



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

“Estudio de las Propiedades Mecánicas y Reológicas del  
Poliétileno de Alta Densidad y Antioxidante en Base de  
Fosfitos Durante Cinco Ciclos de Inyección”

**TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por

Nicolás Guerra Méndez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2009

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradezco a Dios, por todo lo logrado hasta ahora, a mi director de tesis, Ing. Andrés Rigail y a Clotario Tapía B, vocal suplente, por su valiosa colaboración y paciencia.

Agradezco a las empresas: PIKA, POLIMALLAS, y ASEPLAS, quienes permitieron realizar las probetas y los ensayos. También a Johanna Huamán, a toda mi familia y amigos, por su afectuoso e incondicional apoyo en todo este tiempo.

## DEDICATORIA

Este logro alcanzado se lo dedico a mis padres, Dr. Nicolás Guerra Bozza y Carmen Méndez González por haberme dado todo su apoyo y por ser unos grandes amigos.

A mis hermanas, sobrinos y primos por darme confianza, valor y fuerza para nunca rendirme.

## **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

**Ing. Omar Serrano V.**  
**Delegado Decano FIMCP**  
**Presidente**

---

**Ing. Andrés Rigáil C.**  
**Director de tesis**

---

**Ing. Clotario Tapia Q.**  
**Vocal suplente**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Nicolás Guerra Méndez

## RESUMEN

En el mundo, muchas industrias plásticas están utilizando materiales reciclados para la elaboración de nuevos productos, esto reduce el uso de materiales vírgenes, logrando nuevas alternativas con materiales de desechos. En Ecuador, los productos que se fabrican con estos tipos de materiales son muy escasos. Las empresas Ecuatorianas no quieren usar materiales reciclados porque estos reducen las propiedades mecánicas y reológicas del producto final.

El reciclaje y reprocesamiento de materiales plásticos son importantes para disminuir la contaminación del ecosistema y el uso de materias primas. Ya que Ecuador carece de industrias petroquímicas.

En esta tesis se comparan las propiedades mecánicas y reológicas de un polietileno de alta densidad postconsumo, con un polietileno de alta densidad postconsumo con antioxidante AOX en base de fosfito, durante cinco ciclos de inyección.

En Pika se inyectan los dos materiales, el polietileno de alta densidad sin aditivo y el polietileno de alta densidad con aditivo. En Aseplas se realizan las pruebas de resistencia al impacto e índice de fluidez y en Polimallas se efectúa el ensayo de resistencia a la tracción. Se analiza el cambio del índice de fluidez de los materiales con respecto al esfuerzo máximo y a su resistencia al impacto.

Luego de realizar estos ensayos se observa que las propiedades mecánicas y reológicas del polietileno de alta densidad con aditivo AOX en base de fosfito, se estabilizan después del tercer ciclo de inyección. Esto indica que se puede seguir realizando más ciclos sin tener variaciones dispersas en las propiedades mecánicas.

## ÍNDICE GENERAL

|                                   | Pág. |
|-----------------------------------|------|
| RESUMEN .....                     | I    |
| ÍNDICE GENERAL .....              | III  |
| ABREVIATURAS .....                | VI   |
| SIMBOLOGÍA .....                  | VII  |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....            | VIII |
| ÍNDICE DE TABLAS.....             | XI   |
| ÍNDICE DE PLANOS.....             | XIII |
| INTRODUCCIÓN.....                 | XIV  |
| <br>                              |      |
| <b>CAPÍTULO 1</b>                 |      |
| 1. INTRODUCCIÓN.....              | 16   |
| 1.1 Antecedentes de la tesis..... | 16   |
| 1.2 Objetivo de la tesis.....     | 18   |
| 1.3 Estructura de la tesis.....   | 19   |
| <br>                              |      |
| <b>CAPÍTULO 2</b>                 |      |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....      | 21   |



|  |    |
|--|----|
| 2.1 Introducción al reprocesamiento de plásticos y polietilenos de alta densidad. .... | 21 |
| 2.2 Aditivos y cargas para Polietileno de alta densidad. ....                          | 25 |
| 2.2.1 Antioxidantes .....  | 26 |
| 2.3 Moldeo por inyección del polietileno de alta densidad. ....                        | 28 |
| 2.4 Reciclaje de Plásticos .....   | 37 |
| 2.4.1 Reciclaje mecánico .....   | 38 |
| 2.4.2. Separación .....  | 38 |
| 2.4.3 Lavado y Secado .....  | 40 |
| 2.4.4 Pelletizado .....  | 43 |
| 2.4.5 Mezclado .....   | 45 |

### CAPITULO 3

#### 3. PROCESAMIENTO DE LAS PROBETAS Y MÉTODOS DE ENSAYOS

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Introducción .....  | 46 |
| 3.2 Proceso de limpieza, triturado y mezclado de polietileno..... | 47 |
| 3.3 Características del proceso de inyección. ....                | 49 |
| 3.4 Propiedades y ensayos de las probetas de HDPE .....           | 53 |
| 3.4.1 Índice de fluidez (ASTM D-1238).....                        | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 3.4.2 Resistencia al impacto (ASTM D-256)..... | 59 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| 3.4.3 Tensión y elongación (ASTM D-638). .... | 63 |
|---|----|

#### CAPÍTULO 4

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 4. ENSAYOS Y RESULTADOS ..... | 67 |
|-------------------------------|----|

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.1 Ensayo de índice de fluidez ..... | 67 |
|---------------------------------------|----|

|  |    |
|--|----|
| 4.2 Ensayo de resistencia al impacto (tipo Izod) ..... | 77 |
|--|----|

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.3 Ensayo de tensión..... | 80 |
|----------------------------|----|

#### CAPITULO 5

##### 5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E ÍNDICE DE FLUIDEZ

|   |    |
|---|----|
| 5.1 Análisis de Fluidez y su relación con el reprocesamiento..... | 88 |
|---|----|

|  |    |
|--|----|
| 5.2 Análisis de propiedades mecánicas y su relación con el reprocesamiento. .... | 92 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| 5.3 Análisis comparativos de las propiedades mecánicas e índice de fluidez del HDPE con y sin aditivo..... | 96 |
|--|----|

#### CAPITULO 6

|  |     |
|--|-----|
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 100 |
|--|-----|

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 6.1 Conclusiones..... | 100 |
|-----------------------|-----|

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.2 Recomendaciones..... | 102 |
|--------------------------|-----|

#### APÉNDICES

#### BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

|                 |  |
|-----------------|--|
| ASTM            | Sociedad Americana de Ensayos y Materiales |
| ANSI            | Instituto Nacional Americano de estándares |
| °C              | Grados centígrados                         |
| Cal             | Calorías                                   |
| Cm <sup>2</sup> | Centímetros cuadrados                      |
| cc.             | Centímetros cúbicos                        |
| ° F             | Grados Farehein                            |
| g               | Gramos                                     |
| g/10min         | Gramos en 10 minutos                       |
| HDPE            | Polietileno de Alta Densidad               |
| in              | Pulgadas                                   |
| J               | Joule                                      |
| K               | Grados Kelvin                              |
| LDPE            | Polietileno de baja densidad               |
| MFI             | Índice de fluidez                          |
| N               | Newton                                     |
| Pa.             | Pascal                                     |
| PET             | Polietileno Tereftalato                    |
| PP              | Polipropileno                              |
| PS              | Poliestireno                               |
| PVC             | Cloruro de polivinilo                      |
| Rpm             | Revoluciones por minuto                    |
| S               | Segundos                                   |
| min.            | Minutos                                    |
| mm.             | Milímetros                                 |

