .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
INTRODUCCIÓN .....	VII

<b>CAPITULO 1.</b>	<b>Pág.</b>
<b>1. GENERALIDADES.</b>	<b>3</b>
1.1 Planteamiento del problema.	3
1.2 Objetivos de la tesis.	5
1.2.1 Objetivo general de la tesis.	5
1.2.2 Objetivos específicos de la tesis.	5
1.3 Metodología.	6



## **CAPITULO 2.**

<b>2. Fundamentos de polietilenos.</b>	<b>10</b>
2.1 Descripción general de los polietilenos.	11
2.1.1 Estructura física química de los polietilenos.	12
2.1.2 Propiedades de los polietilenos.	15
2.2 Separación y reciclaje de polietilenos.	30
2.2.1 Polietilenos reciclados en la ciudad de Guayaquil	31
2.2.2 Métodos utilizados.	33
2.3 Aditivos a utilizar.	35
2.4 Métodos para evaluar propiedades en polietilenos reciclados.	41
2.4.1 Propiedades reológicas: Índice de Fluidéz.	41
2.4.1.1 Características.	42
2.4.1.2 Equipos a utilizar.	43
2.4.1.3 Preparación de probetas.	46
2.4.2 Propiedades Mecánicas: Impacto, Modulo de elasticidad, resistencia a la tensión.	50
2.4.2.1 Características.	50
2.4.2.2 Equipos a utilizar.	59
2.4.2.3 Preparación de las probetas.	65

## **CAPITULO 3.**

<b>3. Evaluación propiedades de polietilenos reciclados.</b>	<b>71</b>
3.1 Descripción de mezclas.	71
3.2 Evaluación de propiedades reológicas.	80
3.2.1 Análisis de índice de Fluidéz ASTM D1238.	81
3.3 Ensayo de propiedades mecánicas.	84
3.3.1 Ensayo de resistencia al impacto. ASTM D256.	85
3.3.2 Ensayo de tensión y Modulo de elasticidad ASTM D638.	88

## **CAPITULO 4.**

<b>4. Análisis de resultado.</b>	93
4.1 Análisis de propiedades reológicas realizadas a polietilenos reciclados en el laboratorio de la FIMCP.	93
4.2 Análisis de propiedades mecánicas.	98
4.3 Comparación de polietilenos reciclados con y sin aditivos.	103
4.4 Potenciales aplicaciones comerciales.	109

## **CAPITULO 5.**

<b>5. Conclusiones y Recomendaciones.</b>	112
5.1 Conclusiones.	112
5.2 Recomendaciones.	113

## **BIBLIOGRAFÍA.**

## ABREVIATURAS

HDPE	High density Polyethylene
ASTM	American Society for Testing materials
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PELBD	Polietileno Lineal de Baja Densidad
PMMA	Polimetilmetacrilato
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PBT	Polibutadieno estireno
PET	Polietileno tereftalato
UHMWPE	Polietileno de ultra alto peso molecular
PEAD(A)	Polietileno de Alta Densidad con aditivo
PEAD(S)	Polietileno de Alta Densidad sin aditivo

## SIMBOLOGÍA

g/10min	Unidades de Índice de Fluidez.
g/cm <sup>3</sup>	Unidades de Densidad.
rpm	Unidades de Velocidad Angular.
MPa	Unidades de presión.
psi	Unidades de presión.

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Distribución Porcentual regional de la industria plástica en el Ecuador.	4
Tabla 2.1 Ramificación de la cadena y cristalinidad del polietileno.	14
Tabla 2.2 Procesos de Transformación de Acuerdo al tipo de Polietileno.	16
Tabla 2.3 Propiedades físicas y mecánicas del polietileno.	17
Tabla 2.4 Relación entre las propiedades del polietileno que están o no en función del peso molecular.	18
Tabla 2.5 Propiedades de Polietilenos.	21
Tabla 2.6 Variedad de densidades de polietileno.	23
Tabla 2.7 Propiedades de polietileno en función de la densidad.	24
Tabla 2.8 Propiedades moleculares básicas del HDPE.	27
Tabla 2.9 Descripción de los Antioxidantes.	39
Tabla 2.10 Hoja técnica del antioxidante MB AOX CYANOX 2777.	41
Tabla 3.1 Resultados promedios de índice de fluidez realizadas a PEAD reciclado con aditivo.	81
Tabla 3.2 Resultados promedios de índice de fluidez realizadas a PEAD reciclado sin aditivo.	83
Tabla 3.3 Resultados promedios de ensayo de impacto realizadas a PEAD reciclado con aditivo.	85
Tabla 3.4 Resultados promedios de ensayo de impacto realizadas a PEAD reciclado sin aditivo.	87
Tabla 3.5 Resultados promedios de ensayo de tensión realizadas a muestras de PEAD reciclado sin aditivo.	88
Tabla 3.6 Resultados de promedios de ensayo de tensión realizadas a PEAD reciclado con aditivo.	91
Tabla 4.1 Índices de propiedades mecánicas y reológicas en ensayo a muestras de PEAD reciclado (Sin Aditivo).	107
Tabla 4.2 Comparación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas en ensayo a PEAD reciclado (Sin Aditivo).	108

Tabla 4.3 Índices de propiedades mecánicas y reológicas de ensayo a muestras de PEAD reciclado (con aditivo).	108
Tabla 4.4 Comparación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas en ensayo a PEAD reciclado (con aditivo).	109
Tabla 4.5 Relación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas de PEAD reciclado (sin aditivo / con aditivo).	109

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama de descripción de metodología de la tesis.	7
Figura 2.1 Cadena del polietileno de alta densidad.	12
Figura 2.2 Estructura del HDPE y LDPE.	13
Figura 2.3 Estructura del antioxidante CYANOX 1790.	40
Figura 2.4 Estructura de fosfito.	40
Figura 2.5 Arreglo general del plastómetro de extrusión.	44
Figura 2.6 Tabla de condiciones, temperaturas y carga estándar para la prueba ASTM D1238.	48
Figura 2.7 Relación del tornillo de sujeción, espécimen, y borde de impacto entre sí para métodos de pruebas IZOD A y C.	53
Figura 2.8 Péndulo de Impacto Tinius Olsen.	60
Figura 2.9 Posicionamiento de un espécimen en el banco de sujeción.	62
Figura 2.10 Tensómetro Qtest.	64
Figura 2.11 Dimensiones de un espécimen de prueba tipo IZOD.	65
Figura 2.12 Especimen de prueba de tensión y medidas.	70
Figura 3.1 Muestras de material reciclado en el proceso de limpieza.	72
Figura 3.2 Muestra del antioxidante MBAOX	73
Figura 3.3 Molino para plástico.	74
Figura 3.4 Mezcladora para materiales con aditivo.	74
Figura 3.5 Control de temperatura de 3 secciones del barril de la extrusora.	75
Figura 3.6 Balanza.	76
Figura 3.7 Prensa.	76
Figura 3.8 Salida de material de la extrusora.	77
Figura 3.9 Muestra de PEAD	78

Figura 3.10 Prensado de la muestra.	78
Figura 3.11 Desconexión de terminales del enchufe.	79
Figura 3.12 Placa resultante.	80
Figura 3.13 Resultado de análisis de MFI Vs. Ciclos de extrusión de PEAD reciclado con aditivo.	82
Figura 3.14 Resultado de análisis de MFI (densidad vs. Ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.	82
Figura 3.15 Resultado del análisis de ensayo de MFI a PEAD reciclado sin aditivo.	83
Figura 3.16 Resultado de análisis de MFI (densidad vs. Ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.	84
Figura 3.17 Resultado de análisis de ensayo de impacto de PEAD reciclado con aditivo	86
Figura 3.18 Resultado de análisis de ensayo de impacto a PEAD reciclado sin aditivo.	87
Figura 3.19 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga máx. vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.	89
Figura 3.20 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga ruptura. Vs. % de alargamiento). PEAD reciclado sin aditivo.	90
Figura 3.21 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga máx. Vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.	91
Figura 3.22 Resultado de análisis de ensayo de tensión (fuerza de ruptura. Vs. % de elongación en la ruptura. PEAD reciclado con aditivo.	92
Figura 4.1 Resultado de análisis de ensayo de MFI (viscosidad Vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.	94
Figura 4.2 Resultado de análisis de ensayo MFI (MFI Vs. ciclos de extrusión y viscosidad) de PEAD reciclado sin aditivo.	95
Figura 4.3 Resultado de análisis de ensayo de MFI (MFI Vs. ciclos de extrusión y Cizalladura) de PEAD reciclado sin aditivo.	95
Figura 4.4 Resultado de análisis de ensayo de MFI (Viscosidad Vs. cizalladura) de PEAD reciclado sin aditivo.	96



Figura 4.5 Resultado de análisis de ensayo de tensión (viscosidad Vs. ciclos de extrusión) a PEAD reciclado con aditivo.	96
Figura 4.6 Resultado de análisis de ensayo MFI (MFI Vs. ciclos de extrusión y viscosidad) de PEAD reciclado con aditivo.	97
Figura 4.7 Resultado de análisis de ensayo de MFI (MFI Vs. ciclos de extrusión y Cizalladura) de PEAD reciclado con aditivo.	97
Figura 4.8 Resultado de análisis de ensayo de MFI (viscosidad Vs. cizalladura) de PEAD reciclado con aditivo.	98
Figura 4.9 Resultado de análisis de ensayo de impacto (energía de corte Vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.	99
Figura 4.10 Análisis de variación de propiedades de (MFI Vs. ciclos de extrusión y energía de corte) de PEAD reciclado sin aditivo.	99
Figura 4.11 Análisis de variación de propiedades de (carga de ruptura Vs. ciclos de extrusión y MFI) de PEAD reciclado sin aditivo.	100
Figura 4.12 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga de ruptura Vs. ciclos de extrusión y % de elongación en la ruptura) de PEAD reciclado sin aditivo.	101
Figura 4.13 Resultado de análisis de ensayo de impacto (energía de corte Vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.	101
Figura 4.14 Análisis de variación de propiedades (MFI Vs. ciclos de extrusión y energía de corte) de PEAD reciclado con aditivo.	102
Figura 4.15 Análisis de variación de propiedades (carga de máx. Vs. ciclos de extrusión y MFI) de PEAD reciclado con aditivo.	102
Figura 4.16 Análisis de variación de propiedades (carga de ruptura Vs. ciclos de extrusión y % de elongación) de PEAD reciclado con aditivo.	103
Figura 4.17 Análisis de variación de propiedades de MFI de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.	104
Figura 4.18 Análisis de variación de propiedades de impacto de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.	105
Figura 4.19 Análisis de variación de propiedades de tensión de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.	106
Figura 4.20 Comparación general de propiedades de tensión, Impacto y MFI de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.	106
Figura 4.21. Teja compuesta a base de celulosa, aluminio y polietileno reciclado.	111



## **INTRODUCCION.**

El sector plástico es uno de los sectores más dinámicos de la economía del Ecuador, no sólo como transformadores de resinas en productos terminados sino como parte vital de otras cadenas productivas.

En Ecuador, el sector Industrial de productos plásticos está conformado por más de 400 empresas facturando más de \$550 millones al año, generando aproximadamente 30.000 empleos directos e indirectos, entre otras cosas, por su dispersa y amplia cadena de comercialización. Sin embargo somos importadores absolutos de materias primas de origen petroquímico pese a ser el Ecuador un país petrolero, es por ello que la investigación para lograr la reutilización de plásticos debería ser una prioridad en nuestro medio, no solo por el aspecto económico si también por las mejoras ambientales que representa la reutilización de plásticos.

La presente tesis busca aportar al desarrollo, realizando investigación para mejorar las propiedades del PEAD post-consumo reciclado, básicamente se tomarán muestras de PEAD post-consumo de diversos sectores mezclándolo con antioxidante, para realizar pruebas reológicas, mecánicas y así comparar la variación de las propiedades para determinar los cambios que se a logrado con la utilización del antioxidante.

Este trabajo va desde la separación física, de los diversos componentes que se encuentran mezclados en el material reciclado (lo que influenciará en proporciones considerables en las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla del plástico) hasta el análisis de los resultados de los diferentes ensayos a realizar.

Los ensayos que se realizarán son:

- Ensayo de Tracción.
- Ensayo de Impacto charpy.
- Ensayo de Índice de Fluidez.

Los ensayos que se realizarán permitirán presentar la variación de propiedades mecánicas y reológicas, considerando que dichas propiedades en un producto reciclado tiende a disminuir.

# CAPÍTULO 1

## 1. GENERALIDADES.

### 1.1 Planteamiento del problema.

Las ventajas de los productos plásticos muchas veces se convierten en una desventaja en el momento que los deseamos, si bien los plásticos podrían ser reutilizados o reciclados en su gran mayoría, lo cierto es que hoy estos desechos son un problema de difícil solución fundamentalmente para ciudades como Guayaquil y Quito. Es realmente una tarea costosa y compleja para los municipios encargados de la recolección y disposición final de los residuos ya que a la cantidad de envases se le debe sumar el volumen que representan.

A continuación en la tabla 1.1 se indica la distribución general de la industria plástica en el Ecuador.

Tabla 1.1 Distribución porcentual regional de la industria plástica en el Ecuador.

1	Guayas	48%
2	Pichincha	33%
3	El Oro	5%
4	Azuay	5%
5	Otras provincias	4%
6	Manabí	3%
7	Otros	2%

En Guayas se presenta la mayor cantidad de empresas procesadoras de resinas plásticas, por lo que en esta provincia se presenta la mayor cantidad de desechos plásticos. Algunos datos nos alertan sobre esto, por ejemplo, un camión con una capacidad para transportar 12 toneladas de desechos comunes, transportará apenas 6 ó 7 toneladas de plástico compactado y apenas 2 toneladas de plástico sin compactar.

En Ecuador la importación de resinas plásticas ha aumentado en más de 300% desde el año 1990 según estadísticas de la Asociación de Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS). Por lo tanto todo proyecto o política de reciclaje en el Ecuador se debe tomar en

consideración para ser implementado y así aportar al desarrollo industrial ambientalmente amigable.

## **1.2 Objetivos de la tesis.**

### **1.2.1 Objetivo general de la tesis.**

El objetivo general de la presente tesis es evaluar el deterioro de las propiedades reológicas y mecánicas a lo largo de varios ciclos de de extrusión de PEAD reciclado para así poder comparar los diferentes resultados de los ensayos realizados utilizando antioxidante MB AOX.

### **1.2.2 Objetivos específicos de la tesis.**

- Verificar la calidad del reciclado post-consumo en Guayaquil utilizado para el reproceso de plástico,
- Seguir un proceso similar al de la industria con respecto al reciclaje mecánico utilizado para seleccionar materiales a reprocesar.

- Analizar la degradación termo-mecánica de las muestras de PEAD reciclado post-consumo con respecto a los ciclos de extrusión continuos.
- Evaluar las propiedades mecánicas y reológicas del polietileno reciclados mediante ensayos de tracción, resistencia al impacto, e índice de fluidez.
- Comparar la variación de propiedades mecánicas y reológicas de los compuestos formados a partir PEAD reciclado con y sin antioxidante.
- Estimar una mejora porcentual en el reciclado de polietileno de alta densidad con antioxidante, respecto al material sin antioxidante.

### **1.3 Metodología.**

A continuación se describe la metodología que se llevará a cabo en la presente tesis.



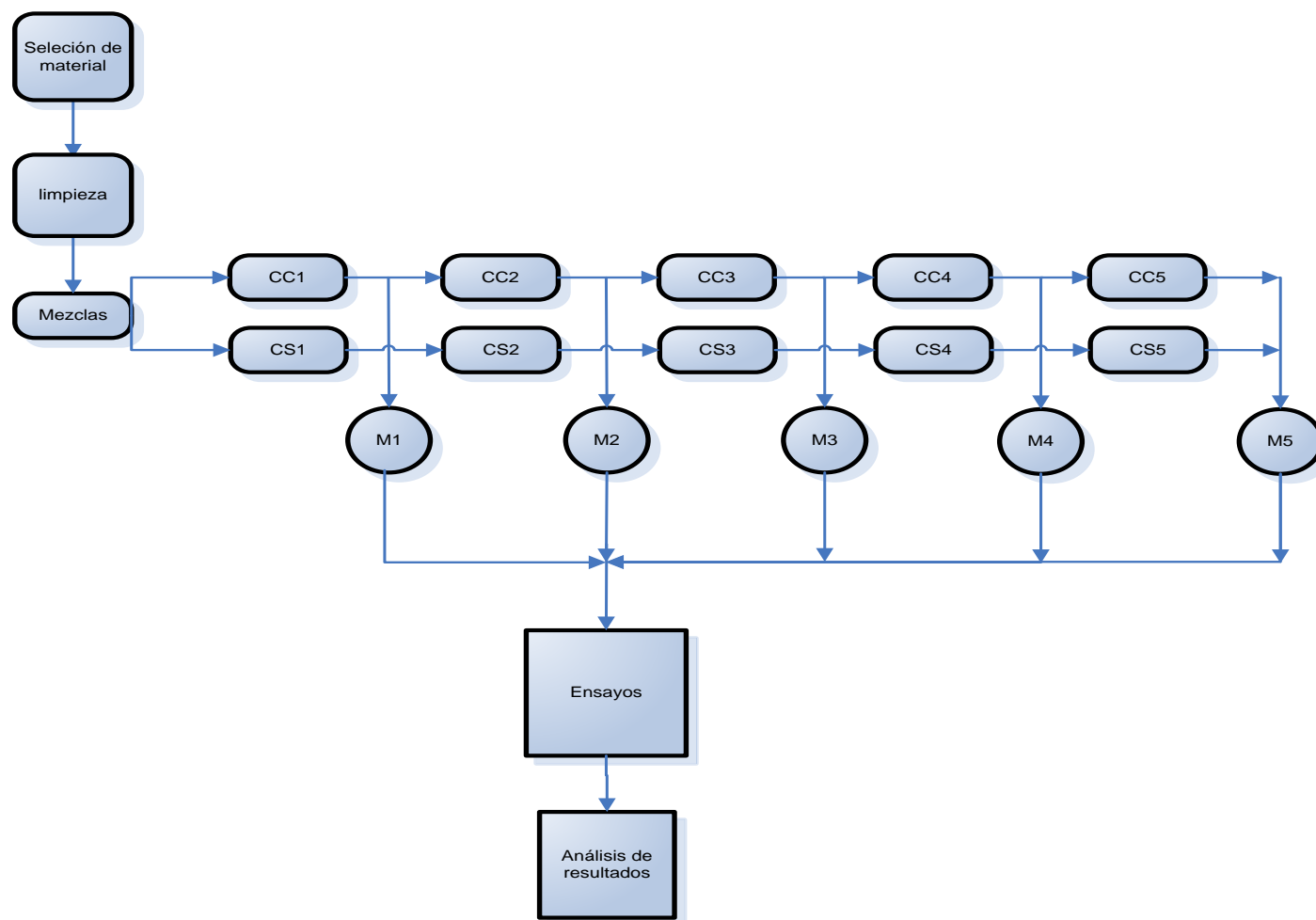


Figura1.1 Diagrama de descripción de metodología de la tesis.