## SIMBOLOGÍA

|          |   |
|----------|---|
| AOX      | Antioxidante en base de Fosfito               |
| C        | Rompimiento completo                          |
| CA       | Con aditivo                                   |
| Cp       | Capacidad calorífica                          |
| F        | Fuerza  |
| H        | Rompimiento tipo bisagra                      |
| NB       | No rompimiento                                |
| P        | Rompimiento parcial                           |
| PVT      | Presión volumen temperatura                   |
| SA       | Sin aditivo                                   |
| Scrap    | Residuos de material sin contaminarse         |
| Tg       | Temperatura de transición vítrea.             |
| Tm       | Temperatura de fusión de la región cristalina |
| $\alpha$ | Coefficiente de expansión térmica             |
| $\beta$  | Comprensibilidad Isotérmica                   |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|             |  | Pág. |
|-------------|--|------|
| Figura 1.1  | Número de clasificación para el reciclado .....  | 17   |
| Figura 2.1  | Estructura del polietileno .....   | 22   |
| Figura 2.2  | Lazo continuo de scrap y resina .....  | 23   |
| Figura 2.3  | Lazo continuo de scrap.....  | 24   |
| Figura 2.4  | Estructura del cyanox 1790 en base fosfito.....  | 27   |
| Figura 2.5  | Máquina inyectora.....   | 29   |
| Figura 2.6  | Tornillo de la máquina inyectora.....  | 30   |
| Figura 2.7  | Diseño de la unidad de inyección .....   | 30   |
| Figura 2.8  | Prensa hidráulica de la máquina inyectora.....   | 31   |
| Figura 2.9  | Cierre de molde .....  | 32   |
| Figura 2.10 | Molde para probetas .....  | 32   |
| Figura 2.11 | Diseño de molde .....  | 32   |
| Figura 2.12 | Llenado de molde por inyección.....  | 34   |
| Figura 2.13 | Líneas genéricas isobáricas de polímeros amorfos y<br>semicristalinos en inyección ..... | 36   |
| Figura 2.14 | Tablero indicador de temperatura .....   | 36   |
| Figura 2.15 | Cinta de transportación para clasificación y separación .....                            | 39   |
| Figura 2.16 | Sistema de tambores con paletas para flotación de HDPE .                                 | 40   |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 2.17 | Secador centrifugador .....  | 42 |
| Figura 2.18 | Línea de lavado secado centrifugado.....   | 43 |
| Figura 2.19 | Pelletizadora .....  | 44 |
| Figura 3.1  | Máquina inyectora.....   | 50 |
| Figura 3.2  | Resistencias.....  | 50 |
| Figura 3.3  | Temperaturas de las zonas del tornillo.....  | 51 |
| Figura 3.4  | Molde para probetas con expulsador .....   | 51 |
| Figura 3.5  | Plastómetro de extrusión .....   | 54 |
| Figura 3.6  | Esquema de la máquina de MFI.....  | 55 |
| Figura 3.7  | Pistón .....   | 57 |
| Figura 3.8  | Cilindro.....  | 58 |
| Figura 3.9  | Peso.....  | 58 |
| Figura 3.10 | Resistencia al impacto.....  | 59 |
| Figura 3.11 | Dimensiones de un espécimen de prueba tipo izod.....                               | 62 |
| Figura 3.12 | Probeta de ensayo universal .....  | 63 |
| Figura 3.13 | Tensión y elongación .....   | 65 |
| Figura 3.14 | Especimen de prueba y medidas .....  | 66 |
| Figura 4.1  | Tabla de condiciones, temperatura y carga estándar para la prueba ASTM D1238 ..... | 68 |
| Figura 4.2  | Máquina de MFI .....   | 69 |
| Figura 4.3  | Balanza de precisión Oahus.....  | 69 |
| Figura 4.4  | Máquina de resistencia al impacto .....  | 77 |
| Figura 4.5  | Probetas dimensionadas según la norma ASTM D256 .....                              | 78 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 4.6  | Máquina de tracción universal.....  | 81 |
| Figura 4.7  | Probeta de acuerdo a la norma ASTM D638 .....   | 82 |
| Figura 5.1  | Índice de fluidez en 5 ciclos con y sin aditivo .....   | 89 |
| Figura 5.2  | Viscosidad.....   | 90 |
| Figura 5.3  | Densidad en cinco ciclos con y sin aditivo .....  | 91 |
| Figura 5.4  | Resistencia al impacto.....   | 93 |
| Figura 5.5  | Carga máxima en 5 ciclos con y sin aditivo.....   | 93 |
| Figura 5.6  | Esfuerzo máximo en 5 ciclos con y sin aditivo .....   | 94 |
| Figura 5.7  | Esfuerzo de ruptura en 5 ciclos con y sin aditivo .....                                       | 94 |
| Figura 5.8  | Carga de ruptura en 5 ciclos con y sin aditivo.....   | 95 |
| Figura 5.9  | Elongación en 5 ciclos con y sin aditivo .....  | 95 |
| Figura 5.10 | Índice de fluidez y resistencia al impacto en comparación con los 5 ciclos de inyección. .... | 97 |
| Figura 5.11 | Índice de fluidez y esfuerzo máximo en comparación con los 5 ciclos de inyección.....         | 98 |
| Figura 5.12 | Resistencia al impacto y esfuerzo máximo en comparación con los 5 ciclos de inyección. ....   | 99 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|          | Pág.   |
|----------|--|
| Tabla 1  | Información técnica del AOX ..... 27                           |
| Tabla 2  | Distribución de material para inyección..... 49                |
| Tabla 3  | Temperaturas de las zonas en el tornillo..... 51               |
| Tabla 4  | Número de probetas obtenidas en cada ciclo de inyección. 53    |
| Tabla 5  | Condiciones de procesamiento ..... 68                          |
| Tabla 6  | Resultados de MFI muestra 1 sin aditivo ..... 72               |
| Tabla 7  | Resultados de MFI muestra 2 sin aditivo ..... 72               |
| Tabla 8  | Resultados de MFI muestra 3 sin aditivo ..... 73               |
| Tabla 9  | Resultados de MFI muestra 4 sin aditivo ..... 73               |
| Tabla 10 | Resultados de MFI muestra 5 sin aditivo ..... 74               |
| Tabla 11 | Resultados de MFI muestra 1 con aditivo ..... 74               |
| Tabla 12 | Resultados de MFI muestra 2 con aditivo ..... 75               |
| Tabla 13 | Resultados de MFI muestra 3 con aditivo ..... 75               |
| Tabla 14 | Resultados de MFI muestra 4 con aditivo ..... 76               |
| Tabla 15 | Resultados de MFI muestra 5 con aditivo ..... 76               |
| Tabla 16 | Resultados de resistencia al impacto muestras sin aditivo.. 79 |
| Tabla 17 | Resultados de resistencia al impacto muestras con aditivo. 80  |
| Tabla 18 | Ensayo de tracción muestra 1 con aditivo..... 83               |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabla 19 | Ensayo de tracción muestra 2 con aditivo.....  | 83 |
| Tabla 20 | Ensayo de tracción muestra 3 con aditivo.....  | 84 |
| Tabla 21 | Ensayo de tracción muestra 4 con aditivo.....  | 84 |
| Tabla 22 | Ensayo de tracción muestra 5 con aditivo.....  | 85 |
| Tabla 23 | Ensayo de tracción muestra 1 sin aditivo ..... | 85 |
| Tabla 24 | Ensayo de tracción muestra 2 sin aditivo ..... | 86 |
| Tabla 25 | Ensayo de tracción muestra 3 sin aditivo ..... | 86 |
| Tabla 26 | Ensayo de tracción muestra 4 sin aditivo ..... | 87 |
| Tabla 27 | Ensayo de tracción muestra 5 sin aditivo ..... | 87 |

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1      Esquema de los cinco ciclos de inyección del polietileno de alta densidad con y sin aditivo.

## INTRODUCCIÓN

Esta tesis permite estudiar el comportamiento del material reciclado, específicamente el polietileno de alta densidad, el cual tendrá dos procedimientos a seguir; el primero es sin aditivo y el segundo con aditivo (antioxidante en base de fosfitos), ambos se efectúan durante cinco ciclos de inyección.

Este estudio permite realizar un análisis de las propiedades mecánicas y reológicas que se mantienen después de cinco ciclos de inyección.

Dentro de los ensayos se aplican:

- Ensayo de Índice de fluidez (ASTM D-1238).
- Ensayo de Resistencia al impacto (ASTM D-256)
- Ensayo de Tensión y elongación (ASTM D-638).

Debido a los resultados obtenidos en los tres tipos de ensayos de laboratorio, de acuerdo a las normas establecidas por organizaciones como la ASTM, que tiene vigente procedimientos de calidad de materiales a varias condiciones de trabajo, permiten conocer como se degrada la temperatura de procesamiento y propiedades mecánicas en cada ciclo de inyección sin

aditivo y como se puede estabilizar esta temperatura y propiedades cuando se mezcla el material con un antioxidante.

Con este estudio se logra que las empresas Ecuatorianas, puedan utilizar polietileno de alta densidad reciclado en procesos de hasta cinco ciclos de inyección, sin tener el temor de perder demasiado las propiedades mecánicas y reológicas.

De este modo el Ecuador tendrá un trato especial al medio ambiente, gracias a la re-utilización de este material.

# CAPÍTULO 1

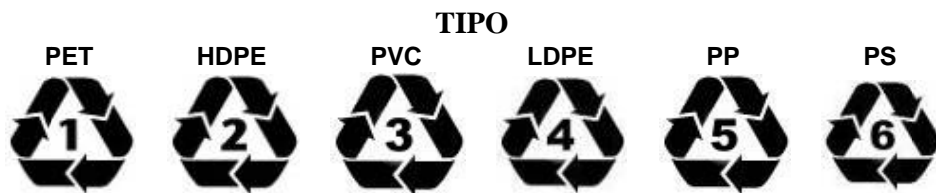
## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes de la tesis.

El aumento de materiales plásticos tiene un creciente interés desde principios de la década de los 90, pero estos todavía no tienen una adecuada forma de reciclaje, lo que produce una contaminación del material al no ser separado según la categoría que este presenta.

Si se examina la base de un recipiente de plástico, es probable que se observe un símbolo de reciclaje el cual contiene un número, como se aprecia en la figura 1.1. El número que está dentro del símbolo de reciclaje y la abreviatura que está abajo indican el tipo de polímero con que está hecho el recipiente. Estos símbolos permiten separar el recipiente según su composición. En general, entre más bajo es el

número mayor será la facilidad con que el material puede reciclarse posteriormente.



**FIGURA 1.1 NÚMERO DE CLASIFICACIÓN PARA EL RECICLADO**

En estos tiempos en el Ecuador se lleva el reciclaje de una forma algo ordenada lo que todavía no se implementa es la forma de reutilización de estos materiales. La mayoría de los recicladores en el Ecuador venden estos materiales a pequeñas industrias, para que estas procesen el material y lo re-utilicen. Las pequeñas industrias solo compran el material que ha sido reciclado por una vez, ya que después de varios procesos de reciclaje sus propiedades mecánicas y reológicas han disminuidos.

Las grandes industrias no compran material reciclado, debido a que la separación del material no es la idónea, sus propiedades han disminuido y no han pasado por el proceso de limpieza adecuado. Siendo estas las razones por las cuales estas empresas solo reutilizan el material scrap.

## **1.2 Objetivo de la tesis.**

El objetivo de este estudio es comparar las propiedades mecánicas entre un polietileno de alta densidad con un polietileno de alta densidad con aditivo (antioxidante en base de fosfitos), después de ser inyectados en un ciclo de cinco veces. Por cada inyectada se obtiene las probetas para ser analizadas y comparadas.

Existen ciertos objetivos específicos que están presentes, los cuales son los siguientes:

- Determinar el índice de Fluidez y su relación con el reprocesamiento.
- Determinar las propiedades mecánicas y su relación con el reprocesamiento.
- Analizar las propiedades mecánicas e índice de fluidez del HDPE con y sin aditivo.

Todos estos objetivos específicos son necesarios en el desarrollo de esta tesis y proporcionan un mejor criterio para determinar si el aditivo mejora las propiedades mecánicas del HDPE.

### **1.3 Estructura de la tesis.**

En esta parte de la tesis se presenta una breve descripción de cada capítulo:

Capítulo 2: En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de los aditivos y cargas del polietileno de alta densidad, específicamente sobre el antioxidante AOX en base de fosfito. También se analiza como es el proceso de inyección del HDPE, y finalmente se estudia el reciclaje de los plásticos e introducción al reprocesamiento.

Capítulo 3: En este capítulo se explica el proceso que se debe realizar a cada tipo de ensayo y cómo se aplica la norma a cada una de las probetas. También se habla del funcionamiento de las máquinas que realizan los ensayos.

Capítulo 4: En este capítulo se realizan los ensayos de índice de fluidez, resistencia al impacto y tracción de ambas muestras, es decir del Polietileno de alta densidad con y sin aditivo. Se muestran los resultados obtenidos en cada prueba.



Capítulo 5: En este capítulo con los resultados obtenidos de las muestras anteriores, se hace un análisis de propiedades mecánicas, resistencia al impacto, variación de la viscosidad y las relaciones entre ellas.

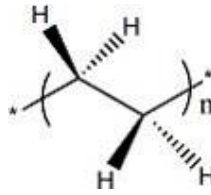
Capítulo 6: En este capítulo se puntualizan todas las conclusiones obtenidas durante esta tesis y se plantean recomendaciones para obtener mejores resultados.

## CAPÍTULO 2

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### 2.1 Introducción al reprocesamiento de plásticos y polietilenos de alta densidad.

El polietileno (PE) es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva  $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$ . Por su alta producción mundial (aproximadamente 60 millones de toneladas son producidas anualmente (2008) alrededor del mundo) es también el más barato, siendo uno de los plásticos más comunes. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  y llamado eteno por la IUPAC), del que deriva su nombre (Ver propiedades en Anexo).