Para el presente proyecto se realizarán cinco ciclos de extrusión por lo que la denominación CC y CS representa ciclo con aditivo y ciclo sin aditivo respectivamente, además el número que lo acompaña indica a que ciclo se refiere, primer ciclo, segundo ciclo, etc. Por cada ciclo se toma una muestra (M) las cuales serán llevadas a los ensayos y a su posterior análisis. Por ejemplo CS 2 significa segundo ciclo de extrusión sin aditivo.

Esta tesis se ha dividido en cinco capítulos, el primer capítulo trata sobre los objetivos y la metodología general que se realizará para el desarrollo y posterior análisis de la misma.

En el siguiente capítulo describe el inicio del proyecto con respecto a la obtención, clasificación, separación y reciclaje del PEAD reciclado post-consumo.

Luego de esta introducción se detallará el aditivo-antioxidante que se utilizará para ser mezclado con el PEAD reciclado. Se adquiere PEAD reciclado post-consumo y posteriormente se procede a realizar la limpieza del mismo, una vez obtenido el material limpio se divide en dos grupos para procesar con y sin aditivo. Luego de procesar “extruir” y tomar las muestras se realizan las probetas y posteriormente las pruebas respectivas.

En la parte culminante, luego de realizadas las pruebas, se procederá al análisis comparativo a fin de tener una idea cualitativa del efecto de la utilización del aditivo con respecto a la degradación de sus propiedades termo-mecánicas que sufren los polietilenos a través de los ciclos de extrusión.

# CAPÍTULO 2.

## 2. FUNDAMENTOS DE POLIETILENOS.

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido y es frecuentemente fabricado en finas láminas. Por la polimerización del etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental  $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ , y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado.

Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después se ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos industriales especialmente para película y para envases.

## **Tipos de Polietileno.**

En general hay dos tipos de polietileno:

- De baja densidad (LDPE).
- De alta densidad (HDPE).

El de baja densidad tiene una estructura de cadena enramada, mientras que el polietileno de alta densidad tiene esencialmente una estructura de cadena recta [1].

### **2.1 Descripción general de los polietilenos.**

Las propiedades de las resinas de polietileno se deben principalmente, sino exclusivamente a tres propiedades moleculares básicas: densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular. Estas propiedades básicas a su vez dependen del tamaño, estructura y uniformidad de la molécula de polietileno. Algunas de las propiedades que hacen del polietileno una materia prima tan conveniente para miles de artículos manufacturados son, entre otras: poco peso, flexibilidad, tenacidad, alta resistencia química y propiedades eléctricas sobresalientes [2].

### 2.1.1 Estructura física química de los polietilenos.

Una molécula de polietileno no es nada más que una cadena larga de átomos de carbono, con dos átomos de hidrógeno unidos a cada átomo de carbono. La figura 2.1 representa fácilmente la cadena de átomos de carbono, de miles de átomos de longitud.

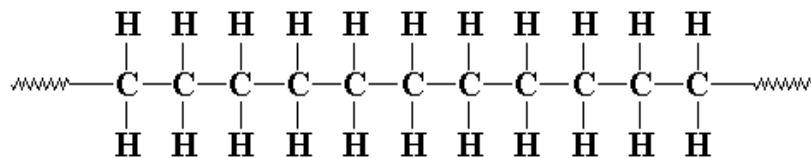


Figura 2.1 Cadena del polietileno de alta densidad.

En ocasiones es un poco más complicado, a veces algunos de los carbonos en lugar de tener hidrógenos unidos a ellos, tienen asociadas largas cadenas de polietileno. Esto se llama polietileno ramificado, o de baja densidad, o LDPE. Cuando no hay ramificación, se llama polietileno lineal de alta densidad, o HDPE el polietileno lineal es más fuerte que el polietileno ramificado, pero el polietileno ramificado es más barato y más fácil de hacer.

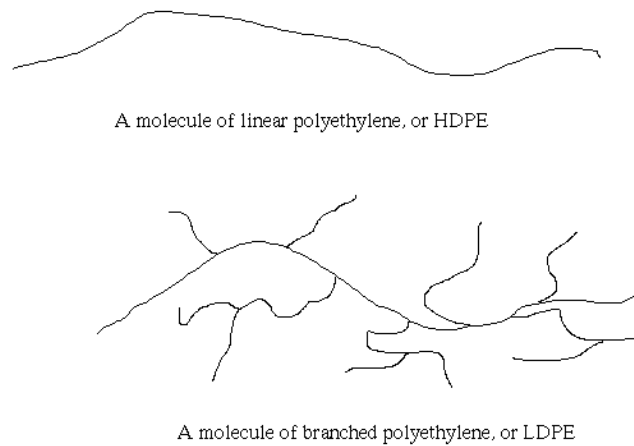


Figura 2.2 Estructura del HDPE y LDPE.

El polietileno lineal se produce normalmente con pesos moleculares en el rango de 200.000 a 500.000, pero puede ser mayor aún. El polietileno con pesos moleculares de tres a seis millones se denomina polietileno de peso molecular ultra-alto, o UHMWPE. El UHMWPE se puede utilizar para hacer fibras que son tan fuertes que sustituyeron al Kevlar para su uso en chalecos a prueba de balas [3].

La condición ramificada de la cadena del polímero influye profundamente en las propiedades físicas tanto del polietileno sólido como del polietileno fundido. En consecuencia, las propiedades físicas que se indican más adelante se refieren no sólo a un intervalo de pesos

moleculares, sino también a cierto tipo de polímeros de cadena ramificada. Variando las condiciones en que se realiza la polimerización, es posible variar el grado de ramificación entre límites amplios y producir gran número de tipos de polímeros.

Tabla 2.1 Ramificación de la cadena y cristalinidad del polietileno.

<b>Ramificación (CH<sub>3</sub> por 100 CH<sub>2</sub>)</b>	<b>Densidad a 20 ° C</b>	<b>Cristalinidad (%)</b>
0 ( polimetileno)	0.99	95
1	0.96	80
2	0.94	72
3	0.92	60
4	0.91	55

En la tabla 2.1 se observa que al aumentar la ramificación de la cadena disminuye la densidad del polietileno y su grado de cristalinidad. Varias propiedades son directamente afectadas por la cristalinidad y en consecuencia por el grado de ramificación. Son ejemplo de ello la dureza, el punto de reblandecimiento. Otras propiedades, resistencia a la tracción, la flexibilidad a temperaturas bajas y la resistencia al choque, son principalmente funciones del peso molecular medio.



Debido a que el grado de cristalinidad del PEAD es variable, se lo puede considerar como un polímero amorfo con una cantidad variable de carga cristalina. La frecuencia con que aparecen las ramificaciones, se denominan grado de ramificación y se indica con el número de ramificaciones por cada 1000 átomos de carbono de la cadena principal. La diferencia mencionada en la cadena de la macromolécula de polietileno, se refleja en las características físicas de cada tipo de polietileno, por otra parte, debido a la estructura complicada el polietileno de macromoléculas muy ramificada, tiene una cristalinidad menor que el polietileno de cadenas lineales a mayores distancias entre las macromoléculas por lo tanto resulta una densidad menor y también menor resistencia mecánica.

### **2.1.2 Propiedades de los polietilenos.**

Cada uno de los polietilenos presenta diferentes características que limitan algunas veces su procesamiento, en determinados métodos de transformación, sin embargo por los procesos de inyección

y extrusión, pueden transformarse la mayoría de los polietilenos.

Tabla 2.2 Procesos de transformación de acuerdo al tipo de polietileno.

<b>PROCESO DE TRANSFORMACIÓN</b>	<b>TIPO DE POLIETILENO</b>
<b>EXTRUSIÓN</b>	
	PEBD
Tubería y perfiles	PEBDL PEAD
Recubrimiento de cable y alambre	
Película soplada	
Lámina	
<b>INYECCION</b>	PEBD , PEBDL PEAD
<b>SOPLADO</b>	
inyección soplo	PEBD PEBDL PEAD PEBD, PEBDL
extrusión soplo	
<b>TERMOFORMADO</b>	PEAD PEDB, PEBDL
<b>ROTOMOLDEO</b>	PEAD

En la tabla 2.3 se muestran algunas de las propiedades típicas del polietileno sólido [4].

Tabla 2.3 Propiedades físicas y mecánicas del polietileno

Peso molecular Medio	25.000
Viscosidad intrínseca (en tetranidronaftaleno a 75 ° C), dlts/gr	1,0
Punto de Fusión, ° C	110
Densidad	
a 20 ° C	0,92
a 50 ° C	0,90
a 80 ° C	0,87
a 110 ° C	0,81
Coefficiente de dilatación lineal entre 0 y 40 ° C, por ° C	0,0002
Aumento de volumen por calentamiento desde 20 a 110 ° C	14
Compresibilidad a 20 ° C, por atm.	5,5 x 10-5
Calor específico	J g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
a 20 ° C	0,55
a 50 ° C	0,70
a 80 ° C	0,90
Índice de refracción	1,52
Módulo de Young ( 0-5% de extensión), Kg./cm <sup>2</sup>	1.600
Resistencia a la tracción a 20 ° C., Kg./ cm <sup>2</sup>	150
Resistencia al choque ( barra con muesca de 0,5 plg. en cuadro),Kg.-m	+2,07
Dureza Brinell (bola de 2 mm de diámetro., 3 Kg.).	2
Conductividad térmica, cal/ (seg.) (cm <sup>2</sup> ) (° C/cm.)	0,0007
Alargamiento en la ruptura	500

Estas propiedades se refieren a un producto con peso molecular aproximado de 25.000. La elección del peso molecular necesario para diferentes usos significa, en general, una transacción entre las propiedades mecánicas mejoradas del material de alto peso molecular y la mayor facilidad para fabricar artículos con el material de peso molecular más bajo. En la tabla 2.4 se observa las propiedades de acuerdo a lo dicho.

Tabla 2.4 Relación entre las propiedades del polietileno que están o no en función del peso molecular.

<b>Propiedad = f( peso molecular)</b>	<b>Propiedad NO es f(peso molecular)</b>
Resistencia a la tracción Resistencia al choque Resistencia al desgarramiento Alarg. en la rotura por tracción Flexibilidad a bajas Temperaturas	Densidad Punto de fusión Calor específico Dureza Módulo de Young

La tensión en el punto de ruptura depende del peso molecular; pero para un material con peso molecular de 25.000 puede ser el doble de la tensión en el punto cedente. La forma de la curva general de esfuerzo-deformación depende de la temperatura y de la rapidez de aplicación del esfuerzo. A medida que aumenta la

temperatura, baja el punto cedente; mientras que un aumento en la rapidez con que se aplica la tracción da como resultado un aumento del punto cedente y de la resistencia final, y también en la perfección de la orientación del ejemplar estirado en frío. A medida que se reduce la temperatura por debajo de las temperaturas ordinarias, se reduce el alargamiento en la ruptura y se alcanza una temperatura en la cual no se produce estirado en frío, rompiéndose el ejemplar bruscamente con sólo un alargamiento del 10%.

Esta temperatura es aproximadamente aquella en que un ejemplar no puede ser doblado más que en un grado muy limitado sin que se rompa como si fuera un material quebradizo. Una propiedad extraordinaria del polietileno de peso molecular inferior a 20.000 es su sensibilidad al agrietamiento cuando se somete a tensiones en contacto con ciertos líquidos, en especial orgánicos polares [5].

Todas las propiedades mecánicas del polietileno son sensibles a la historia térmica del ejemplar. Si el material se enfría rápidamente desde el estado fundido, el sólido tiene densidad y cristalinidad menores; por consiguiente es

más blando y más flexible y, por lo menos al principio, es más resistente al agrietamiento a bajas temperaturas y al agrietamiento en presencia de líquidos orgánicos. Por otro lado, es probable que contenga más tensiones internas, el polietileno sólido sufre deslizamiento en frío, como sucede a muchos otros polímeros; pero en virtud de su naturaleza cristalina, este corrimiento es muy pequeño a temperaturas ordinarias, salvo bajo cargas que se aproximan al punto de cedencia. Sin embargo, a temperaturas más altas, el corrimiento en frío es apreciable.

Cuando se somete una muestra a tracción, esfuerzo cortante o compresión, al principio se deforma rápidamente; pero la rapidez con que varían las dimensiones disminuye a medida que pasa el tiempo; por lo menos durante un cierto tiempo, la deformación es aproximadamente una función lineal del logaritmo del tiempo de aplicación. A temperaturas más altas y con tensiones mayores se produce una deformación permanente de la muestra.

Algunas propiedades de los PEBD y PEAD están descritas en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Propiedades de polietilenos.

<b>Propiedad</b>	<b>PEBD</b>	<b>PELBD</b>	<b>PEAD</b>
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	0,92-0,93	0,922-0,926	0,95-0,96
Resistencia a la tracción x 1000 psi	0,9-2,5	1,8-2,9	2,9-5,4
Elongación, %	550-600	600-800	20-120
Cristalinidad, %	65	....	95
Rigidez dieléctrica, V/mill.	480	....	480
Máxima temperatura de uso, ° C	82-100	480	80-120

Solubilidad: El polietileno es insoluble en agua y sólo absorbe ésta en un grado muy limitado. La absorción de agua aumenta con la temperatura.

Permeabilidad: Una propiedad importante del polietileno es su pequeña permeabilidad al vapor de agua. Por otro lado, el polietileno tiene una permeabilidad elevada a los vapores orgánicos y al oxígeno. La permeabilidad aumenta con la temperatura.

Propiedades eléctricas: Como podía esperarse de su composición química, el polietileno tiene una conductividad

eléctrica pequeña, un factor de potencia bajo y una resistencia dieléctrica elevada. Las propiedades eléctricas no son especialmente sensibles a la humedad en virtud de la absorción muy pequeña de agua por el polietileno; pero el factor de potencia es probable que aumente si se somete el polietileno a la oxidación [6].

La oxidación térmica del polietileno es importante en el estado fundido, porque influye sobre el comportamiento en los procesos de tratamiento, y en el estado sólido porque fija límites a ciertos usos. Los principales efectos de la oxidación del polietileno son variaciones en el peso molecular que se manifiestan primero por cambios en la viscosidad y cuando son más intensos, por deterioro en la resistencia mecánica, variación en las propiedades eléctricas (especialmente aumento en el factor de potencia), desarrollo de olor rancio y cambio de color al amarillo, pardo y, en casos extremos, al negro. Una oxidación intensa, especialmente a temperaturas elevadas, conduce a la degradación de la cadena y a la pérdida de productos volátiles: monóxido de carbono, agua y ácidos grasos, y el producto se hace quebradizo y parecido a la cera.



Las tres propiedades moleculares básicas de los polietilenos (densidad, peso molecular promedio y distribución del peso molecular) son las que afectan a la mayoría de las propiedades esenciales en el uso de polietileno para obtener productos de buena calidad. Pequeñas variaciones en la estructura molecular pueden mejorar o afectar algunas de estas propiedades considerablemente.

Las propiedades eléctricas de las resinas de polietileno, por otra parte, son poco afectadas por estos tres factores moleculares básicos (ya que la composición química de los diversos polietilenos es idéntica; esto es,  $[\text{CH}_2]_n$ ).

### **Efectos producidos por variaciones en la densidad.**

Una clasificación general basada en tres clases distintas de densidad es ahora generalmente aceptada en la industria (tabla 2.6).

Tabla 2.6 Variedad de densidades de polietileno.

<b>Baja densidad</b>	0,910 a 0,925 gr./cm <sup>3</sup>
<b>Mediana densidad</b>	0,926 a 0,940 gr./cm <sup>3</sup>
<b>Alta densidad</b>	0,941 a 0,965 gr./cm <sup>3</sup>

Los polietilenos más densos son lógicamente más pesados, pero aún los artículos fabricados con los polietilenos de alta densidad flotarán en agua. Esta es una ventaja para el moldeador pues le permitirá obtener más volumen por cada kilogramo de polietileno que usando cualquier otro plástico tabla 2.7.

Tabla 2.7 Propiedades de polietileno en función de la densidad.

Densidad	0,915- 0,918	0,924	0,929- 0,938
Punto de ablandamiento		más elevado	máximo
Resist. al estiramiento		más elevada	máxima
Resist. a la tracción	máxima	más elevada	
Elongación en rotura	máxima	más elevada	
Rigidez		más elevada	máxima
Resistencia a la contracción	máxima	más elevada	
Resistencia a la deformación	máxima	más elevada	
Resistencia al impacto	máxima	más elevada	

Dentro de ciertas limitaciones el peso molecular promedio es inversamente proporcional al índice de fusión, es decir si el peso molecular promedio aumenta, el índice de fusión disminuye y viceversa [7].

El índice de fusión describe la fluencia de una resina de polietileno a una determinada temperatura (190° C) y a una determinada presión. Si el índice de fusión de una resina es bajo, su viscosidad es elevada y viceversa, siendo la viscosidad de fusión la resistencia de la resina fundida a fluir durante la formación de película, tubería o recipientes. Por lo tanto, las resinas de mayor índice de fusión fluyen más fácilmente en el estado de fusión que aquellas con menor índice. La fluencia del polietileno fundido es afectada por condiciones de procesado tales como presión, temperatura, y estas condiciones pueden variar extensamente.

El índice de fusión debe ser utilizado juntamente con otras normas para describir la fluencia y otras propiedades de las resinas. En lugar del índice de fusión, los moldeadores por inyección se refieren a resinas de PE de mediana, alta o muy alta fluencia. Los moldeadores por extrusión se

referirán a polímeros de baja, mediana o alta velocidad de extrusión.

Generalmente las resinas de polietileno más indicadas para aplicaciones tales como extrusión de película, y soplado de botellas deben tener un peso molecular promedio un tanto mayor que aquellas resinas indicadas para otras aplicaciones, tales como moldeo por inyección.