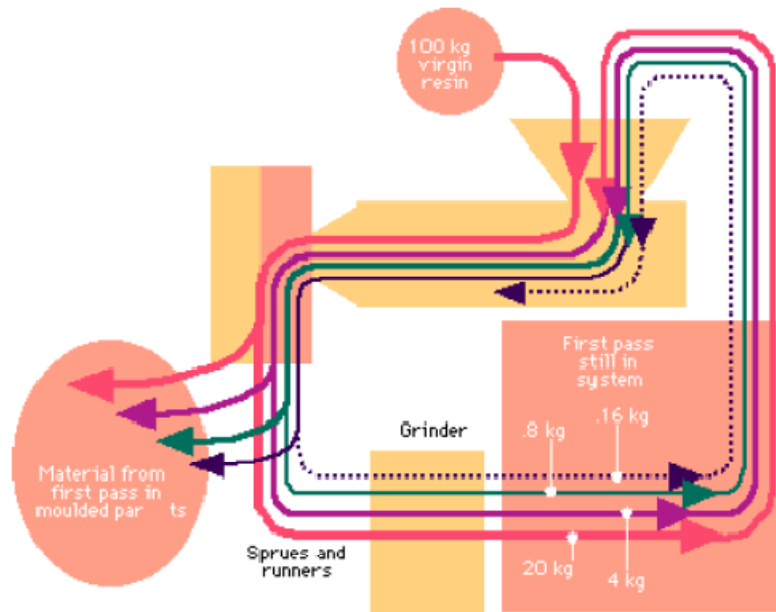


**FIGURA 2.1 ESTRUCTURA DEL POLIETILENO**

Las industrias plásticas están evolucionando cada día. Una de sus grandes metas es poder trabajar con material reciclado en un cien por ciento. La revista IMM publicó un artículo sobre el estudio del mantenimiento de la calidad del scrap, tras cinco ciclos de inyección.

Los expertos definen el siguiente procedimiento:

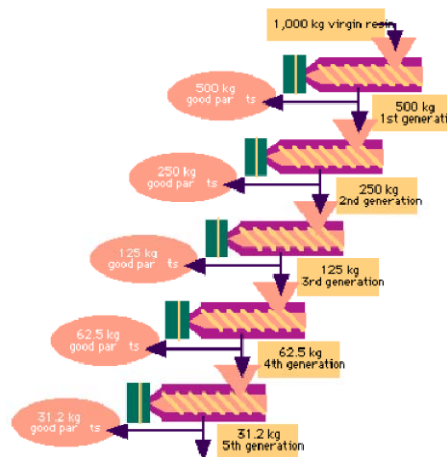
- Se ingresa resina virgen en la primera inyectada. Esta resina produce scrap que es conocido como material inyectado, al no cumplir con las normas o características establecidas tiene que molerse y pelletizarse de nuevo. Este material no es contaminado.



**FIGURA 2.2 LAZO CONTINUO DE SCRAP Y RESINA**

- En la segunda inyectada se mezcla material virgen, pero con la primera mezcla de scrap triturado. Luego se tritura por segunda vez y se vuelve a mezclar con material virgen. Este proceso continua sin tener final de consumo de scrap, esto indica que no se tiene control de cuanto scrap se mezcla con el material virgen.
- Este ciclo sin control de scrap produce bajas propiedades mecánicas, degradación de tiempo y temperatura. Se puede corregir esto si en algún momento se para el ciclo de inyección y se empieza de nuevo.

Existe un proceso más eficiente. Este método consiste en utilizar todo el material virgen en la primera inyectada. Después de terminar este ciclo de inyección, se tritura todo el scrap que esta produjo y se inyecta por segunda vez.



**FIGURA 2.3 LAZO CONTINUO DE SCRAP**

Luego se almacena todo el scrap producido en la segunda inyectada y se lo tritura para repetir el proceso una tercera vez. Esto continúa hasta un ciclo de inyección aproximado de cinco veces.

Las propiedades mecánicas, degradación de la temperatura y tiempo si disminuyen en un 30%, si el material no es mezclado con ningún aditivo en los siguientes procesos de inyección.

## **2.2 Aditivos y cargas para Polietileno de alta densidad.**

Los aditivos son necesarios para obtener un material que sea susceptible de ser utilizado finalmente, la cantidad de opciones disponibles de estos aditivos es impresionante, pero los fabricantes deben tenerlos en cuenta para poder realizar un producto adecuado a la aplicación necesaria.

La química de los aditivos es compleja y en muchos casos implica reacciones químicas, para asegurar su funcionamiento. Es necesario conocer los requisitos que el material final debe cumplir, por ejemplo, un plástico diseñado para estar a la sombra, no necesita resistencia contra los rayos ultravioleta, pero probablemente necesite resistencia contra la propagación de la flama. Es por eso que se clasifican de la siguiente manera:

- Retardantes a la llama
- Antioxidantes
- Espumantes
- Plastificantes
- Absorbedores de luz UV
- Antiestáticos
- Antibacteriales.

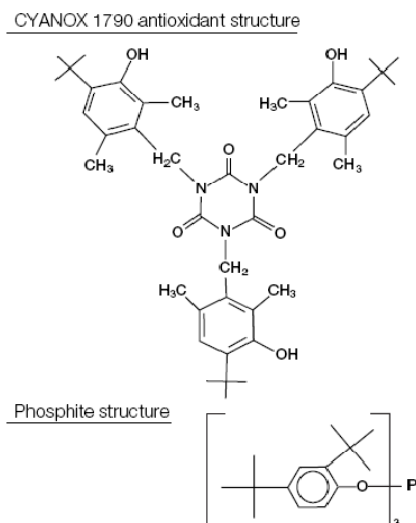
### **2.2.1 Antioxidantes**

Existen muchas variedades de antioxidantes como: a base fosfito, fosfato, etc. Pero todas cumplen la misma función, que es evitar la degradación térmica durante la extrusión o la inyección del material.

En este estudio se usa el QUIMICAL MASTERBATCH AOX, que 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.

El QUIMICAL MASTERBATCH AOX es elaborado con tecnología de ARCO COLORES S.A. de C.V de México y bajo las más estrictas normas de calidad.

El CYANOX 2777 es un antioxidante mezclado en una proporción de 1:2 con el CYANOX 1790 antioxidante y fosfito.



**FIGURA 2.4 ESTRUCTURA DEL CYANOX 1790 EN BASE DE FOSFITO**

Su apariencia es en gránulos blancos, con resina a base de polietileno de baja y alta densidad.

Sus características técnicas son las siguientes:

**TABLA 1. INFORMACIÓN TÉCNICA DEL AOX**

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Fluidez de la resina base | 5-8                                    |
| Resistencia térmica       | Más de 300°C                           |
| Compatibilidad            | Poliiolefinas                          |
| Toxicidad                 | Puede entrar en contacto con alimentos |
| Aplicaciones              | Extrusión e inyección de poliolefinas  |
| Dosificación              | 0.8 - 1.5 %                            |
| Embalaje                  | Fundas de 25 Kg                        |



El antioxidante AOX contiene los siguientes beneficios:

- Mínimo color y contribución del olor.
- La volatilidad es baja.
- El estabilizador del proceso es excelente.
- El amarillento del gas es bajo.
- No pasa humedad.
- Resistente a la formación de la manchitas negras y puntos.
- Compatible con los polímeros HALS y UVAs.

### **2.3 Moldeo por inyección del polietileno de alta densidad.**

#### **Moldeo por inyección.**

El moldeo por inyección es una de las tecnologías de procesamiento de plástico más famosas, ya que representa un modo relativamente simple de fabricar componentes con formas geométricas de alta complejidad. Para ello se necesita una máquina de inyección que incluya un molde. En este último, se fabrica una cavidad cuya forma y tamaño son idénticos a las piezas que se desea obtener. La cavidad se llena con plástico fundido, el cual se solidifica, manteniendo la forma moldeada.



**FIGURA 2.5 MÁQUINA INYECTORA**

### **Partes más importantes de una máquina inyectora.**

#### **Unidad de inyección**

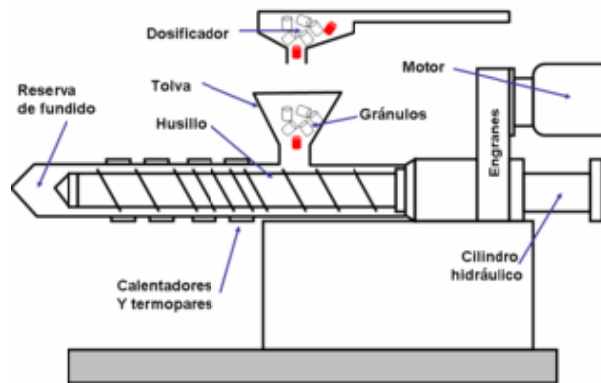
La función principal de la unidad de inyección es la de fundir, mezclar e inyectar el polímero. Para lograr esto se utilizan husillos (tornillos de hierro o madera que se usan en el movimiento de algunas máquinas) de diferentes características según el polímero que se desea fundir. El estudio del proceso de fusión de un polímero en la unidad de inyección debe considerar tres condiciones termodinámicas:

- La temperatura de procesamiento del polímero.
- La capacidad calorífica del polímero  $C_p$  [cal/g °C].
- El calor latente de fusión, si el polímero es semicristalino.



**FIGURA 2.6 TORNILLO DE LA MÁQUINA INYECTORA**

La unidad de inyección es en origen una máquina de extrusión con un solo husillo, teniendo el barril calentador y sensores para mantener una temperatura programada constante.



**FIGURA 2.7 DISEÑO DE LA UNIDAD DE INYECCIÓN**

### **Unidad de cierre**

Es una prensa hidráulica o mecánica, con una fuerza de cierre bastante grande que contrarresta la fuerza ejercida por el polímero fundido al ser inyectado en el molde. Las fuerzas localizadas pueden generar presiones del orden de cientos de MPa.



**FIGURA 2.8      PRENSA HIDRÁULICA DE LA MÁQUINA  
INYECTORA**

Si la fuerza de cierre es insuficiente, el material se escapa por la unión del molde, causando así que el molde se tienda a abrirse. Es común utilizar el área proyectada de una pieza (área que representa perpendicularmente a la unidad de cierre el total de la cavidad) para determinar la fuerza de cierre requerida, excluyendo posibles huecos o agujeros de la pieza.

$$F = P_m \times A_p \text{ ECUACIÓN 2.1}$$

Donde:

F = Fuerza (N)

P<sub>m</sub> = Presión media (Pa).

A<sub>p</sub> = Área proyectada (m<sup>2</sup>).



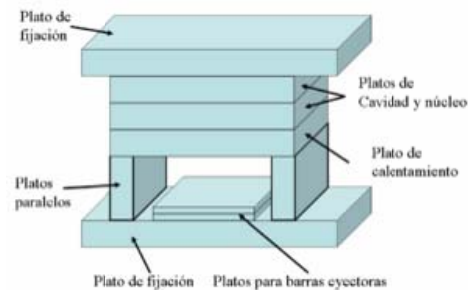
**FIGURA 2.9 CIERRE DE MOLDE**

### **Molde**

El molde (también llamado herramienta) es la parte más importante de la máquina de inyección, ya que es el espacio donde se genera la pieza; para producir un producto diferente, simplemente se cambia el molde, al ser una pieza intercambiable que se atornilla en la unidad de cierre.



**FIGURA 2.10 MOLDE PARA PROBETAS**



**FIGURA 2.11 DISEÑO DE MOLDE**

### **Control de parámetros**

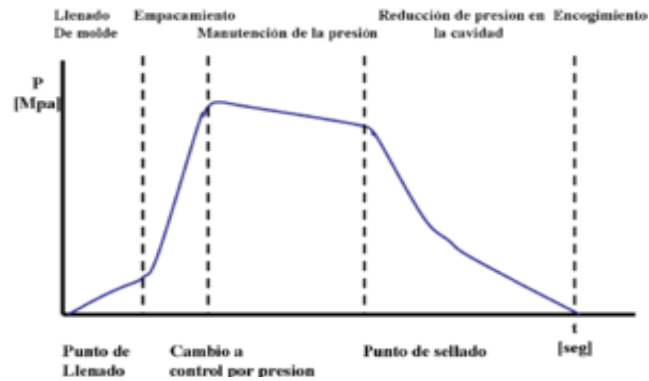
Los parámetros más importantes para un proceso de inyección son los siguientes.

### **Ciclo de moldeo**

En el ciclo de moldeo se distinguen 6 pasos principales:

- Molde cerrado y vacío. La unidad de inyección carga material y se llena de polímero fundido.
- Se inyecta el polímero abriéndose la válvula y con el husillo que actúa como un pistón, se hace pasar el material a través de la boquilla hacia las cavidades del molde.
- La presión se mantiene constante para lograr que la pieza tenga las dimensiones adecuadas, pues al enfriarse tiende a contraerse.
- La presión se elimina. La válvula se cierra y el husillo gira para cargar material, al girar también retrocede.
- La pieza en el molde termina de enfriarse (este tiempo es el más caro pues es largo e interrumpe el proceso continuo), la prensa libera la presión y el molde se abre; las barras expulsan la parte moldeada fuera de la cavidad.

- La unidad de cierre vuelve a cerrar el molde y el ciclo puede reiniciarse.



**FIGURA 2.12 LLENADO DE MOLDE POR INYECCIÓN.**

### **PVT (relaciones de presión-volumen-temperatura).**

En cualquier polímero, las relaciones entre presión, volumen y temperatura son muy importantes para obtener un proceso de inyección eficiente, ya que el volumen específico de un polímero aumenta al ascender la temperatura del mismo. Entre estas dos dimensiones se presentan curvas isobáricas por las cuales se guía el polímero.

El comportamiento de los polímeros amorfos y semicristalinos en el paso de enfriamiento es muy diferente, si se quiere obtener una pieza de alta calidad.

Para el diseño del equipo de proceso es necesario conocer las relaciones de PVT de los polímeros que se utilizan, en su forma final, es decir aditivados. A continuación se mencionan los parámetros más comunes para el inicio de las relaciones de PVT, basados en la ecuación de Flory:

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica

$\beta$  = Compresibilidad isotérmica

$$\alpha = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \text{ ECUACIÓN 2.2}$$

$$\beta = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \text{ ECUACIÓN 2.3}$$

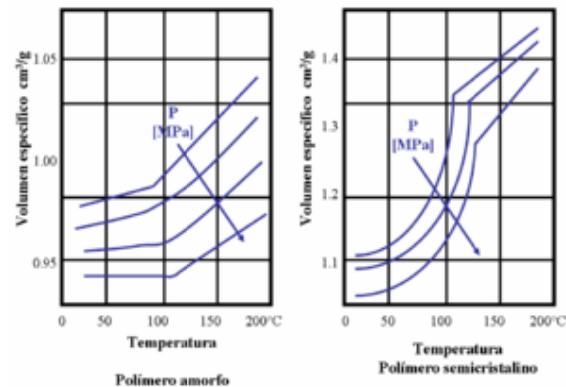
Y una ecuación empírica es:

$$\beta (P, T) = \left\{ (P + B) \left[ \frac{1}{0.0894} - \ln \left( 1 + \frac{P}{B} \right) \right] \right\}^{-1} \text{ ECUACIÓN 2.4}$$

Cuando  $P = 0$ ,  $\beta (0, T) = 0.0895/B(T)$

Las relaciones de PVT se utilizan en ingeniería de polímeros para lograr un sistema técnico, que basado en la teoría molecular, proporcionen datos aplicados a los polímeros en estado fundido en un amplio rango de presión y temperatura. Esto se logra con datos empíricos concretos y limitados.