La distribución del peso molecular ofrece una idea general sobre la proporción de las cadenas moleculares grandes, medianas o pequeñas de la resina. La distribución del peso molecular se considera estrecha si la resina está formada por cadenas de un largo cercano al promedio, y se considera amplia si la resina está formada por cadenas de longitud muy variada. Las resinas de PE con una distribución del peso molecular estrecha son superiores en algunas propiedades esenciales, mientras que aquellas con una amplia distribución son mejores con respecto a otras propiedades.

En la tabla 2.8 se muestra el efecto producido por las tres propiedades moleculares básicas.

Tabla 2.8 Propiedades moleculares básicas del HDPE.

PROPIEDADES FÍSICAS	Si se aumenta la densidad (Cristalinidad) entre 0,915 y 0,938)	Si se aumenta el peso molecular promedio o se disminuye el índice de Fusión (Fluidez)	Si se hace más estrecha la distribución del peso Molecular
Viscosidad de la masa fundida	más elevada	más elevada	ligeramente mayor
Punto de ablandamiento	mucho mayor	ligeramente mayor	ligeramente mayor
Resist. al estiramiento	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Resist. a la tracción en rotura	ligeramente menor	más elevada	ligeramente mayor
Elongación en rotura	menor	más elevada	...
Resist. al escurrimiento	más elevada	Ligeramente mayor	más elevada
Rigidez a la flexión	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Flexibilidad	menor	...	...
Dureza	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Resistencia a la abrasión	más elevada	ligeramente mayor	...
Contracción	más elevada	más elevada	...
Deformación	ligeramente mayor	más elevada	más elevada
Resist. al impacto (Tenacidad)	menor	más elevada	...
Resist. a la fragilidad	menor	ligeramente mayor	ligeramente mayor
Resist. a la desgarradura	Depende del proceso de fabricación de la película y dirección de la rotura.		

Resist. a la fragilidad a bajas temperaturas	menor	más elevada	más elevada
Resist. al cuarteo bajo tensión ambiental	menor	más elevada	ligeramente mayor
Impermeabilidad a la absorción de grasas y aceites.	mucho mayor	ligeramente mayor	...
Transparencia	más elevada	menor	...
Ausencia de opacidad	más elevada	menor	...
Brillo	más elevada	menor	...
Tiraje	ligeramente mayor	mucho menor	menor
Resist. al pegado entre sí y al molde	más elevada	ligeramente mayor	...
Propiedades eléctricas.	ligeramente mayor	no afecta	no afecta

Como se observa en la tabla 2.8 las relaciones entre estas tres propiedades moleculares básicas y otras propiedades físicas del PE no siempre son sencillas y claras. Otras características estructurales aparte de las tres nombradas, ejercen con frecuencia su influencia sobre las propiedades físicas de la resina. Las condiciones de operación pueden alterar la orientación (alineamiento) de las moléculas y por lo tanto afectar las propiedades de la resina.

Con un incremento en la densidad se mejoran propiedades tan importantes como el punto de ablandamiento, impermeabilidad a gases y líquidos, claridad de la película (transparencia y ausencia de opacidad) y brillo, pero afectando a la flexibilidad y tenacidad.

Un aumento en el peso molecular promedio puede hacer a la resina más apropiada para usos en que se requiera mayor tenacidad. Un artículo fabricado con una resina de polietileno de mayor peso molecular promedio, tendrá mayor resistencia al cuarteo bajo tensión ambiental, es decir cuartearse cuando es sometido a esfuerzos en presencia de líquidos tales como detergentes, aceites o solventes.

Dado que la viscosidad (la propiedad de fluir más lentamente en estado de fusión) aumenta con el peso molecular, las resinas de PE de más alto peso molecular son más difíciles de extruir y, por lo tanto, requieren temperaturas más elevadas. Por otra parte, las resinas de PE de menor peso molecular se utilizan para aplicaciones tales como moldeo por inyección a menores temperaturas y ciclos más cortos.

## **2.2 SEPARACIÓN Y RECICLAJE DE POLIETILENOS.**

En un mundo globalizado con una marcada economía de mercado instaurada a nivel global, donde el consumo es quien marca el camino de las economías y de las políticas de las grandes potencias, ocasiona que todos los objetos tengan precio y es factible de emprender un negocio en su entorno; la basura nunca antes había tenido tanto valor como en la actualidad y nunca antes había existido un sistema eficiente de gestión de residuos y aplicación de tecnología medioambiental, para la reutilización de materiales con diferentes propósitos.

La reutilización de residuos es desde hace algunos años motivo de discusión ya que la mayoría eran contaminantes del medio ambiente.

Básicamente el objetivo de la reutilización de materiales es impedir que los residuos producidos se desperdicien e intentar emplearlos de nuevo como parte de la materia prima para la producción, en la cuál las sustancias se incorporan en un porcentaje adecuado con materia prima virgen para no afectar la calidad del producto. Gracias al



reciclado puede reducirse las cantidades de residuos, así como las de materia prima y energía necesaria para la obtención de material nuevo. En este sentido, el reciclado es una manera de reducir las cargas sobre el medio ambiente. El provecho que obtengan las personas y el entorno en que se mueven es, a pesar de todo, fuertemente dependiente de lo perfecta que sea la ejecución de estos ciclos, de lo costosos que resulten y de la posible reutilización de los productos recuperados.

### **2.2.1 POLIETILENO RECICLADO EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL.**

En Ecuador, el reciclaje de plásticos y otros materiales se inició alrededor del año de 1970. En principio ciertas fábricas de juguetes combinaron plástico reciclado con materia prima virgen y posteriormente algunos micro-empresas utilizaron film de polietileno de baja y alta densidad para fabricar tuberías FLEX en procesos de extrusión, realmente era poco lo que se usaba de plástico reciclado.

Actualmente son muchas las aplicaciones que se le ha dado al plástico reciclado, lo que ha ocasionado que la demanda crezca considerablemente. En el Ecuador se reciclan aproximadamente 36.000 toneladas al año, de las cuales una parte se destina al consumo interno y otra parte se exporta a EEUU, Asia, entre otros.

Dentro de los tipos de productos que se reciclan para ser reutilizados como materia prima podemos encontrar para los procesos de inyección: jabs, mesas, sillas entre otros y para los procesos de extrusión: film y soplado de polietileno de baja y alta densidad, los cuales en combinación con materia prima virgen se utilizan para la fabricación de tuberías flex, películas (utilizadas en la agricultura, floricultura, fundas de basura) y perfiles para las cajas de banano de exportación. El PVC reciclado es utilizado para fabricar botas, sandalias, las que a su vez son reutilizadas para fabricar plantillas de zapatos.

Las cantidades estimadas que se reciclan en Ecuador son:

- Cartón 110.000 Ton/anuales.
- Papel 35.000 Ton/anuales.
- Plástico 36.000 Ton/anuales.

- Chatarra no ferrosos 220.000 Ton/anuales.
- Chatarra ferrosas 25.000 Ton/anuales.
- Vidrios 8.000 Ton/anuales.

El reciclaje continuará con un alto desarrollo, por lo que es necesario un trabajo en conjunto como sociedad para la mejor utilización de este proceso [8].

### **2.2.2 Métodos utilizados.**

Existen diversos métodos en el tratamiento del reciclado de los plásticos, denominados:

- Primario.
- Secundario.
- Terciario.
- Cuaternario.

El tratamiento primario consiste en operaciones mecánicas para obtener un producto de similares características que el producto original. Este reciclado se aplica para el aprovechamiento de recortes de las plantas de producción y transformación, y

corresponde a un porcentaje muy reducido de los denominados residuos plásticos.

El tratamiento secundario, consistente en la fusión, los desechos son convertidos en productos de diferentes formas y con mayor espectro de aplicaciones, las cuales son diferentes a las del plástico original. Esta es la tecnología más usada hasta ahora, particularmente en la industria del automóvil, y se estima en sólo el 20% los plásticos que pueden ser reciclados de esta forma.

El reciclado terciario, o "reciclado químico", buscan el aprovechamiento integral de los elementos constitutivos del plástico, por transformación del mismo en hidrocarburos, los cuales pueden ser materias primas integrables nuevamente a la ruta de obtención de plásticos o en otras rutas de la industria petroquímica. Los métodos pueden ser químicos o térmicos, dependiendo del tipo de polímero.

El reciclado cuaternario consiste en la incineración para recuperar energía. Actualmente es muy contestado socialmente por los problemas medioambientales que genera.

La ruta química del reciclado terciario es la solvólisis o descomposición química, la cual se puede realizar por diferentes vías: metanólisis, glicólisis, hidrólisis y aminólisis [7].

Es de destacar que los procesos de metanólisis (con metanol) y glicólisis (con etilenglicol) eliminan impurezas de los plásticos y los compuestos obtenidos se pueden dedicar a la fabricación de artículos con restricciones de calidad como el de envasado de alimentos.

### **2.3 ADITIVOS A UTILIZAR.**

Los aditivos son materiales inorgánicos y orgánicos, que incorporados a los plásticos antes y durante su transformación, tienen el fin de modificar sus propiedades, mejorar su presentación, aumentan la resistencia a medios externos y facilitar su procesamiento.

Para poder seleccionar el tipo de aditivo adecuado y la cantidad a usar es necesario determinar las características y propiedades del plástico que son requeridas tanto por el procesador como por el usuario final, ya que cada polímero tiene su propio

comportamiento. Un aditivo debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Fácil de disipar en el plástico.
- Mejorar propiedades del producto.
- Facilitar el procesamiento.
- No ser tóxico, no desarrollar efectos secundarios.

Los aditivos se comercializan en diferentes presentaciones como: Líquidos, polvos, pastas y masterbatch.

Masterbatch se define como un compuesto de plástico el cual contiene una alta concentración de uno o más aditivos. Se utilizan en cantidades específicas con el plástico base con el fin de obtener la concentración final requerida.

Una cantidad virtualmente infinita de aditivos, pigmentos, colorantes, cargas y modificadores diversos permiten a los fabricantes de compuestos impartir cualidades específicas a las materias primas, expandiendo la variedad de oportunidades de aplicación y muchas veces obteniendo costos menores.

Actualmente existe en el mercado una gran variedad de aditivos que se utilizan para modificar las propiedades y características de procesamiento de los materiales plásticos. De acuerdo a la propiedad o característica de procesamiento que modifiquen o desarrollen, los aditivos se clasifican de la siguiente manera.

- Aditivos de procesamiento.

- Estabilizadores al calor.

- Antioxidantes.

- Lubricantes.

- Agentes deslizantes.

- Modificadores de flujo.

- Modificadores de viscosidad.

- Aditivos funcionales.

- Cargas.

- Plastificantes.

- Pigmentos.

- Modificadores de impacto.

- Retardante a la flama.

- Supresores de humo.

- Agente antibloqueo.

- Agentes antiestático.

- Absorbedores de luz UV.

Fungicidas.

Agentes espumantes.

Agentes de entre cruzamiento.

Aromatizantes.

- Aditivos multi-funcionales.

Agentes nucleantes.

Agentes de acoplamiento.

Negro de humo.

#### **Aditivo de procesamiento:**

Los aditivos de procesamiento tienen la función principal de evitar que el polímero se degrade durante el tiempo que permanece en el equipo de manufacturación, proporcionándole cualidades que facilitan su procesamiento como son:

- Elimina la adherencia del plástico fundido con el husillo, el cilindro y otras partes del equipo.
- Mejora el flujo para aumentar la velocidad de producción.
- Disminuye la degradación ante el efecto de temperatura.
- Reducen desperdicios y costos aumentando la productividad.



## ANTIOXIDANTES.

Estos aditivos ayudan a inhibir o retardar el mecanismo de oxidación-degradación de los polímeros que se produce durante la fabricación o transformación.

Durante la polimerización para la producción de plástico intervienen catalizadores, estos pueden no ser eliminados completamente en la etapa de purificación del polímero, por lo que las impurezas de catalizador en el plástico a procesar, originan que se inicie la oxidación.

Tabla 2.9 Descripción de los antioxidantes.

ANTIOXIDANTES	FUNCION	FAMILIA	CARACTERISTICAS
PRIMARIOS	Inhibe la degradación por oxidación	Fenoles	Buena estabilidad térmica Variedad de grados para diferentes temperaturas de proceso No manchan ni causan decoloración
		Aminas	Alta estabilidad térmica Manchas y decoloración limitados a productos de color oscuro
SECUNDARIO	Se combinan con los antioxidantes primarios para proporcionar mayor estabilidad	tioeteres	Buena estabilidad térmica No existe decoloración Desarrollan color Interferencia con aminas usadas como absorbentes de luz UV
			Buena estabilidad térmica
		Fosfitos	Contacto con alimentos en forma indirecta

Para el presente trabajo se utilizó CYANOX 2777 antioxidante la cuál es una mezcla de 1:2 de CYANOX 1790 antioxidante y fosfitos.

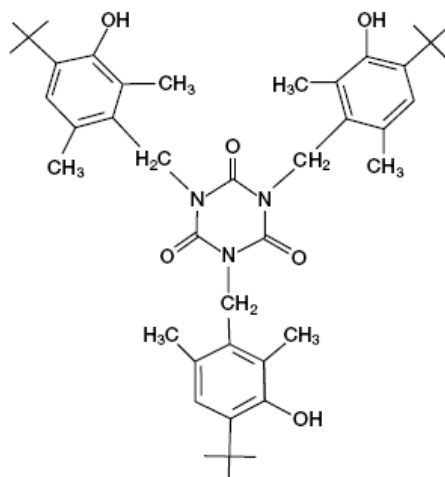


Figura 2.3 Estructura del antioxidante CYANOX 1790.

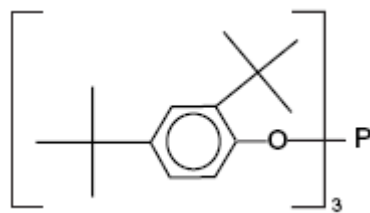


Figura 2.4 Estructura de fosfito.

Tabla 2.10 Hoja técnica del antioxidante MB AOX CYANOX 2777.

<b>MB AOX</b>	
I QUIMICAL MASTERBATCH AOX es un concentrado en forma granulada del Antioxidante CYANOX 2777 de CYTEC INDUSTRIES disperso al 8% en polietilenos de baja densidad y lineal de baja densidad.	
<b>INFORMACIÓN TÉCNICA</b>	
Punto de fusión °C	130.
Número de acido CYANOX 1790%	1,0 máx. 33,3+-3.
Gravedad específica (25°C)	1,07.
Apariencia	Gránulos blancos.
Resina base	LDPE y LLDPE.
Fluidez de la resina base	40030
Resistencia térmica	Más de 300°C
Compatibilidad	Poliolefinas
Toxicidad	Puede entrar en contacto con alimentos
Aplicaciones	Extrusión e inyección de poliolefinas
Dosificación	0.8 - 1.5 %
Embalaje	Fundas de 25 Kg.

## 2.4 Métodos para evaluar propiedades en polietilenos reciclados.

### 2.4.1 Propiedades Reológicas: Índice de fluidez.

Estos métodos de pruebas cubren mediciones de la tasa de extrusión de resinas fundidas a través de un dado de una longitud y diámetro específico bajo condiciones prescritas de temperatura, carga, y posición de pistón en

el barril, así como la medición cronometrada del tiempo de salida de cierta longitud de material fundido. Existen dos tipos de procedimientos para poder medir el índice de fluidez los cuales se detallan a continuación.

El procedimiento A es una operación manual de corte basada en el tiempo usado para materiales que tienen tasas de flujo aproximadas entre 0.15 y 50 g/10 min.

El procedimiento B es una medición de la tasa de flujo cronometrada automáticamente usada para materiales con flujos desde 0.50 hasta 900 g/10 min. Mediante ambos procedimientos, la carrera del pistón es generalmente la misma durante la medición cronometrada; el pie del pistón está entre 46 y 20.6 mm (1.81 y 0.81 in.) sobre el dado.

#### **2.4.1.1 Características.**

Este método sirve para indicar la uniformidad de la tasa de flujo de polímero asemejando que fue fabricado mediante un proceso individual y en este caso, puede ser indicativo de uniformidad de

otras propiedades. Sin embargo, la uniformidad de la tasa de flujo entre varios polímeros como si fueran hechos mediante varios procesos no pueden, en ausencia de otras pruebas, indicar uniformidad de otras propiedades.

La tasa de flujo obtenida con el plastómetro de extrusión no es una propiedad fundamental del polímero. Este es un parámetro definido empíricamente, críticamente influenciado por las propiedades físicas y estructura molecular del polímero y las condiciones de medición. Las características reológicas de mezclas de polímeros dependen de un cierto número de variables.

#### **2.4.1.2 Equipos a utilizar.**

Plastómetro.- El aparato será un pistón de peso muerto consistente de un cilindro de acero calentado y controlado termo-estáticamente, con un dado en la parte más baja y un pistón pesado operando dentro del cilindro.

Cilindro.- el cilindro de acero tendrá un diámetro de 50.8 mm (2 in.), 162 mm (6 3/8 in.) en longitud con un agujero recto de diámetro  $9.5504 \pm 0.0076$  mm ( $0.376 \pm 0.0003$  in.), desplazado 4.8 mm ( $3/16$  in.) desde el eje del cilindro. Los agujeros para un sensor térmico (termorregulador, termistor, etc.) y un termómetro estarán provistos según lo indicado en la figura 2.5.

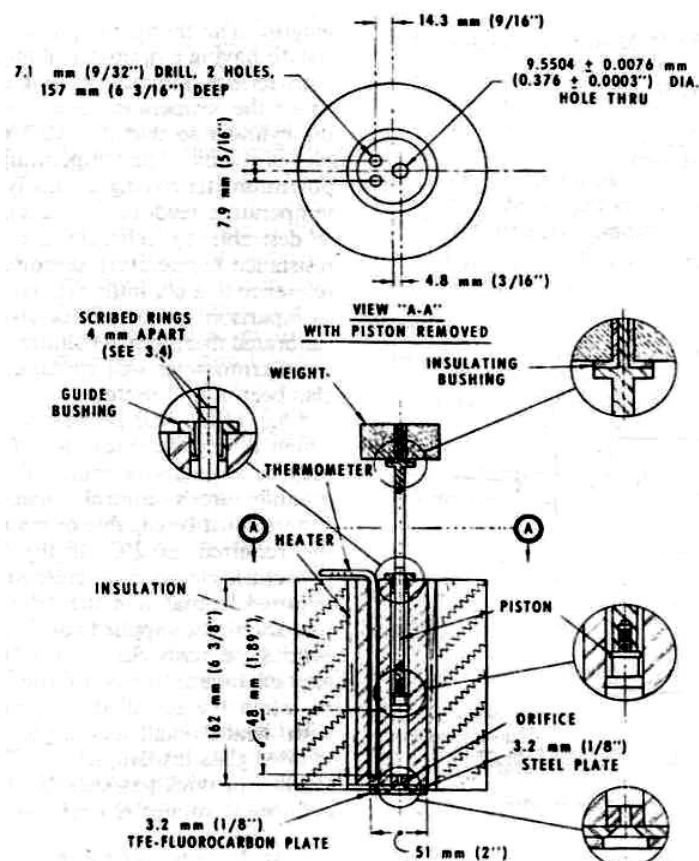


Figura 2.5 Arreglo general del plastómetro de extrusión.