**FIGURA 2.13 LÍNEAS GENÉRICAS ISOBÁRICAS DE POLÍMEROS AMORFOS Y SEMICRISTALINOS EN INYECCIÓN**

### Temperatura de proceso

Para inyectar un polímero, específicamente un termoplástico, es necesario conocer su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y su temperatura de fusión de la región cristalina ( $T_m$ ), si es un polímero semicristalino.



**FIGURA 2.14 TABLERO INDICADOR DE TEMPERATURA**

La temperatura de operación de cada termoplástico no es estándar, y varía según el proveedor. Es necesario solicitarle una Hoja de Especificaciones donde esté el índice de fluidez y la temperatura de trabajo. Aquí se debe de establecer el rango de temperatura de

trabajo sin que este afecte a la temperatura de degradación, con lo cual se puede trabajar el material eficientemente.

## **2.4 Reciclaje de Plásticos**

El plástico es difícilmente biodegradable, por esta razón se convierte en un producto altamente contaminante, más aún si se tiene en cuenta que los plásticos al quemarse producen gases venenosos. El 90% de los plásticos es reciclable y podemos encontrarlo en numerosas formas y presentaciones. Sin embargo, debido a su gran variedad, es difícil su clasificación.

Los residuos orgánicos tardan entre 10 y 15 años para degradarse de un 25 a un 50%, y el problema de manejo generado por residuos no biodegradables, como ciertos plásticos, es considerablemente superior.

Existen dos tipos diferentes de reciclados, el químico y el reciclaje mecánico. En este estudio se emplea el reciclaje mecánico.

Desde el punto de vista técnico, se puede decir que las plantas de reciclado mecánico requieren inversiones moderadas en cambio las del reciclaje químico requieren inversiones mayores.

### **2.4.1 Reciclaje mecánico**

La técnica más utilizada en la actualidad es el reciclado mecánico. Esta consiste en la molienda, separación y lavado de los envases. Las escamas resultantes de este proceso se pueden destinar en forma directa, sin necesidad de volver a hacer pellets, en la fabricación de productos por inyección o extrusión.

Los plásticos que son reciclados mecánicamente provienen de dos grandes fuentes:

- Los residuos plásticos proveniente de los procesos de fabricación, llamados scrap. Este es más fácil de reciclar porque está limpio y es homogéneo en su composición, ya que no está mezclado con otros tipos de plásticos.
- Los residuos plásticos proveniente de la masa de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

### **2.4.2. Separación**

La separación tiene por finalidad liberar al plástico de diferentes tipos de materiales, especialmente de los otros tipos de polímeros, metales y algunas veces vidrio o papel.

La importancia de la separación radica en que si existiesen otros materiales presentes, éstos podrían perjudicar el proceso de reciclaje o directamente empeorar la calidad del producto final.

Existen métodos de separación automatizada basados en las diferencias de gravedad específica, difracción de rayos x y disolución en solventes.



**FIGURA 2.15 CINTA DE TRANSPORTACIÓN PARA CLASIFICACIÓN Y SEPARACIÓN**

Otra alternativa es la de tener sistemas de flotación cuando se reducen de tamaño todas las especies a la vez, es decir se puede contar con sistemas de flotación, ya sean éstos equipos Sink and Float a burbujeo o simplemente tinas de flotación vibradoras con bandas transportadoras como las que se muestra en la figura 2.16. En estas cintas, el HDPE con una densidad menor se mantiene en la superficie y es

recogido por un tornillo sinfín que lo transporta a la siguiente etapa.



**FIGURA 2.16 SISTEMA DE TAMBORES CON PALETAS PARA FLOTACIÓN DE HDPE**

### **2.4.3 Lavado y Secado**

Los HDPE están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, aceite, solventes y en algunos casos pegamento. De ahí que tienen que ser primero limpiados en un baño que garantice la eliminación de contaminantes.

El uso de hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado es una alternativa, el plástico contaminado es removido al ser ligero ya que flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan.

Después del proceso de limpieza, los plásticos se llaman hojuelas limpias o granulado limpio.

El uso de detergentes está limitado por la cuestión ambiental, debido a que el agua utilizada en el proceso de lavado debe ser tratada para que pueda ser reutilizada. Además es necesario encontrar un adecuado sistema de purificación de las aguas residuales, para no contaminar ni dañar el entorno en el cual se desarrolla el proceso de reciclado.

El uso de sosa cáustica para el proceso de lavado es adecuado por las bajas concentraciones necesarias y porque en disolución se puede reutilizar para otros lavados, simplemente reponiendo la que se pierde en el proceso de lavado. Sobre este punto ya existen tecnologías y sistemas de recuperación y tratamiento de aguas residuales de procesos de lavado de materiales contaminados que están disponibles.

### **Secado**

Posterior al ciclo de lavado sigue un proceso de secado el cual debe eliminar el remanente de humedad del material, para que pueda ser comercializado y posteriormente procesado. Pueden usarse secadores centrifugados, es decir

tambores especialmente diseñados para extraer la humedad por las paredes externas del equipo.

También se puede utilizar secadores de aire, ya sea caliente o frío, que haciendo circular aire por el material picado, eliminen la humedad hasta límites permisibles.



**FIGURA 2.17 SECADOR CENTRIFUGADOR**

Otros sistemas se han desarrollado para este fin, dentro los cuales también están los de procesos simultáneos, que combinan los dos procedimientos anteriormente mencionados. Es decir, sistemas que al mismo tiempo operan como centrífugas con aire en contracorriente.

Procesos que combinan el molido y el lavado o el lavado y el secado, también son posibles y constituyen alternativas del proceso.



**FIGURA 2.18 LÍNEA DE LAVADO SECADO  
CENTRIFUGADO**

La separación del material se divide en dos grupos el de acopio del material, y el de empacado.

#### **2.4.4 Pelletizado**

El granulado limpio y seco puede ser ya vendido o puede convertirse en pellet. Para esto, el granulado debe fundirse y pasarse a través de un cabezal para tomar la forma de espagueti al enfriarse en un baño de agua.

La extrusión puede clasificarse como un proceso continuo, en el cual en todo instante de trabajo normal de un equipo se obtiene un producto invariable y constante en cualquier punto de su longitud.



Durante la transformación, la resina alimentada es reblandecida por acción de la temperatura que proviene generalmente de resistencias eléctricas y por la fricción de un elemento giratorio denominado husillo.

En este estado de "fusión" el plástico es forzado e impulsado a salir bajo presión a través de una matriz metálica que le confiere forma definida y sección transversal constante, esta matriz denominada "dado" es la que le da la forma útil al producto para que finalmente éste sea enfriado, favoreciendo su solidificación y confiriéndole estabilidad. Evitando así deformaciones posteriores. Una vez frío es cortado en pedazos pequeños llamados "pellets".



**FIGURA 2.19 PELLETIZADORA**

#### **2.4.5 Mezclado**

El mezclado es una de las etapas del proceso de inyección que consiste en mezclar material virgen con material reciclado, o con cualquier aditivo.

La máquina capaz de desempeñar esta función es una mezcladora. Existen algunos tipos de mezcladoras entre las más comunes tenemos a la de tambor vertical y horizontal.

Esta máquina mezcla el material en un plazo de 3 - 4 minutos la mezcladora rápida prepara una mezcla bien batida y homogeneizada.

Los tambores giran aproximadamente a 1400 rpm. Por lo tanto es capaz de mezclar completamente todos los materiales sólidos de la mezcla.