Un plato de 3.2 mm (1/8 in.) será añadido al final del cilindro para retener el dado. Un agujero en este plato, centrado bajo el dado y avellanado desde abajo, permitiendo el libre paso de lo extruido. El cilindro puede ser soportado por al menos dos tornillos de alta dureza de 6.4 mm (1/4 in.) en la parte superior (posicionado radialmente en ángulos rectos con respecto a las cargas aplicadas) o por al menos dos barras roscadas de 10 mm de diámetro dentro del lado del cilindro para añadirlo a un soporte vertical. El perforado del cilindro deberá ser acabado por técnicas conocidas.

Dado.- el exterior del dado de acero tendrá como un diámetro tal que este caiga libremente al final del agujero de 9.5504 mm (0.3760 in.) de diámetro en el cilindro. El dado tendrá un taladrado recto y fino de  $2.0955 \pm 0.0051$  mm ( $0.0825 \pm 0.0002$  in.) de diámetro y tendrá  $8.000 \pm 0.025$  mm ( $0.315 \pm 0.001$  in.) de longitud. El taladrado y su acabado son críticos. Este no tendrá marca visible de perforado u otra marca de

herramientas y no tiene que tener excentricidad detectable.

#### **2.4.1.3 Preparación de probetas.**

El espécimen de prueba puede ser en cualquier forma que puede ser introducida en el hueco del cilindro, por ejemplo, polvo, gránulos, strips o film, o slugs moldeados. Esto puede ser deseable para preformar o peletizar un polvo.

#### **Condiciones.**

Muchos materiales termoplásticos no requieren preparación previa a la prueba.

#### **Procedimiento.**

- Cheque el dado, el cilindro y las dimensiones de posición.
- Refiérase a la tabla 1 de la norma ASTM D1238 (figura 2.6) para la selección de condiciones de temperatura y carga en concordancia con las especificaciones del material.





D 1238

TABLE 1 Standard Test Conditions, Temperature, and Load

Condition		Temperature, °C	Total Load Including Piston, kg	Approximate Pressure	
Obsolete-For- reference only	Standard Designation			kPa	psi
A	125/0.325	125	0.325	44.8	6.5
B	125/2.16	125	2.16	298.2	43.25
C	150/2.16	150	2.16	298.2	43.25
D	190/0.325	190	0.325	44.8	6.5
E	190/2.16	190	2.16	298.2	43.25
F	190/21.60	190	21.60	2982.2	432.5
G	200/5.0	200	5.0	689.5	100.0
H	230/1.2	230	1.2	165.4	24.0
I	230/3.8	230	3.8	524.0	76.0
J	265/12.5	265	12.5	1723.7	250.0
K	275/0.325	275	0.325	44.8	6.5
L	230/2.16	230	2.16	298.2	43.25
M	190/1.05	190	1.05	144.7	21.0
N	190/10.0	190	10.0	1379.0	200.0
O	300/1.2	300	1.2	165.4	24.0
P	190/5.0	190	5.0	689.5	100.0
Q	235/1.0	235	1.0	138.2	20.05
R	235/2.16	235	2.16	298.2	43.25
S	235/5.0	235	5.0	689.5	100.0
T	250/2.16	250	2.16	298.2	43.25
U	310/12.5	310	12.5	1723.7	250.0
V	210/2.16	210	2.16	298.2	43.25
W	285/2.16	285	2.16	298.2	43.25
X	315/5.0	315	5.0	689.5	100.0

Figura 2.6 Tabla de Condiciones, Temperatura y carga estándar para la prueba ASTM D1238.

- Fije la temperatura del plastómetro como la requerida para el material que será probado y con el voltaje aplicado a los calentadores como está detallado en la norma.
- Asegure que el agujero del plastómetro de extrusión está apropiadamente alineado en la dirección vertical.
- Limpie el aparato a fondo previamente para cada prueba. La posición del pistón y el dado en el cilindro se deben asentar firmemente en la base del plato. Mantenga la temperatura por al menos 15 minutos antes de empezar la prueba, cuando el equipo sea usado repetidamente, no será necesario calentar el pistón y el dado por 15 minutos.

- Una vez colocado el pistón cargado, estar atento a que la alarma programada suene para cortar una porción del material.
- Las próximas alarmas serán continuas, por lo tanto, se obtendrá porciones de material fundido del mismo peso. En cada una de las alarmas cortar las porciones indicadas.
- Descargar cualquier resina remanente y limpie el dado y el cilindro [9].

## **2.4.2 Propiedades mecánicas: impacto, módulo de elasticidad, resistencia a la tensión.**

### **2.4.2.1 Características**

#### **Resistencia al Impacto ASTM D-256.**

La prueba de resistencia de impacto se define como la energía cinética necesaria para iniciar y continuar la fractura hasta que el modelo este

roto. Esta prueba puede usarse como un rápido y fácil control de calidad para determinar si el material cumple el requerimiento de resistencia al impacto requerido o para comparar las propiedades de materiales para la resistencia general.

**Datos:**

ASTM energía de impacto se expresa en J / m o ft-lb/in. Fuerza de impacto se calcula dividiendo la energía de impacto en J (o pies-lb) por el espesor de la muestra. El resultado de la prueba suele ser la media de 5 especímenes.

La fuerza del impacto se expresa en kJ/m<sup>2</sup> y se calcula dividiendo la energía de impacto en J por el área bajo la muesca. El resultado de la prueba suele ser la media de 10 ejemplares. Cuanto mayor sea el número resultante, más duro es el material.

Estos métodos de pruebas cubren la determinación de la resistencia de los plásticos a tipo de péndulos-martillos estandarizados, montados en máquinas estandarizadas, de especímenes estándar fracturados con una oscilación del péndulo. Las pruebas estándares para estos métodos de pruebas requieren especímenes hechos con una hendidura aserrada [10].

En los métodos de prueba A, C, y D, la hendidura produce una concentración de esfuerzos que incrementa la probabilidad de una fractura, más bien dúctil, vidriosa.

Los resultados de todos los métodos son reportados en términos de energía absorbida por unidad de ancho de espécimen o por unidad de área transversal bajo la hendidura.

### Tipos de pruebas.

En el método de prueba A, el espécimen es sostenido como una viga en cantilever vertical y es rota mediante una simple oscilación del péndulo. La línea de contacto inicial está a una distancia fijada desde el sujetador del espécimen y desde el centro de la hendidura y en la misma cara de la hendidura.

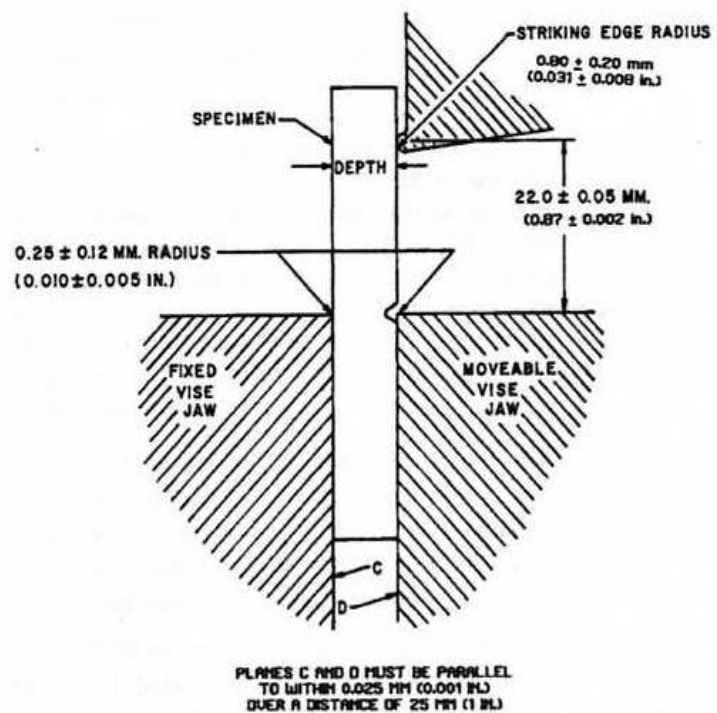


Figura 2.7 Relación del tornillo de sujeción, espécimen, y borde de impacto entre sí para métodos de pruebas IZOD A y C.

**Significado y uso.**

Antes de proceder con los métodos de prueba, una breve referencia puede ser hecha a la especificación del material que será probado. Cualquier preparación del espécimen de prueba, condicionamiento, dimensiones y parámetros de prueba cubiertos en las especificaciones de los materiales pueden tomarse con anterioridad sobre aquellos mencionados en estos métodos de pruebas. Si no hay especificaciones del material, entonces se aplican condiciones por defecto.

Las pruebas de impacto del péndulo indican la energía para romper un espécimen de prueba estándar de un tamaño específico bajo parámetros estipulados de montaje, ranurado y velocidad de impacto del espécimen.

La energía perdida por el péndulo durante la rotura del espécimen es la suma de:

- Energía para iniciar la fractura del espécimen.
- Energía para propagar la fractura a través del espécimen.
- Energía para lanzar el extremo o extremos libres del o de los especímenes rotos.
- Energía para curvar el espécimen.
- Energía para producir vibración en el brazo del péndulo.
- Energía para producir vibración libre o movimiento horizontal en la armadura o en la base de la máquina.
- Energía para superar la fricción en el rodamiento del péndulo y en el mecanismo indicado, y superar el arrastre de aire del péndulo.



- Energía para deformar plásticamente al espécimen en la línea de impacto.
- Energía para superar la fricción causada por el roce del golpeador (u otra parte del péndulo) sobre la cara de la inclinación del espécimen.

El tipo de falla para cada espécimen será grabado o anotado como uno de las cuatro categorías listadas como siguen:

- C= Rompimiento completo.*- un rompimiento donde el espécimen se separa en dos o más piezas.
- H= Rompimiento tipo Bisagra.*- un rompimiento incompleto, como que una parte del espécimen no puede soportarse a si mismo sobre la horizontal cuando la otra parte es sostenida verticalmente (menos que 90° incluido el ángulo).

- *P= rompimiento parcial.*- Un rompimiento incompleto que no entra en la definición del rompimiento tipo Bisagra, pero tiene fracturado al menos 90% de la distancia entre el vértice de la hendidura y el lado opuesto.
- *NB= No rompimiento.*- Un rompimiento incompleto donde la fractura se extiende menos del 90% de la distancia entre el vértice de la hendidura y el lado opuesto.

### **Resistencia y Módulo a la tracción ASTM D-638.**

Este método cubre la determinación de las propiedades tensoras de plásticos reforzados y no reforzados mediante la elaboración de especímenes de prueba estándar en forma de pesas y probados bajo condiciones definidas de pre-tratamiento, temperatura, humedad, y comprobación de velocidad de máquina.

Este método de prueba puede ser usado para probar materiales de cualquier espesor

superior a 14 mm (0.55 in.). Sin embargo, para probar especímenes en la forma de hojas delgadas, incluyendo films menores de 1.0 mm. (0.04 in.) en espesor, el Método de prueba D 882 es el método de prueba preferido. Para materiales con un espesor mayor que 14 mm (0.55 in.) deberán ser reducidos mediante mecanizado.

Los datos de prueba obtenidos por el método de prueba son relevantes y apropiados para uso en diseño en ingeniería. Los valores dados en unidades SI serán considerados como estándar.

#### **Uso y significado.**

Es visto que un material no puede ser probado sin también probar el método de preparación de aquel material. Ahora, cuando pruebas comparativas de materiales PER SE son deseadas, el más grande cuidado será ejecutado para asegurar que todos las

muestras son preparadas en exactamente la misma manera, a menos que la prueba incluya los efectos de preparación de las muestras.

Las propiedades de tensión pueden proveer datos útiles de propósitos de diseño en ingeniería de plásticos. Sin embargo, debido que el alto grado de sensibilidad exhibido por muchos plásticos a tasas de fatiga y condiciones del medio, los datos obtenidos por este método de prueba no pueden ser considerados válidos para aplicaciones que involucren escalas de tiempo-carga o medios ampliamente diferentes desde aquellos de este método de prueba.

#### **2.4.2.2 Equipos a utilizar.**

**Resistencia al Impacto ASTM D-256.**

**Prueba de la viga en cantilever – Método de Prueba A.**

### Aparatos.

La máquina consistirá de una base maciza en la cual es montado un tornillo de sujeción para agarrar al espécimen y será conectado, a través de una armadura rígida y rodamientos, un martillo tipo péndulo. La máquina tiene también que tener un mecanismo para agarrar y lanzar el péndulo y un mecanismo para indicar la energía de rompimiento del espécimen.



Figura 2.8 Péndulo de Impacto Tinius Olsen.

El péndulo consistirá de una simple o multi-brazos con un rodamiento en el final y en la cabeza, conteniendo al golpeador, en la otra. El brazo tiene que ser lo suficientemente rígido para mantener y las relaciones geométricas entre las partes de la máquina y el espécimen para así minimizar las pérdidas de energía vibracional que son siempre incluidos en la resistencia al impacto.

La posición del mecanismo de agarrado y soltado podrá ser tal que la altura vertical de caída del golpeador podrá ser  $610 \pm 2$  mm. ( $24.0 \pm 0.1$  in.). Este producirá una velocidad del golpeador al momento del impacto de aproximadamente 3.5 m [11.4 ft]/s. El mecanismo estará entonces construido y operado que este soltará el péndulo sin impartir la aceleración o vibración a este.

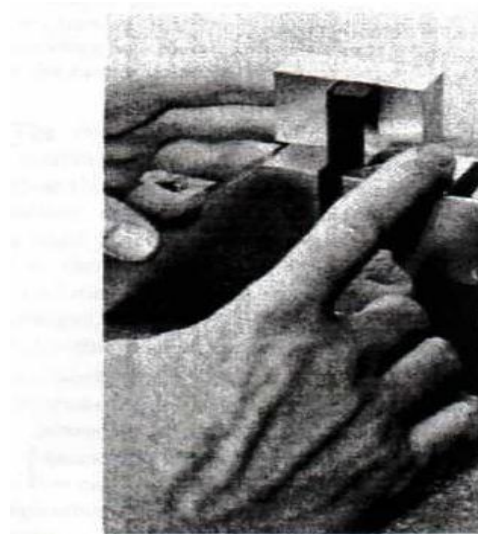


Figura 2.9 Posicionamiento de un espécimen en el banco de sujeción.

## **Resistencia y Módulo a la tracción ASTM D-638.**

### **Aparatos.**

Una máquina de pruebas del tipo de movimiento del cabezal a velocidad constante y comprenden esencialmente lo siguiente:

Miembro Fijo.- Un miembro fijo o esencialmente estacionario portando una muela de sujeción.

Miembro Móvil.- Un miembro móvil portando una segunda muela de sujeción.

Muela de sujeción.- Para sostener el espécimen de prueba entre el miembro fijo y el miembro móvil de la máquina de prueba. Cuando este tipo de muela es usada se debe tener extremo cuidado para asegurar que el espécimen de prueba es insertado y agarrado de tal manera que el eje largo del espécimen de prueba coincida con la dirección de estiramiento para que un movimiento de no rotación que puede inducir desprendimiento pueda ocurrir en las muelas.

El espécimen de prueba será agarrado de tal forma que el desprendimiento relativo a las muelas es prevenido en la medida que sea posible. La superficie de las muelas que son profundamente dentadas con un patrón similar a aquellos de una lima basta, las endentaduras de 2.4 mm (0.09 in.) a un lado y de 1.6 mm (0.06 in.) de profundidad, han sido encontradas satisfactorias para muchos termoplásticos. Las



endentaduras deben de ser mantenidas limpias y afiladas.

Mecanismo conductor.- Un mecanismo conductor para impartir al miembro movable una velocidad uniforme, controlada con respecto al miembro estacionario.



Figura 2.10 Tensómetro Qtest.

### 2.4.2.3 Preparación de probetas.

#### Resistencia al Impacto ASTM D-256.

#### Especímenes de prueba.

Los especímenes de pruebas se realizarán conforme a las dimensiones y geometría de la figura, excepto como se modifica en los siguientes puntos. Para asegurar el correcto contorno y condiciones de la hendidura especificada, todos los especímenes serán hechos de acuerdo a lo indicado a continuación.

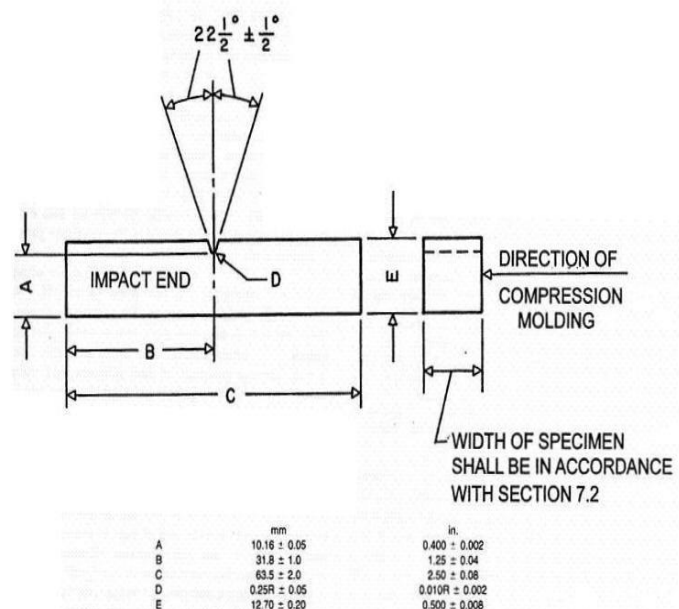


Figura 2.11 Dimensiones de un espécimen de prueba tipo IZOD.