## **CAPITULO 3**

### **3. PROCESAMIENTO DE LAS PROBETAS Y MÉTODOS DE ENSAYOS**

#### **3.1 Introducción**

El estudio de las propiedades mecánicas y reológicas que se obtiene, está basado en función de material reciclado con el cual se disminuye la contaminación en el medio ambiente en las industrias de plásticos en el Ecuador. Existen dos tipos de materiales:

- Polietileno de alta densidad reciclado de postconsumo proveniente directamente en el procesamiento de plásticos.
- Mezcla de Polietileno de Alta Densidad reciclado de postconsumo con antioxidante AOX.

### **3.2 Proceso de limpieza, triturado y mezclado de polietileno**

Para poder realizar el estudio de las propiedades que se obtienen del polietileno de alta densidad se necesita seguir el siguiente procedimiento:

#### **Proceso de reciclaje**

El material reciclado de polietileno de alta densidad postconsumo proviene principalmente de envases de bebidas, juguetes, entre otros. Es un producto que viene mezclado con material pigmentado de diferentes colores. Son molidos a una cierta medida, no específica o especificada por una norma, ya que el distribuidor es el que realiza este proceso, pero se puede recomendar un tamaño no más grande de 1 cm.

#### **Limpieza, separación y secado del polietileno de alta densidad**

Para que el material esté en condiciones aptas para el proceso de inyección se coloca el saco de 25 Kg. de Polietileno de alta densidad en un tanque con capacidad para 55 galones el cual está lleno con agua hasta la mitad. Se procede a vertir el material en el tanque para ser lavado y separado. Como se conoce la densidad del agua es mayor que la del polietileno de alta densidad por lo que este material se mantiene en la superficie y todo el resto de impurezas en la mitad

y fondo del tanque, con lo cual se selecciona solo al material que flota sobre la superficie del agua, este proceso se realiza cinco veces para obtener mejores resultados.

Cuando el material está libre de toda impureza se expone al sol durante tres días para un secado completo del material. Este es un método que no está basado en ninguna norma, pero es muy eficiente.

#### **Trituración del HDPE**

El material reciclado postconsumo, es previamente triturado en un molino para reducir su tamaño; pero dichos molinos no dan un tamaño uniforme al material. Al introducir este material en la inyectora, puede producirse una descalibración en la máquina inyectora, ya que esta es muy precisa en el gramaje del material que ingresa al tronillo. Por esto es mejor volver a moler los 25 kg. del polietileno de alta densidad para dar tamaño uniforme y evitar problemas en la máquina inyectora.

#### **Mezclado con aditivo AOX**

Para obtener el material de inyección se debe tomar en cuenta las siguientes distribuciones para ambos tipos con y sin aditivo.

**TABLA 2 DISTRIBUCIÓN DE MATERIAL PARA INYECCIÓN.**

| Sin aditivo | Con aditivo  |
|-------------|--|
| 10 Kg. HDPE | 9,85 Kg. HDPE + 150 g AOX = 10 Kg. de HDPE con AOX |

De un saco de 25 Kg. de polietileno de alta densidad grado inyección, se separa 10 Kg. los cuales no contienen aditivo. Del mismo saco se procede a separar 9.85 Kg. de HDPE y se va a mezclar con 150 g. del antioxidante AOX. Esto equivale al 1.5% de 10 Kg. del polietileno. El polietileno y el AOX son introducidos en un mezclador tipo tambor para ser mezclado durante 15 minutos obteniendo una mezcla uniforme del AOX con el polietileno de alta densidad. Con este material se va a realizar el proceso de inyección de las probetas que van a ser analizadas. Pero este material no tiene las características necesarias, como no estar clasificado según las densidades ya que este material no es solo polietileno de alta densidad sino que contiene otro tipo de impurezas como las etiquetas de los envases triturados, el residuo de los líquidos contenidos en los envases.

### **3.3 Características del proceso de inyección.**

#### **Inyectado del polietileno de alta densidad sin y con aditivo**

Se tiene dos sacos de polietileno de alta densidad uno sin aditivo y otro con aditivo AOX. Los primeros 10 Kg de HDPE sin aditivo son llevados a una inyectora para seguir este proceso.



**FIGURA 3.1 MÁQUINA INYECTORA**

La inyectora es encendida con 10 minutos de anticipación para que caliente las cuatro resistencias que esta alrededor del tornillo se paradas en 3 zonas como se muestra en la figura 3.2 y la cuarta resistencia está en la boquilla.



**FIGURA 3.2 RESISTENCIAS**

Estas resistencias son graduadas a diferentes temperaturas dependiendo de cada zona. El polietileno de alta densidad tiene una temperatura de fusión entre (128-158 °C), se gradúa la temperatura de las zonas como se muestra en la tabla:

**TABLA 3 TEMPERATURAS DE LAS ZONAS EN EL TORNILLO**

| ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 |
|--------|--------|--------|
| 150 °C | 115 °C | 125 °C |

**FIGURA 3.3 TEMPERATURAS DE LAS ZONAS EN EL TORNILLO**

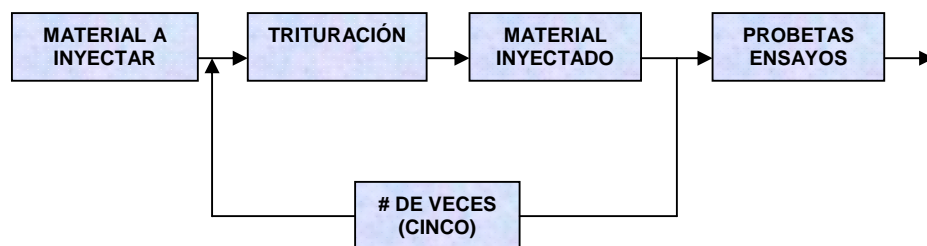
Después de transcurrido este tiempo se lleva los 10Kg. de HDPE sin aditivo hasta la tolva donde el tornillo la va transportando por medio de las hélices, hasta que es empujado hasta la boquilla. Para salir el material fundido al molde el cual es enfriado por agua para mantener una temperatura de molde. Una vez inyectado el material en el molde este se abre para permitir que el expulsador desprenda la probeta del molde y caiga a la cubeta recolectora.

**FIGURA 3.4 MOLDE PARA PROBETAS CON EXPULSADOR**



El proceso consiste en inyectar este material cinco veces como se muestra en el esquema y por cada vez que se inyecte el material se obtiene una cantidad de material para realizar los ensayos respectivos, teniendo en cuenta que el material que se inyecta por primera vez, es molido para obtener pellets y ser inyectado por segunda vez, este proceso se repite hasta llegar a las cinco inyectadas.

### ESQUEMA DEL CICLO DE INYECCIÓN



Del segundo saco de 10 kg. de polietileno de alta densidad con aditivo antioxidante AOX, se realiza el mismo ciclo de inyección mencionado en el primer saco 10 kg. HDPE.

Las primeras probetas que sale del molde son descartadas, ya que el tornillo puede contener alguna impureza de inyecciones anteriores.

La cantidad de probetas que se obtienen en cada ciclo de inyección con y sin aditivo se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA 4 NÚMERO DE PROBETAS OBTENIDAS EN CADA CICLO DE INYECCIÓN**

| <b>NÚMERO DE CICLOS</b> | <b>CICLOS SIN ADITIVO</b> | <b>CICLOS CON ADITIVO</b> |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>PRIMER</b>           | 165                       | 259                       |
| <b>SEGUNDO</b>          | 63                        | 111                       |
| <b>TERCERO</b>          | 59                        | 64                        |
| <b>CUARTO</b>           | 42                        | 40                        |
| <b>QUINTO</b>           | 25                        | 28                        |

### **3.4 Propiedades y ensayos de las probetas de HDPE**

A continuación se describen las propiedades y ensayos de las probetas de polietileno de alta densidad con y sin aditivo.