Estudios han mostrado que, para algunos materiales, la localización de la hendidura en el espécimen y la longitud del impacto final pueden tener un efecto ligero en la medida de resistencia al impacto. Por consiguiente, a menos que sea especificada de otra forma, medidas de cuidado deben ser tomadas para asegurar que el espécimen esté hecho con las dimensiones mostradas en la figura 2.11.

#### **Hendidura de los especímenes.**

La hendidura será realizada en una máquina moledora, en un torno o en otra máquina herramienta apropiada. La velocidad de recorrido y la velocidad de corte serán constantes a lo largo de la operación. Para este caso es recomendado usar un líquido o gas refrigerante para el enfriamiento del espécimen. Pero de preferencia se puede usar sierras debido a la comodidad de corte del perfil del espécimen y además por ser

un corte suavizado en comparación a los otros métodos [11].

El perfil de los dientes de corte será como producir una hendidura del contorno y la profundidad en el espécimen de prueba. El ángulo de la hendidura será de  $45 \pm 1^\circ$  con un radio de curvatura en la cúspide de  $0.25 \pm 0.05$  mm [ $0.010 \pm 0.002$  in].

#### **Condicionamiento.**

Los especímenes de prueba deberán estar a  $23 \pm 2^\circ$  C [ $73 \pm 3.6^\circ$  F] y  $50 \pm 5\%$  de humedad relativa por no menos de 40 horas antes de hacer la hendidura y previo a la prueba, a menos que este pueda ser documentado (entre el proveedor y el cliente) que un tiempo de acondicionamiento más corto es suficiente para un material dado para alcanzar el equilibrio de resistencia de impacto.

**Procedimiento.**

Al menos 5 y preferiblemente 10 o más determinaciones individuales de resistencia al impacto deberán ser realizadas de cada muestra a ser probada bajo las condiciones de prueba, mencionadas anteriormente.

Si la máquina está equipada por un sistema indicador digital, seguir las instrucciones del fabricante para corregir la fricción. Si fricción excesiva es indicada, la máquina será ajustada antes de comenzar la prueba.

Medir y anotar el espesor de cada espécimen después de realizar la hendidura cercanamente a 0.025 mm [0.001 in]. Medir el espesor en un lugar adyacente a la muesca centrada sobre el plano antes de fracturar.

Medir y anotar la profundidad del material restante en el espécimen bajo la hendidura de

cada espécimen cercanamente a 0.025 mm [0.001 in]. El espécimen estará aproximadamente vertical entre los yunques.

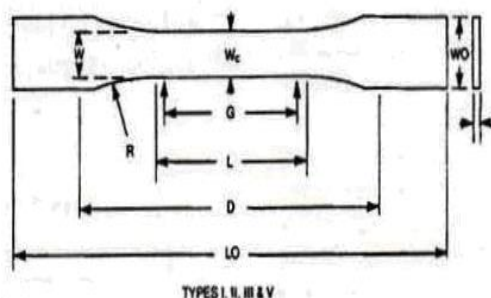
Posicionar el espécimen precisamente de manera que quede rígido pero no apretado, agarrado en el tornillo de sujeción. Poner especial atención de asegurarse que el “extremo impactado” del espécimen es el extremo proyectado sobre el tornillo de sujeción. Suelte el péndulo y anote la energía de quiebre indicada del espécimen junto con una descripción de la apariencia del espécimen roto.

### **Resistencia y Módulo a la tracción ASTM D-638.**

#### **Especimen de Prueba.**

Plásticos rígidos y semi-rígidos.- El espécimen de prueba será conformado con las dimensiones mostradas en la figura 2.12. El espécimen tipo I

es el espécimen preferido y será usado donde el material tenga un espesor de 7 mm o menor es permitido.



Specimen Dimensions for Thickness,  $T$ , mm [in.]<sup>A</sup>

Dimensions (see drawings)	7 [0.28] or under	
	Type I	Tolerances
$W$ —Width of narrow section <sup>E, F</sup>	13 [0.50]	$\pm 0.5$ [ $\pm 0.02$ ] <sup>B, C</sup>
$L$ —Length of narrow section	57 [2.25]	$\pm 0.5$ [ $\pm 0.02$ ] <sup>C</sup>
$W_0$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 [0.75]	+ 6.4 [+ 0.25]
$W_0$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	+ 3.18 [+ 0.125]
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 [6.5]	no max [no max]
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 [2.00]	$\pm 0.25$ [ $\pm 0.010$ ] <sup>C</sup>
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	$\pm 0.13$ [ $\pm 0.005$ ]
$D$ —Distance between grips	115 [4.5]	$\pm 5$ [ $\pm 0.2$ ]
$R$ —Radius of fillet	76 [3.00]	$\pm 1$ [ $\pm 0.04$ ] <sup>C</sup>
$R_0$ —Outer radius (Type IV)	...	$\pm 1$ [ $\pm 0.04$ ]

Figura 2.12 Especimen de prueba de tensión y medidas.

### Preparación.

Los especímenes de prueba serán preparados por operaciones de maquinado, o corte de dado, desde materiales en hojas, platos, planchas o formas similares.

# CAPÍTULO 3

## **3. EVALUACIÓN PROPIEDADES DE POLIETILENOS RECICLADOS.**

En este capítulo se estudia los dos tipos de mezclas utilizados, PEAD reciclado con aditivo y sin aditivo. El trabajo se centra en conocer el comportamiento de las mezclas con respecto al reproceso y estimar la evolución de las propiedades usando aditivo MB AOX CYANOX 2777.

### **3.1 Descripción de mezclas.**

Para determinar la variación de las propiedades mecánicas y reológicas en los distintos ciclos de extrusión se realizó dos tipos de mezclas.

- 10 Kg. de PEAD reciclado post-consumo.
- 10 Kg. de PEAD reciclado post-consumo + 1.5% de antioxidante MB AOX CYANOX 2777.



Luego de adquirir el material PEAD reciclado, se procedió a realizar la limpieza del mismo, lo cual consistía en separar por densidad el material necesario para el proyecto, de las impurezas (plásticos más densos que el agua, polvo, basura), colocándolo en tinas con agua para la respectiva limpieza. La cantidad de impurezas que se encontraba como material reciclado era de alrededor del 15% - 20 %, esto muestra lo necesario de una buena limpieza previa antes de realizar cualquier trabajo con material que viene de la recicladora.



Figura 3.1 Muestras de material reciclado en el proceso de limpieza.

Una vez obtenido el material limpio y seco (20 Kg.) se procedió a dividir en dos grupos (10 Kg. c/u), para así mezclar uno de los

grupos con antioxidante MB AOX y realizar los respectivos ciclos de extrusión.



Figura 3.2 Muestra del antioxidante MB AOX.

Debido al tamaño de grano del PEAD reciclado fue necesario proceder a moler el material, para así al momento de mezclarlo con el antioxidante sea una mezcla homogénea y obtener mejores resultados en las pruebas.



Figura 3.3 Molino para plástico.

El paso siguiente consiste en mezclar el aditivo con 10 Kg. de material PEAD reciclado esto se lo realiza en un tambor para que exista mayor homogeneidad en la mezcla.



Figura 3.4 Mezcladora para materiales con aditivo.

Para iniciar el proceso de extrusión de las muestras se debe de tener encendida la extrusora por lo menos por 45 min. antes de empezar a trabajar, para que las zonas de calentamiento se encuentren en la temperatura especificada por el operador (180° C) en promedio en el tornillo de extrusión.



Figura 3.5 Control de temperatura de 3 secciones del barril de la extrusora.

Posteriormente se procede a extruir las dos muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo. Cada vez que se realiza un paso en la extrusora (ciclo) se deberá tomar una muestra, para mayor facilidad de obtener la probeta para los ensayos, se utiliza una balanza digital en la cual por cada muestra se contabilizó 39 - 41 gramos para obtener probetas de 2.9 – 3.2 mm de espesor, dimensiones que son adecuadas para realizar las probetas para las pruebas.

Además se conecta los terminales de la prensa a una línea de corriente de 220V, para así lograr que en 45 min. la prensa alcance una temperatura de 120° C aproximadamente.



Figura 3.6 Balanza.



Figura 3.7 Prensa.

Cada cambio en la extrusora de material con aditivo a material sin aditivo es necesario realizar la limpieza del tornillo, esto se lo realiza procesando el siguiente material que va a pasar por el tornillo y dejando que los primeros tramos se pierdan, debido a que este material que esta contaminado con material del ciclo anterior y así se continúa con el ciclo de extrusión.



Figura 3.8 Salida de material de la extrusora.

Una vez que empieza la extrusión se debe trabajar con el tornillo de la extrusora aproximadamente a 45 rpm para realizar el ciclo de forma adecuada. Además periódicamente se debe alimentar la tolva con el material, observando que no se rebose para no desperdiciar material.

En unos minutos se observa que el producto mezclado va saliendo por el cabezal de la extrusora, no se debe tomar los primeros tramos de la mezcla ya que esta se encuentra contaminada con mezclas anteriores. La muestra que se escoja para la elaboración de las probetas no debe de ser contaminada en lo posible por algún agente externo, ya sea por el contacto de los guantes con el producto caliente u otro factor.

Luego de pesar 39 - 41 gramos se debe introducir el producto en la cavidad de la prensa, se procede a elevar la sección hembra de la prensa, hasta cuando la gata hidráulica indique una presión de 200 psi.



Figura 3.9 Muestra de PEAD en la prensa.



Figura 3.10 Muestra de PEAD.



Se debe desconectar las terminales de la prensa de la línea de corriente, para evitar un sobrecalentamiento de la misma y por ende de la muestra. Dejar en este estado aproximadamente por 30 min. con un ventilador (velocidad baja) para ayudar al enfriamiento uniforme de la prensa.



Figura 3.11 Desconexión de terminales del enchufe.

Transcurrido el tiempo de enfriamiento de la prensa, se procede a retirar la placa y se observa el producto deseado.





Figura 3.12 Placa resultante.

Para realizar todos los ensayos propuestos se elaboraron 3 placas de cada mezcla, 30 placas en total para los ensayos y pruebas a realizar.

### **3.2 Evaluación de propiedades reológicas.**

El ensayo de MFI se utiliza para la determinación del índice de fluidez, el esfuerzo de corte, viscosidad y densidad de la muestra con pesos de 2.16 Kg. para el plastómetro de extrusión.

### 3.2.1 Análisis de índice de Fluidez.

En el capítulo anterior se describe los procedimientos operativos para determinar el índice de fluidez. La tabla 3.1 presenta el aumento del MFI para el PEAD reciclado con aditivo sometido a los ciclos de extrusión, el cual tiene una variación del 11.9% entre el primer y el último ciclo de extrusión.

Tabla 3.1 Resultados promedios de índice de fluidez realizada a PEAD reciclado con aditivo.

Ciclo	Densidad (g/cc)	MFI (g/10min)	VISCOSIDAD (Pa-sec)	CIZALLADURA (/sec)	índice de MFI
1	0,7705	0,3535	23046,03	0,85	100
2	0,7694	0,366473	19641,08	0,998	103,67
3	0,7585	0,373119	19347,38	1,013	105,55
4	0,7532	0,38651	19336,5	1,015	1069,33
5	0,7524	0,3956	17934	1,093	111,9

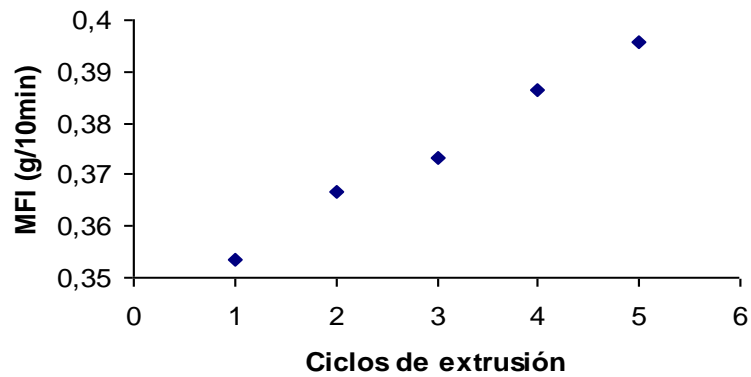


Figura 3.13 Resultado de análisis de MFI vs. Ciclos de extrusión de PEAD reciclado con aditivo.

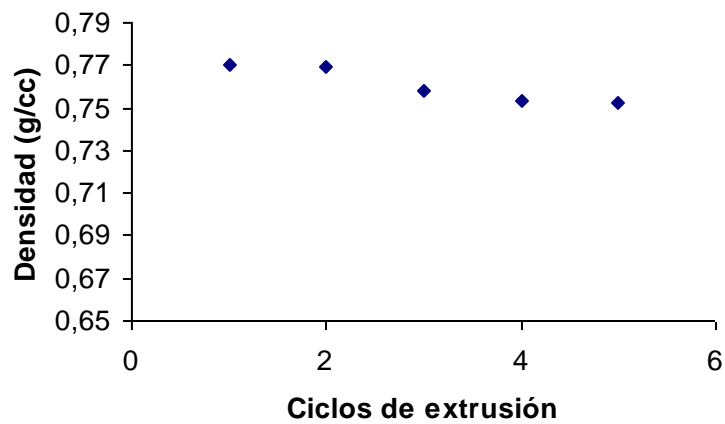


Figura 3.14 Resultado de análisis de MFI (Densidad vs. Ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.

En la tabla 3.1 se presentan resultados los cuales, muestran que mientras aumenta el MFI disminuye la viscosidad, al igual que la densidad, por lo que se puede afirmar que el aumento del índice

de fluidez en el reciclado en cascada es un índice de la degradación del material. Ahora presentamos la tabla de promedios de resultados del análisis del MFI del PEAD reciclado sin aditivo.

Tabla 3.2 Resultados promedios de índice de fluidez realizado a PEAD reciclado sin aditivo.

Ciclo	Densidad (g/cc)	MFI (g/10min)	VISCOSIDAD (Pa-sec)	CIZALLADURA (/sec)	índice de MFI
1	0,7794	0,518	15956,5	1,23	100
2	0,7719	0,5731	15155,73	1,29	110,637
3	0,7685	0,5874	15070,6	1,3	113,398
4	0,7614	0,5981	14509	1,35	115,463
5	0,7572	0,6121	14427,13	1,38	118,166

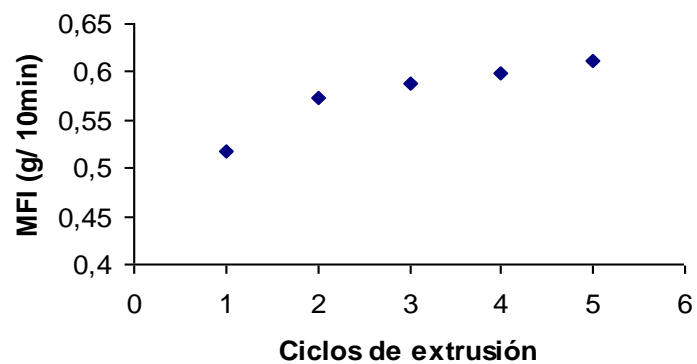


Figura 3.15 Resultado del análisis de MFI de PEAD reciclado sin aditivo.

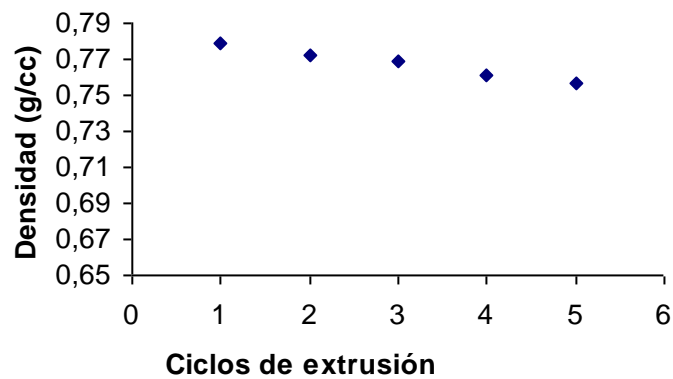


Figura 3.16 Resultado de análisis de MFI (densidad vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.

El aumento del índice de fluidez conforme se realiza los ciclos de extrusión del PEAD reciclado se origina debido a que se cortan las cadenas poliméricas aumentando la degradación termo-mecánica por lo que aumenta su fluidez.

### 3.3 Ensayo de propiedades mecánicas.

Se estudian las muestras de polietileno de alta densidad (post-consumo) reciclado con y sin aditivo, la discusión se centra en conocer el comportamiento de las propiedades ante los ciclos de extrusión en cascada y relacionarlo con los resultados de los índices de fluidez (figura 3.15).

### 3.3.1 Ensayo de resistencia al impacto.

La resistencia al impacto mide la capacidad del material para soportar choque. En la tabla 3.3 se observa los valores de la energía necesaria para lograr la rotura de la muestra, se destaca la disminución de dicha energía conforme avanzan los ciclos de extrusión.

En general el incremento de la energía de la rotura va acompañado de una reducción de la rigidez, a esta propiedad se la denomina tenacidad, cumpliéndose que cuanto mayor es la rigidez menor es su tenacidad. En nuestro caso conforme aumenta los ciclos de extrusión, la rigidez aumenta pero disminuye su tenacidad.

Tabla 3.3 Resultados promedios de ensayo de impacto realizado al PEAD reciclado con aditivo.

CICLO	Energía de corte (J)	Fuerza de impacto (J/m)	índice de energía de corte	Tipo de Corte
1	0,3	85,35	100	B
2	0,2845	80,1	94,89	B
3	0,281	77,92	93,72	B
4	0,277	74,38	92,38	B
5	0,2674	72,18	89,18	B

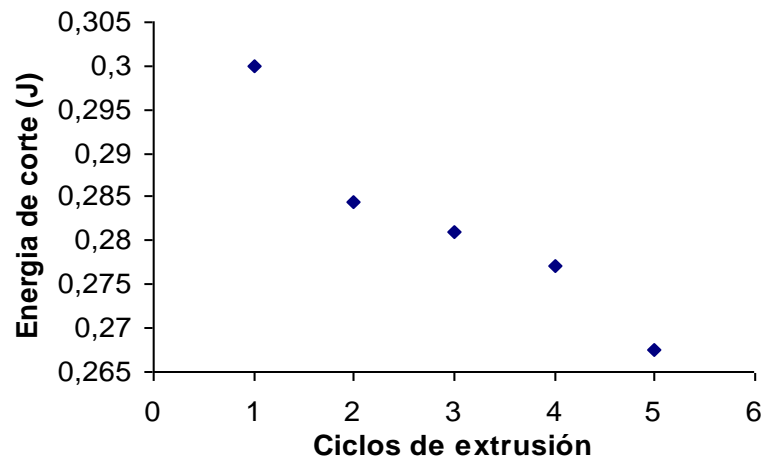


Figura 3.17 Resultado de análisis de ensayo de impacto de PEAD reciclado con aditivo.

Claramente la disminución de la energía de corte fue de aproximadamente 11% del quinto ciclo con respecto al primer ciclo de extrusión (tabla 3.3).

La disminución de la energía de corte esta relacionada con el procesamiento del material, ya que los polietilenos de alta densidad son cadenas largas sin ramificaciones, y conforme se reprocesa dichas cadenas se rompen por lo cual sus propiedades decaen. En la tabla 3.4 se reúnen la evolución que experimenta la resistencia al impacto del polietileno post-consumo sin aditivo conforme se somete a los ciclos de extrusión.

Tabla 3.4 Resultados promedios de ensayo de impacto realizado a PEAD reciclado sin aditivo.

CICLO	Energía de corte (J)	Fuerza de impacto (j/m)	índice de energía de corte	Tipo de Corte
1	0,268	78,37	100	B
2	0,238	73,09	88,57	B
3	0,226	71,53	84,07	B
4	0,217	69,88	80,87	B
5	0,194	65,09	72,3	B

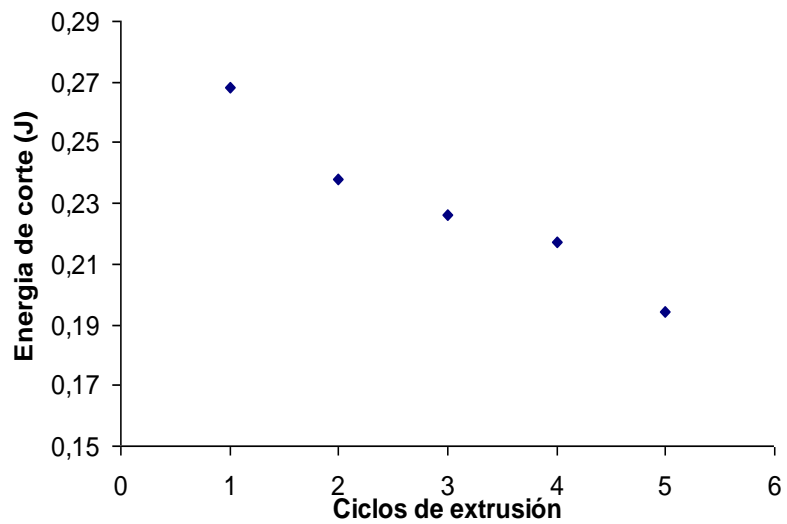


Figura 3.18 Resultado de análisis de ensayo de impacto de PEAD reciclado sin aditivo.

De los valores de índice de energía de corte referidos al ciclo 1 se toma como base 100 con lo cual se evalúa  $100 - 72.3 = 27.7\%$  que expresado por ciclo es  $5.54\%/ciclo$  de disminución porcentual de la energía de corte.



### 3.3.2 Ensayo de tensión y módulo de elasticidad.

De los resultados obtenidos del ensayo, se deduce que el comportamiento de los materiales es cercano a dúctil, ya que se puede distinguir una zona de comportamiento elástico, una vez que se pasa el límite elástico continúa una deformación plástica que finaliza con la rotura del material, como se refleja en las tablas siguientes.

Tabla 3.5 Resultados promedios de ensayos de tensión realizadas a muestras de PEAD reciclado sin aditivo.

Ciclo	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Esfuerzo máx. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de ruptura (Kg/cm <sup>2</sup> )	Límite elástico (Kg./Sq.cm)
SA1	13,15	3,08	292,62	263,12	292,62
SA2	13,51	3,18	200,90	215,77	200,90
SA3	13,26	3,15	224,86	213,33	224,86
SA4	13,35	3,09	228,30	199,06	228,30
SA5	13,34	3,15	197,10	171,94	197,10

Con la tabla 3.5 se puede observar que el esfuerzo de cedencia es similar al esfuerzo máximo, esto quiere decir que el material pasado este valor límite ya no recuperará su forma original, y por consiguiente, pasa a la zona plástica.

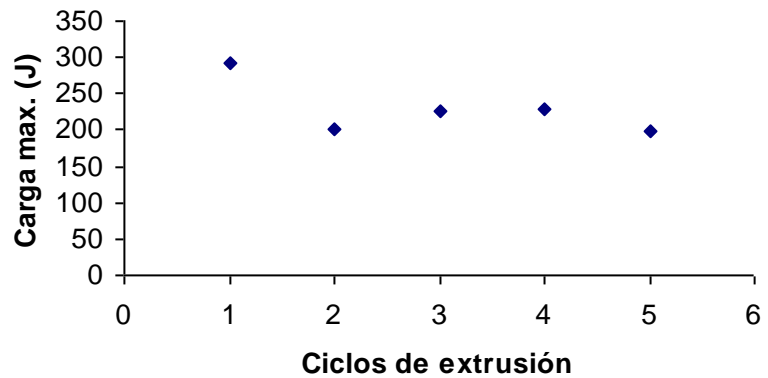


Figura 3.19 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga máx. Vs. ciclos) de PEAD reciclado sin aditivo.

El efecto causado por el reproceso y en consecuencia, degradación por calor, se ve reflejado en la disminución del esfuerzo de la rotura, la cual es de alrededor del 40% y correspondientemente el aumento del alargamiento a la rotura, como consecuencia de esto provoca un aumento en el

límite elástico de la tracción para el PEAD reprocesado sin aditivo.

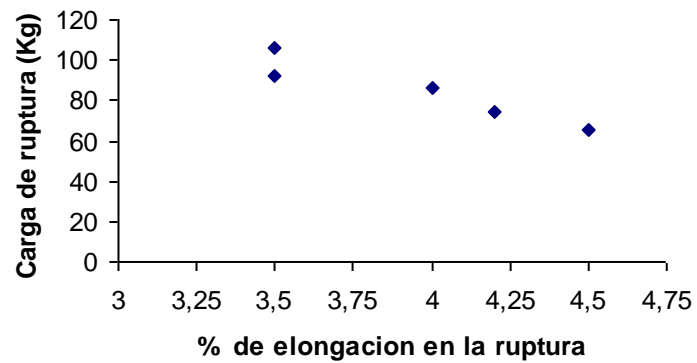


Figura 3.20 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga de ruptura. Vs. %de alargamiento) de PEAD reciclado sin aditivo.

En la figura 3.20 se observa la evolución de los parámetros fuerza-alargamiento para los diferentes materiales. Ahora presentamos la tabla de resumen del ensayo realizado a PEAD reciclado con aditivo.

Tabla 3.6 Resultados de promedios de ensayo de tensión realizadas a PEAD reciclado con aditivo.

Ciclo	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Esfuerzo max. (Kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de ruptura (Kg/cm <sup>2</sup> )	Límite elástico (Kg/Sq.cm)
SA1	13,225	3,795	293,91846	271,10538	293,91846
SA2	12,215	3,205	290,716292	261,42236	290,716292
SA3	11,05	3,11	320,381106	282,29995	320,381106
SA4	11,46	3,1	307,752661	230,39985	307,752661
SA5	11,48	3,565	264,393559	188,77536	264,381731

Se observa como el reproceso en cascada genera una degradación en las propiedades mecánicas del material con la disminución de la fuerza de ruptura y el respectivo aumento de la elongación en la ruptura.

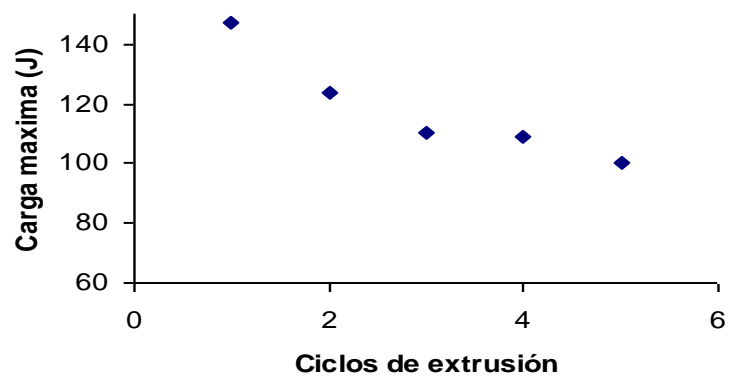


Figura 3.21 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga máx. Vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.

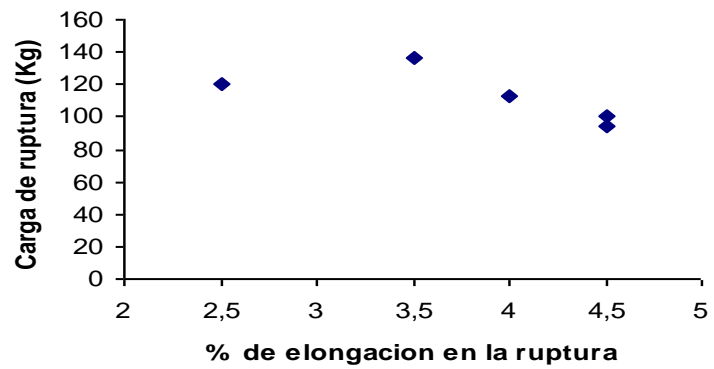


Figura 3.22 Resultado de análisis de ensayo de tensión (fuerza de ruptura Vs. %de alargamiento en la ruptura) de PEAD reciclado con aditivo.

La tendencia de la evolución de las propiedades mecánicas se presentan en las curvas de las figuras 3.19 y 3.20 en la cual, la carga de ruptura tiene una disminución en el quinto ciclo de alrededor del 30% con respecto al primer ciclo de extrusión.

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADO.

### 4.1 Análisis de propiedades reológicas realizadas a polietilenos reciclados en el laboratorio de la FIMCP.

Se analiza la relación entre el MFI, cizalladura, viscosidad de los ensayos realizados. Los resultados del ensayo de fluidez del PEAD reciclado sin aditivo procedente de cada muestra, indica que la fluidez aumenta con respecto a los ciclos de extrusión. Las cadenas largas del polietileno de alta densidad no son ramificadas y al romperse en cada ciclo de extrusión genera aumento de la fluidez, por lo que representa menor viscosidad del polímero, en la figura 4.1 se recoge los resultados correspondientes a este ensayo.

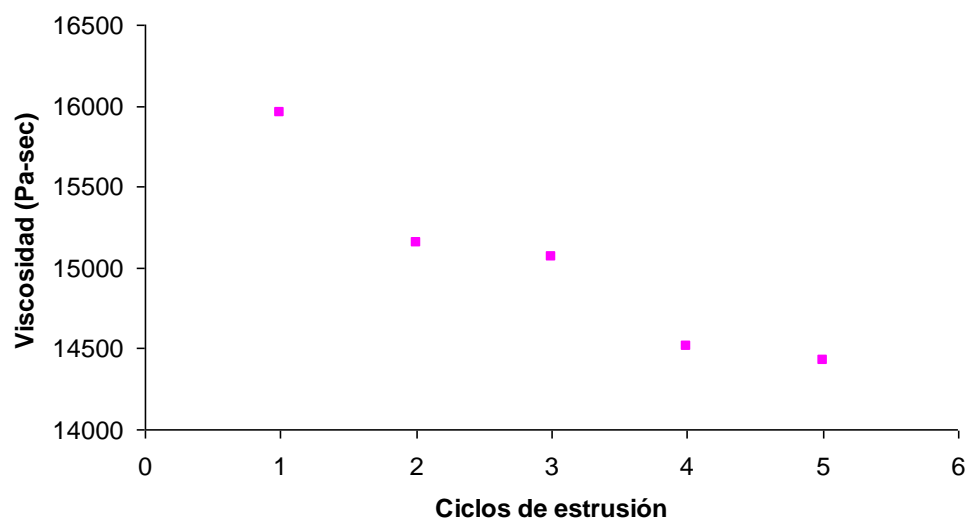


Figura 4.1 Resultado del análisis del ensayo de MFI (viscosidad vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.

La figura 4.2 muestra el comportamiento reológico general en cada uno de los ciclos de extrusión de las muestras sin aditivo. Se observa la disminución de la viscosidad conforme aumentan los ciclos de extrusión y el índice de fluidez. Al no conocer la historia térmica del material que se usó para reciclado post-consumo la dispersión de los resultados de las propiedades aumentan. Sin embargo, lo importante para el presente trabajo es la tendencia de los resultados, por lo que podemos realizar esta comparación.

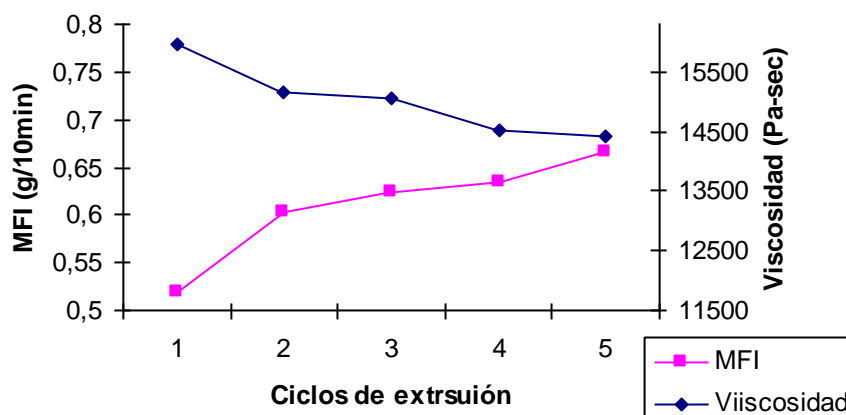


Figura 4.2 Resultado de análisis de ensayo MFI (MFI vs. Ciclos de extrusión y viscosidad) de PEAD reciclado sin aditivo.

El aumento del índice de fluidez es una medida de la disminución de la viscosidad, por lo que disminuye también el peso molecular. Dado que las propiedades mecánicas están en función del peso molecular, se espera que estas se vean afectadas.

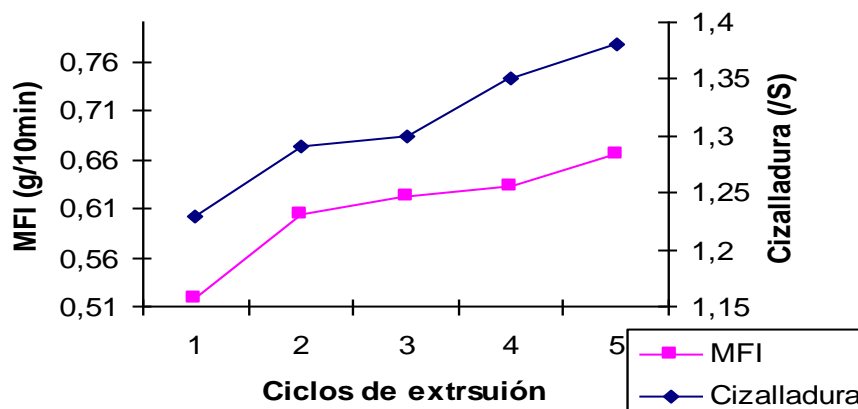


Figura 4.3 Resultado de análisis de ensayo de MFI. (MFI vs. Ciclos de extrusión y Cizalladura) de PEAD reciclado sin aditivo.



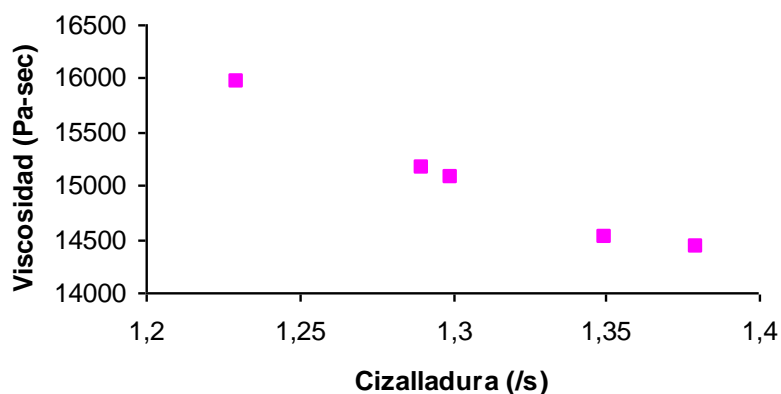


Figura 4.4 Resultado de análisis de ensayo de MFI (viscosidad vs. cizalladura) de PEAD reciclado sin aditivo.

La cantidad de resina que pasa por el plastómetro en las condiciones fijadas, es inversamente proporcional al peso molecular del polímero. Por lo tanto, es un instrumento que sirve para evaluar de manera indirecta el grado de polimerización o degradación de una resina o mezclas de ésta. A continuación se analiza los gráficos de resultados de las propiedades reológicas de los PEAD reciclados con aditivo.

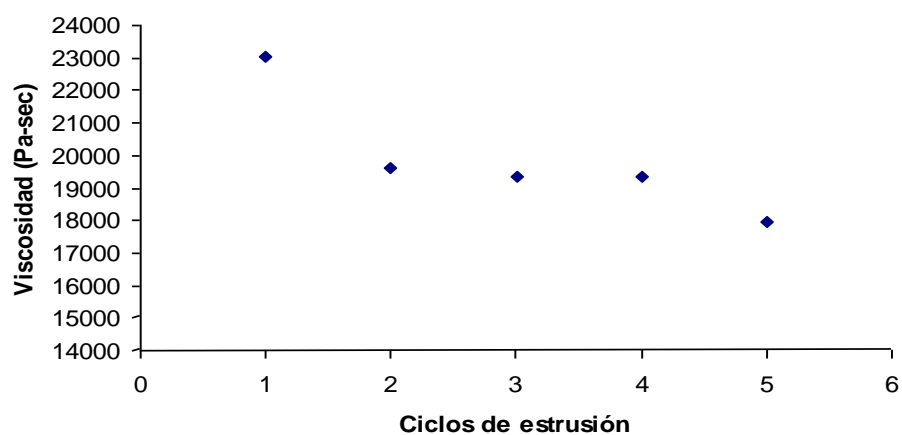


Figura 4.5 Resultado de análisis de ensayo de MFI (viscosidad vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.

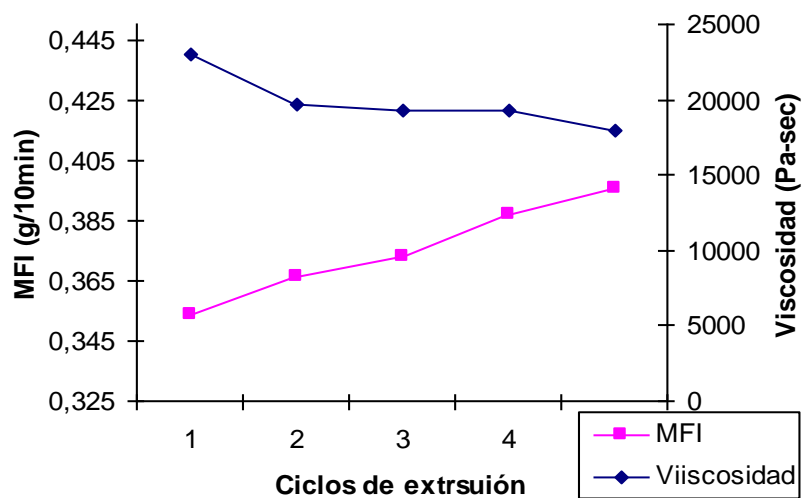


Figura 4.6 Resultado de análisis de ensayo MFI (MFI vs. ciclos de extrusión y viscosidad) de PEAD reciclado con aditivo.

Similar a los resultados de las pruebas de PEAD reciclado sin aditivo, se puede observar un aumento del MFI por ende una correspondiente disminución de la viscosidad.

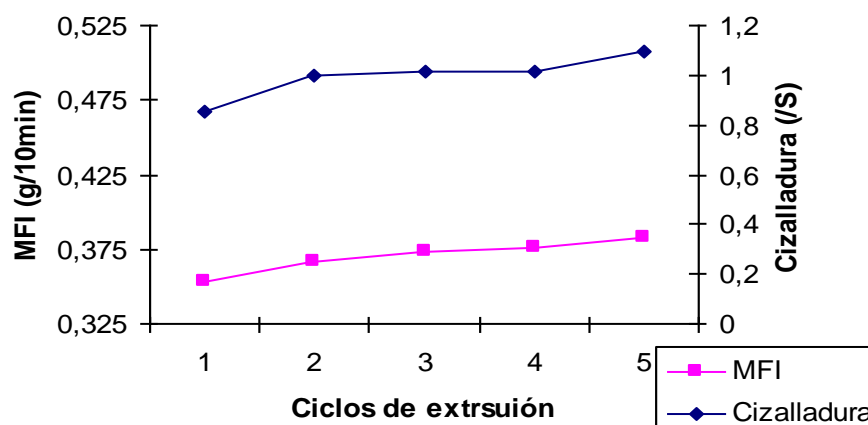


Figura 4.7 Resultado de análisis de ensayo de MFI (MFI vs. ciclos de extrusión y cizalladura) de PEAD reciclado con aditivo.

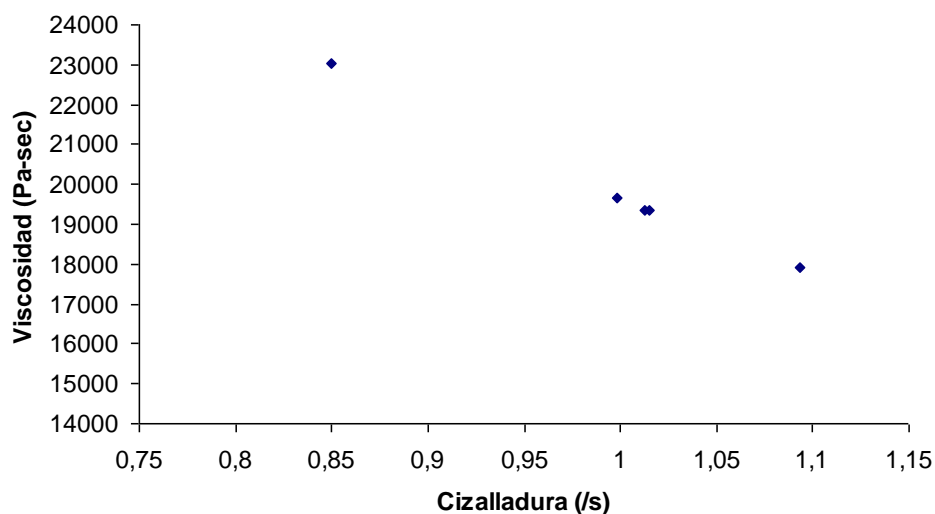


Figura 4.8 Resultado de análisis de ensayo de MFI (Viscosidad vs. cizalladura) de PEAD reciclado con aditivo.

La viscosidad aparente de los polímeros disminuye cuando se someten a fuertes esfuerzos cortantes (ciclos de extrusión) y este comportamiento se puede relacionar con lo que ya se conoce acerca de la morfología de los polímeros. Las moléculas polimerizadas forman cadenas largas, torcidas, formando estructuras complicadas. Este enrollamiento existe aún cuando se funden y en gran parte, es el origen del componente elástico que tienen estos materiales ante un esfuerzo. Sin embargo, cuanto mayor es el esfuerzo de corte en el material, mayor es la facilidad de las cadenas para deslizarse una sobre otra, por lo que disminuye la viscosidad.

#### 4.2 Análisis de propiedades mecánicas.

Expuestos los resultados de las pruebas reológicas, se analiza cómo afecta a las propiedades mecánicas de las muestras de PEAD y a la vez cómo evoluciona dichas propiedades respecto a los ciclos de extrusión.

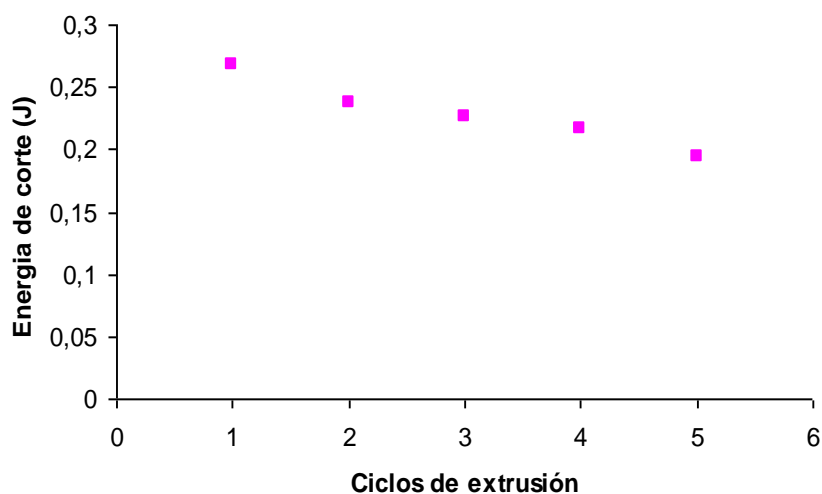


Figura 4.9 Resultado de análisis de ensayo de impacto (energía de corte vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado sin aditivo.

Se observa que se mantiene la tendencia a disminuir de la energía de corte figura 4.9. La relación entre el MFI y las propiedades mecánicas se observa en la figura 4.10, en la cual se han trazado los resultados del MFI y energía de corte en función de los ciclos de extrusión para el PEAD sin aditivo.

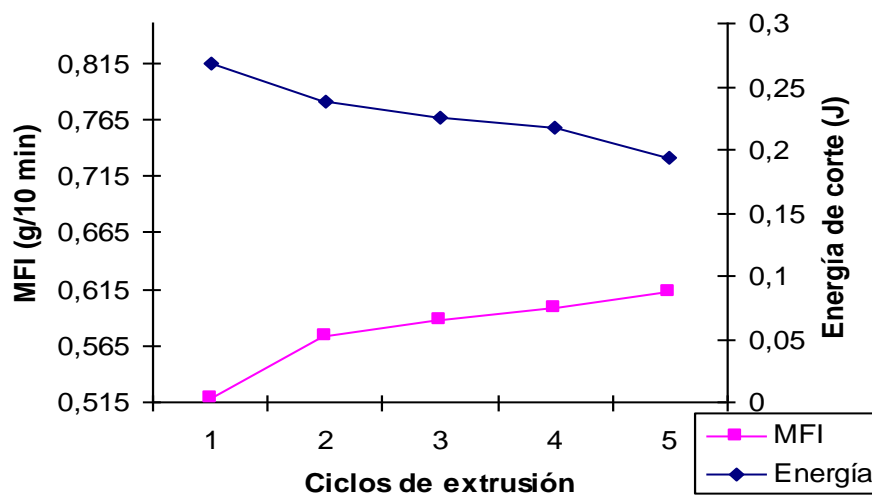


Figura 4.10 Análisis de variación de propiedades de (MFI vs. ciclos de extrusión y energía de corte) de PEAD reciclado sin aditivo.

Se observa en la fig. 4.10 la disminución de la energía de corte, la cual, guarda relación con el aumento del MFI debido a la degradación termo-mecánica. Continuando con la relación entre el MFI y las propiedades mecánicas en la figura 4.11 se puede observar la carga de ruptura y el MFI en función de los ciclos de extrusión.

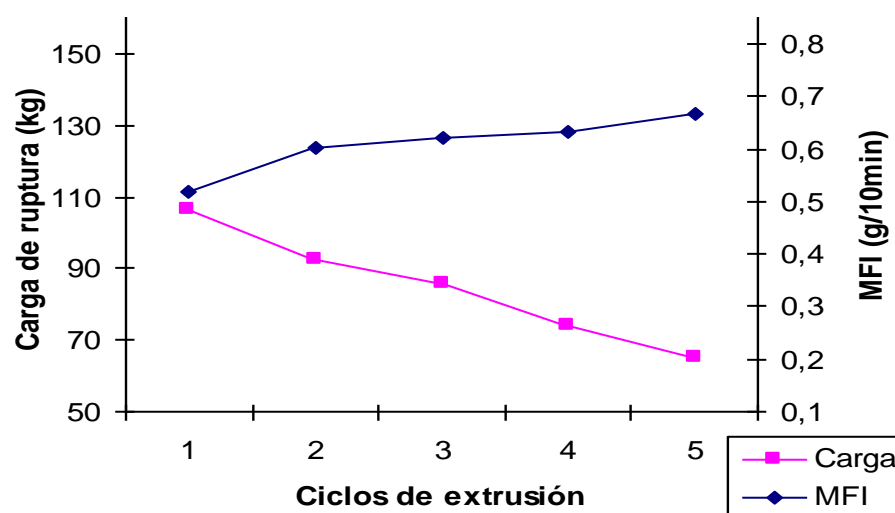


Figura 4.11 Análisis de variación de propiedades (carga de ruptura vs. ciclos de extrusión y MFI) de PEAD reciclado sin aditivo.

La variación del MFI entre el ciclo inicial y el ciclo final, guarda relación con respecto a las variaciones de las propiedades mecánicas, se observa que la disminución de la carga de ruptura varía inversamente con respecto al MFI (Figura 4.11).

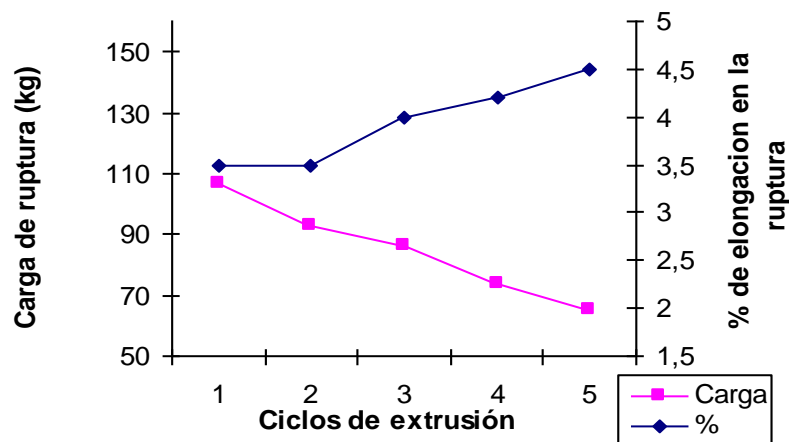


Figura 4.12 Resultado de análisis de ensayo de tensión (carga de ruptura vs. ciclos de extrusión y % de elongación) de PEAD reciclado sin aditivo.

En la figura 4.12 se observa que mientras la degradación termomecánica genera una disminución de la propiedad de resistencia a la tensión, el porcentaje de elongación aumenta conforme avanzan los ciclos de extrusión, esta es una manifestación clara de la caída de la propiedad, ya que a más ciclos menos fuerza se aplica con mayor variación de longitud.

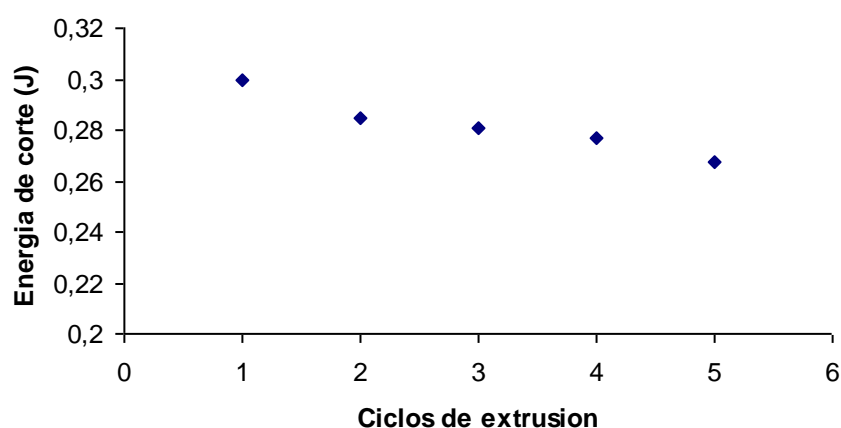


Figura 4.13 Resultado de análisis de ensayo de impacto (energía de corte vs. ciclos de extrusión) de PEAD reciclado con aditivo.

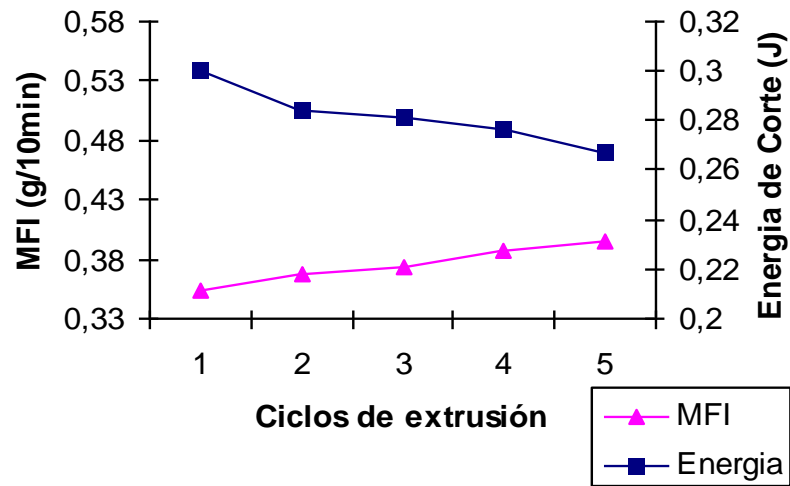


Figura 4.14 Análisis de variación de propiedades (MFI vs. ciclos de extrusión y energía de corte) de PEAD reciclado con aditivo.

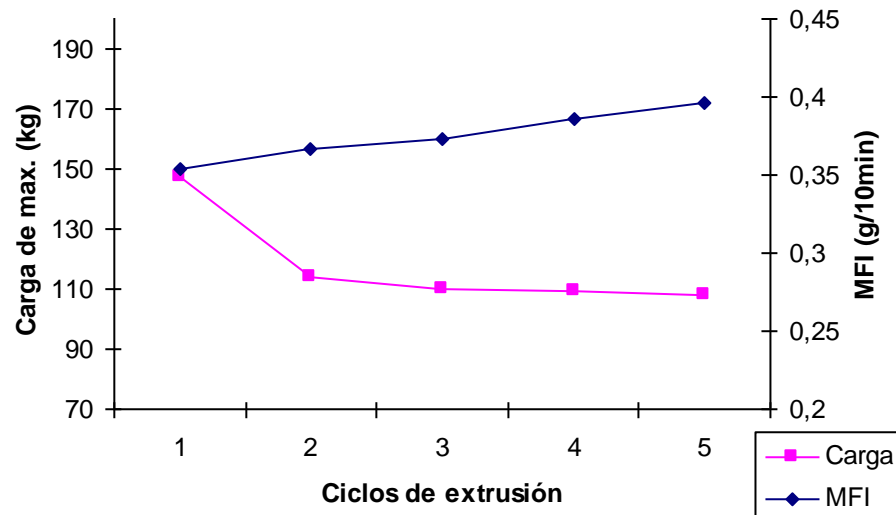


Figura 4.15 Análisis de variación de propiedades de (carga de máx. vs. ciclos de extrusión y MFI) de PEAD reciclado con aditivo.

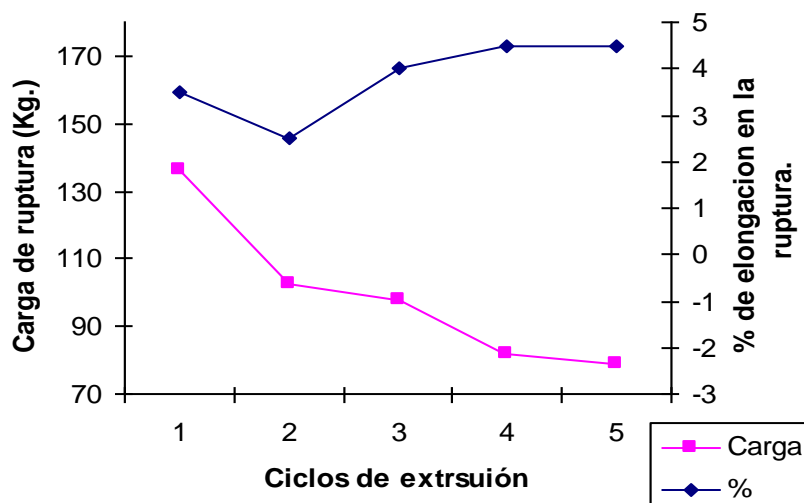


Figura 4.16 Análisis de variación de propiedades de (carga de ruptura vs. ciclos de extrusión y % de elongación) de PEAD reciclado con aditivo.

La figura 4.15 y 4.16 pone de manifiesto, la disminución de las propiedades mecánicas, cuando se realiza el análisis de materiales reciclados, el cuál para nuestro caso particular son los PEAD. Esta degradación del PEAD reciclado se da por el proceso de oxidación termo-mecánica, ya que con cada ciclo varía las propiedades reológicas y disminuye las propiedades mecánicas, además en cada ciclo de extrusión - molido de material se rompen las cadenas poliméricas y dado que el grado de polimerización es una magnitud característica de los termoplásticos se da la degradación térmica.

### 4.3 Comparación de PEAD reciclados con y sin aditivo.

Se compara la evolución de las propiedades que experimenta el polietileno de alta densidad (con y sin aditivo) sometido a un proceso de reciclado mecánico y de varios ciclos de extrusión.



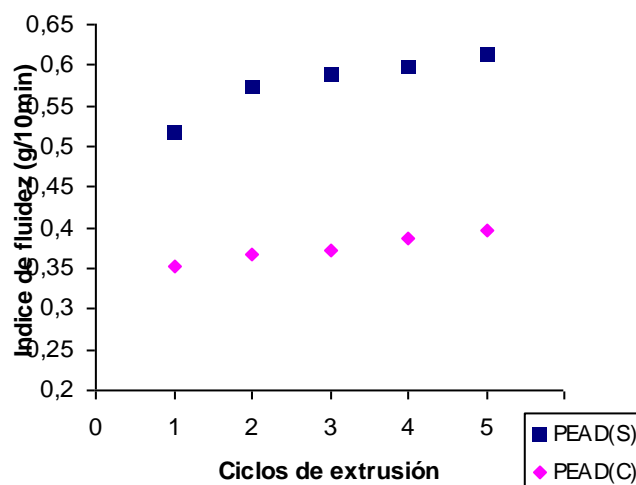


Figura 4.17 Análisis de variación de propiedades de MFI de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.

La figura 4.17 muestra el índice de fluidez del PEAD reciclado (con aditivo) el cuál, con el uso del antioxidante sufre una variación en un rango menor que el PEAD reciclado (sin aditivo), analíticamente se observa que los valores para el MFI en el quinto ciclo extrusión de material PEAD reciclado con aditivo empiezan a acercarse a los valores para el primer ciclo del material PEAD reciclado sin aditivo, lo cuál muestra un aceptable desempeño del antioxidante.

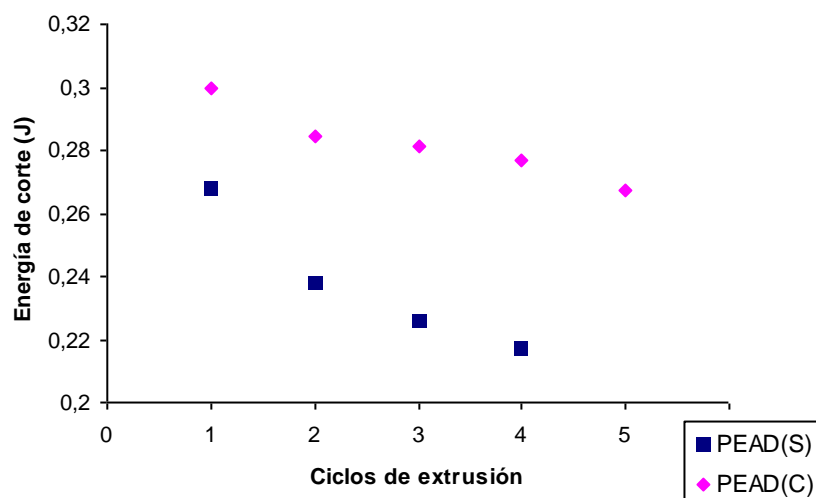


Figura 4.18 Análisis de variación de propiedades de impacto de muestras de PEAD reciclado con y sin aditivo.

En las figuras 4.18 y 4.19 observamos por comparación en ambas muestras de PEAD reciclado con aditivo y PEAD reciclado sin aditivo, las propiedades se degradan conforme avanzan los ciclos de extrusión siendo menos la variación en la carga de ruptura con respecto a las otras propiedades, debido a que la dependencia de las propiedades de tensión con el MFI es alto (tabla 2.4).

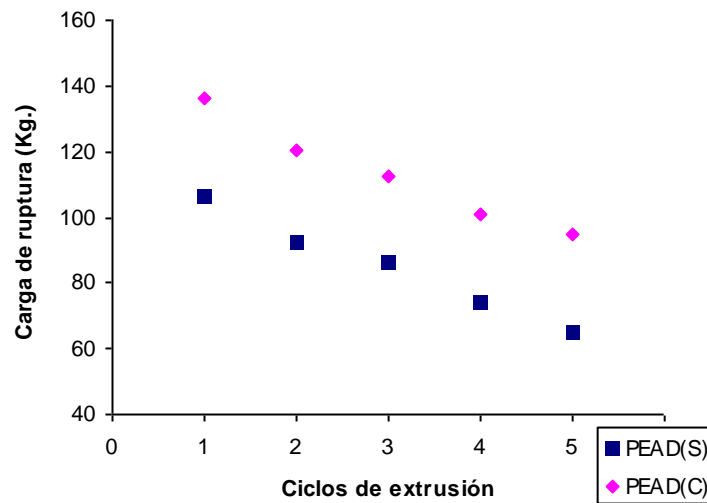


Figura 4.19 Análisis de variación de propiedades de tensión de muestras de PEAD con y sin aditivo.

A continuación en la figura 4.20 muestra todas las propiedades principales, para tener una idea más clara de la evolución de los resultados conforme se desarrolla los ciclos de extrusión.

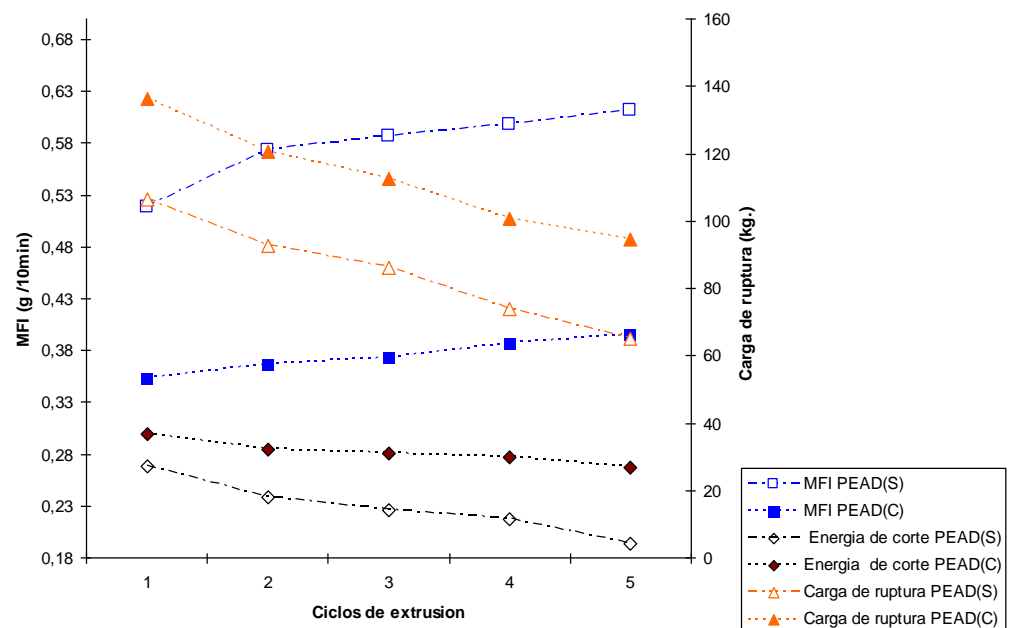


Figura 4.20 Comparación general de propiedades de tensión, impacto y MFI de PEAD reciclado con y sin aditivo.

Se procede a cuantificar la evolución de las propiedades, tanto para el PEAD reciclado con aditivo como para el PEAD reciclado sin aditivo, para así determinar porcentualmente la variación de propiedades. En la industria cuando los materiales son post-consumo (material utilizado en la presente tesis) el grado de contaminantes presentes en las muestras son altos, lo que genera mayor dispersión en los resultados y menor capacidad a la re-estabilización luego de la degradación térmica, por lo que las pruebas se las puede considerar, uno de los peores escenarios el cual es sometido el antioxidante.

En la tabla 4.1 se observa la variación de los índices de las propiedades tanto reológicas y mecánicas. Debido a que no se conoce la historia térmica de los elementos, tomamos el ciclo 1 como 100 % y los demás datos son comparados de la variación de las propiedades con respecto al ciclo 1.

Tabla 4.1 Índices de propiedades mecánicas y reológicas en ensayo de muestras de PEAD (sin aditivo).

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Energía de corte	100	88,81	84,33	80,97	72,39
Carga de ruptura	100	86,936	80,827	69,549	61,090
MFI	100	110,64	113,40	115,46	118,17

En la tabla 4.1 se observa el porcentaje que disminuye las propiedades por cada ciclo de extrusión, por ejemplo, la energía de corte para el PEAD reciclado sin aditivo, el cuarto ciclo a disminuido aproximadamente un 19% (tabla 4.2) respecto al primer ciclo de extrusión. Es importante mencionar que estos valores no deben ser tomados de una forma estricta debido a la dispersión en la toma de muestras, lo conveniente es tener una

visión de la tendencia de los resultados, en este caso se puede afirmar que la degradación termo-mecánica que afecta la propiedad de impacto va aumentando por cada ciclo de extrusión.

Tabla 4.2 Comparación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas de PEAD reciclado (sin aditivo).

	c1-c2	c1-c3	c1-c4	c1-c5
Energía de corte	11,19	15,67	19,03	27,61
Carga de ruptura	13,064	19,173	30,451	38,910
MFI	10,64	13,40	15,46	18,17

En la tabla 4.3 se observa la variación de los índices de las propiedades del PEAD reciclado con aditivo respecto al avance de cada ciclo de extrusión.

Tabla 4.3 Índices de propiedades mecánicas y reológicas de ensayo a muestras de PEAD (con aditivo).

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
Energía de corte	100	94,89	93,72	92,38	89,18
Carga de ruptura	100	88,611	82,660	74,063	69,508
MFI	100	103,67	105,55	109,33	111,90

En la tabla 4.3, los valores de energía de corte, carga de ruptura, MFI, aumentan conforme avanza los ciclos de extrusión, es importante indicar el trabajo apreciable del antioxidante el cual es más evidente en la energía de corte y en segunda instancia en el MFI.

Tabla 4.4 Comparación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas de PEAD reciclado (con aditivo).

	c1-c2	c1-c3	c1-c4	c1-c5
Energía de corte	5,11	6,28	7,62	10,82
Carga de ruptura	11,38	17,34	25,93	30,49
MFI	3,67	5,55	9,34	11,91

Tabla 4.5 Relación de la variación de índices de propiedades mecánicas y reológicas de PEAD reciclado (sin aditivo / con aditivo).

	ciclo 1-2	ciclo 1-3	ciclo 1-4	ciclo 1-5
Energía de corte	2,19	2,50	2,50	2,55
Carga de ruptura	1,15	1,11	1,17	1,28
MFI	2,90	2,41	1,66	1,53

En la tabla 4.5 observamos relación entre los índices de las tablas 4.4 y tabla 4.2, por ejemplo la energía de corte para ciclo 1-5 ( $27.61/10.82$ ) = 2.55 es decir existe una relación 1:2.55 lo cual indica las superiores características que guarda las muestras de PEAD con aditivo respecto a las muestras de PEAD sin aditivo.

#### 4.4 Potenciales aplicaciones comerciales.

La utilización de materiales reciclados poco a poco van tomando fuerza en nuestro país. Para las aplicaciones comerciales es fundamental si el material ha sido seleccionado o no y además si es pos-consumo o post-industrial.

Otros tipos de desechos plásticos seleccionados servirán para fabricar cañerías, bandejas, sogas y otra gran cantidad de artículos.

Una aplicación particular del polietileno reciclado post-consumo lo encontramos en Argentina; RecyPack, una pequeña empresa de reciclaje, la cual diseñó una teja a partir de los envases post-consumo denominadas Tejalar, estas tejas están hechas a base de un compuesto de celulosa, aluminio y polietileno, mediante un proceso de termoformado, con agregados de pigmentos, aditivos y protector UV.



Figura 4.2 Teja compuesta a base de celulosa, aluminio y polietileno reciclado.

El material reciclado post-consumo que se recupera de la basura, pasa por un proceso de limpieza con agua y cloro para retirarle la celulosa, se esteriliza a 200 grados centígrados y finalmente es molido. RecyPack recibe los fargos con el material listo para mezclarlo con el sobrante de fábrica.

El resultado es una teja uniforme y rígida, que se maneja similar a la madera. Puede ser cortada con serrucho, clavada y atornillada. Una de las ventajas que ofrecen las tejas Tejalar, es su bajo peso con respecto a las tejas de cerámica o de cemento (25 kilos por metro cuadrado, en comparación de los 60 kilos de las convencionales) [12].

En base a lo expuesto en los párrafos anteriores, podemos afirmar que se realizan trabajos en proyectos de reciclaje los cuáles están en función de la aplicación que deseamos para los varios tipos de plásticos que se encuentran disponibles para el reciclaje ya que estos servirán para fabricar objetos igualmente útiles, de los cuales podemos mencionar mobiliario para jardín, bancos para plazas, vallas, pisos para establos, etc.



# **CAPÍTULO 5.**

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **5.1 Conclusiones.**

- 1.- En el análisis de la degradación de PEAD reciclado, el MFI es un indicador para el control de calidad del material, el cual permite tener una medida cualitativa de la degradación termo-mecánica que sufren las muestras a medida que son procesadas.
- 2.-Las muestras de reciclado PEAD post-consumo con y sin aditivo presentaron en general un comportamiento variable en sus propiedades, debido a métodos deficientes en separación de las muestras para reciclaje, por lo que disminuye el rendimiento del antioxidante en el reciclado.

- 3.- En base a los resultados obtenidos se estima en general una mejora de 15% de las propiedades mecánicas de las muestras de PEAD con aditivo respecto a las muestras PEAD sin aditivo.
  
- 4.- En general en los cinco ciclos de extrusión se genera una relación de 1:2.43, 1:1.18, 1:2.12 para la energía de corte, carga de ruptura, MFI respectivamente entre los índices de los resultados de las pruebas de PEAD con y sin aditivo, estos índices son el promedio de la tasa de cambio de la degradación de las propiedades entre los ciclos de extrusión, lo que nos indica por ejemplo, que la variación del MFI de las muestras PEAD sin aditivo es 2.12 veces en promedio mayor que la variación del MFI para las muestras de PEAD con aditivo.
  
- 5.- Los principales problemas en el reciclaje de plásticos, se deben a la degradación sufrida por los materiales durante la vida útil y las deficientes operaciones de reciclaje, causando la incompatibilidad entre sus componentes al momento del reproceso del material, sumado a todo esto, la acción contaminante de oxígeno y a los rayos UV, lo que desencadena la degradación de polietileno.
  
- 6.- La historia térmica de un plástico es una herramienta fundamental para asegurar la recuperación adecuada de los

plásticos reciclados y los datos sobre la transformación química de los estabilizadores que utiliza.

## **5.2 Recomendaciones.**

- 1.-Al momento de realizar los ciclos de extrusión se deben utilizar filtros a la salida del dado de la extrusora para así mejorar la limpieza del material que se va a utilizar, ya que muchas veces el polvo y plásticos de alto punto de fusión son parte de las impurezas de la muestra.
  
- 2.-La degradación que sufren los polietilenos son debidos a la oxidación y degradación UV, por lo que el aditivo utilizado esta orientado a estabilizar la degradación por oxidación, con lo cuál, un aditivo para la degradación UV ayudaría a una mejor respuesta a la estabilización.
  
- 3.-Durante el proceso de extrusión entre ciclo y ciclo, se debe de tener en cuenta que dentro del tornillo se tienen residuos de material remanente, que en cierta forma influirá al momento de obtener un nuevo material extruido, por lo que se recomienda cada vez que se pase de ciclo purgar el

tornillo con el nuevo material de la muestra y dejar perder el material de purga.

4.-Para el PEAD post-consumo, es importante conocer el grado de degradación sufrido durante la utilización en cada proceso, la foto-oxidación de los productos debido a la exposición de los rayos UV debe ser considerado, ya que modifican la estructura y la morfología del PE con una reducción de la propiedades mecánicas aumentando la cinética de degradación con respecto al material virgen.

5.- Los residuos de plaguicidas o contaminantes peligrosos, por ejemplo, en películas de invernadero, puede limitar el reciclado de plásticos como resultado de su potencial toxicidad. En este ejemplo de otros métodos de reciclado debe ser preferido (por ejemplo, la incineración).

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **Referencias Bibliográficas.**

- [1] “Termoplásticos” Consulta realizada en Octubre del 2008  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>.
- [2]. “Estructura de polietileno” consulta realizada en Octubre del 2008  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/pestructura>.
- [3]. “Polietileno” consulta realizada en Octubre del 2008  
<http://en.wikipedia.org/wiki/polyetilene>.
- [4]. “Polietileno” consulta realizada en Octubre del 2008  
<http://Ppslc.ws/spanish/pe.htm>.
- [5]. Propiedades Químicas consulta realizada en junio del 2008  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A1lisis\\_bif%C3%A1sica](http://es.wikipedia.org/wiki/Cat%C3%A1lisis_bif%C3%A1sica)
- [6]. “Propiedades de los polietilenos” consulta realizada en junio del 2008  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/propiedades>.
- [7] “Relación de estructura” consulta realizada en junio del 2008  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/relacion>.
- [8]. “Reciclaje de plásticos” consulta realizada en Agosto del 2008  
Revista de la asociación ecuatoriana de plásticos INTEGRA.

[9]. RIGAIL, A. "Aplicaciones del Melt flow Index (MFI) en a industria de procesamiento de plásticos (Octubre del 2006).

[10]. Manas Chanda Salil K. Roy, PLASTICS TECHNOLOGY HANDBOOK, Editorial Hard cover Pág. 84,85,86,87.

[11]. Handbook of plastics testing technology second edition (1998) vishu shah, a wiley interscience publication John wiley Pag. 50 – 51 – 52 -53 – 54.

[12]. "tejas con plástico reciclado" consulta realizada en Marzo del 2009 <http://www.plastico.com/>