#### **3.4.1 Índice de fluidez (ASTM D-1238)**

El índice de fluidez, comúnmente llamado MFI (Melt Flow Index), corresponde a la cantidad de material en peso que fluye a través de una boquilla durante un tiempo de 10 minutos, para condiciones de temperatura y de presión predefinidas. A pesar de no proporcionar resultados característicos de la viscosidad de un material como serían

obtenidos mediante reología capilar, el índice de fluidez es un parámetro muy utilizado en las industrias para determinar la procesabilidad de un material.



**FIGURA 3.5 PLASTÓMETRO DE EXTRUSIÓN**

El procedimiento 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 pie del pistón está entre 46 y 20.6 mm (1.81 y 0.81 in.) sobre el dado.

#### **Uso del ensayo de índice de fluidez**

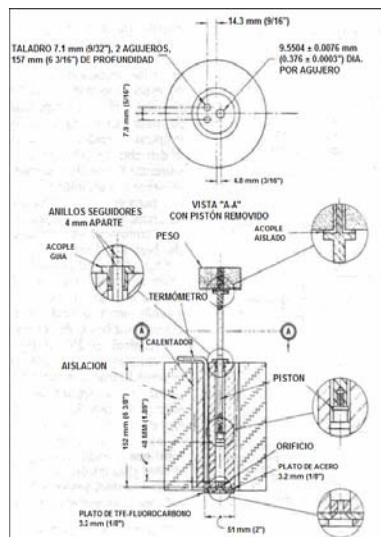
Esta prueba se utiliza para control de calidad en termoplásticos. Este ensayo sirve para indicar la uniformidad de la tasa de flujo de polímero, semejando que fue fabricado mediante un proceso individual y en este caso, puede ser indicativo de uniformidad de otras propiedades.

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 partes de la máquina de índice de fluidez son las siguientes:

- Dado
- Pistón
- Cilindro
- Peso



**FIGURA 3.6 ESQUEMA DE LA MÁQUINA DE MFI**

El plastómetro es un equipo de pistón de peso muerto que contiene un cilindro de acero calentado y controlado

termostáticamente, con un dado en la parte más baja y un pistón pesado operando dentro del cilindro.

El dado es de acero con un agujero interno de diámetro 9.5504 mm. (0.3760 in.) el cual cae libremente en el cilindro. Tiene una longitud aproximada de 8 mm. Este dado se lo introduce en el cilindro para que sirva de boquilla del material y permita que este fluya más lento.

El taladrado y su acabado son críticos. Estos no tienen marca visible de perforado u otra marca de herramientas y no deben tener excentricidad detectable. El taladrado del dado es finalizado por técnicas conocidas para producir aproximadamente 12 rms o mejor en concordancia con la ANSI B46.1.

El pistón es de acero con el buje aislante a la cima como una barrera a la transferencia de calor del pistón al peso. El diámetro del pistón es de 9,47 mm. y de 162,35 mm. de largo.



**FIGURA 3.7 PISTÓN**

El cilindro es el lugar donde se almacena el material que va a ser analizado, este tiene un diámetro 50.8 mm. (2 in.), 162 mm. (6 3/8 in.) en longitud con un agujero recto de  $9.5504 \pm 0.0076$  mm. ( $0.3760 \pm 0.0003$  in.), desplazado 4.8 mm. (3/16 in.) desde el eje del cilindro.

El cilindro está recubierto por resistencia que incrementa la temperatura hasta llegar a la temperatura deseada. Un plato de 3.2 mm. (1/8 in.) es 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.

Las dimensiones esenciales para un cilindro satisfactorio están mencionadas en la figura 3.6. El perforado del cilindro es acabado por técnicas conocidas para producir aproximadamente 12 rms o mejor, en concordancia con la norma ANSI B46.1.



**FIGURA 3.8 CILINDRO**

El peso que se coloca sobre el pistón, depende del material analizarse y de la temperatura que este posea según la norma.



**FIGURA 3.9 PESO**

### 3.4.2 Resistencia al impacto (ASTM D-256)

Los ensayos de choque determinan, la fragilidad o capacidad de un material de absorber cargas instantáneas, por el trabajo necesario para producir la fractura de la probeta de un solo impacto. Este nuevo concepto tampoco ofrece una propiedad definida del material, sino que constituye un índice comparativo de su plasticidad, con respecto a las obtenidas en otros ensayos realizados en idénticas condiciones, dado que no admite otra condición de comparación o semejanza. Por lo tanto, deben tenerse muy en cuenta los distintos factores que producen el efecto fragilizante.



**FIGURA 3.10 RESISTENCIA AL IMPACTO**

Los métodos propuestos por Izod en 1903 y por Charpy en 1909, consisten en romper el material que se ensaya, bajo un efecto dinámico que se produce por el impacto sobre el



mismo de una masa de peso y velocidad conocida. En ambos casos la ruptura se produce por flexionamiento de la probeta, por lo que se los denomina flexión por choque.

Para el estado de tensión creado por la sollicitación dinámica de choque, la velocidad de aplicación de carga estandarizada es superior a la crítica de ruptura, por lo que la deformación es localizada con epicentro en la entalla.

La energía perdida por el péndulo durante la ruptura 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 es 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.

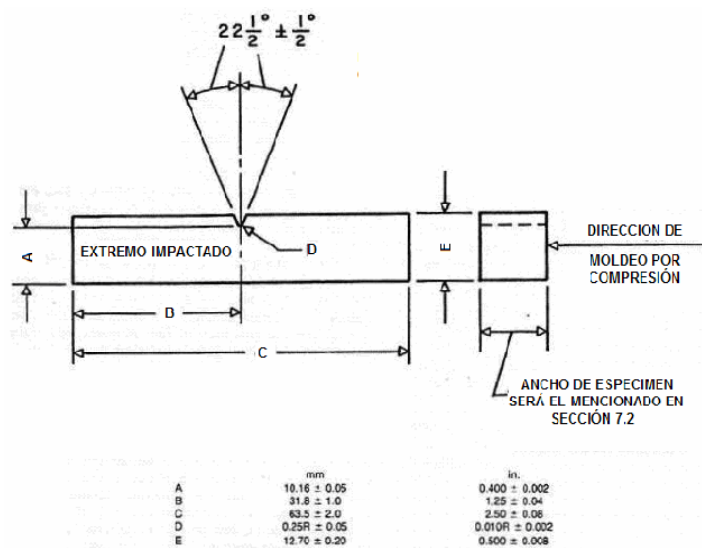
H= Rompimiento tipo Bisagra.- un rompimiento incompleto, como que una parte del espécimen no puede soportarse a si mismo sobre la horizontal cuando la otra parte es sostenida verticalmente (menos que 90° incluido el ángulo).

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.

En el método Izod la probeta se coloca en voladizo y en posición vertical, siendo asegurada por la mesa de apoyo de modo tal que la entalladura quede en el plano de las mordazas; en estas condiciones el extremo del martillo golpea al material a 22 mm. de las mismas.



**FIGURA 3.11 DIMENSIONES DE UN ESPÉCIMEN DE PRUEBA TIPO IZOD**

Los especímenes de prueba deberán estar a  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  [ $73 \pm 3.6^\circ \text{F}$ ] y  $50 \pm 5\%$  de humedad relativa por no menos de 40 horas antes de hacer la hendidura y previo a la prueba en concordancia con el Procedimiento A de la Práctica D618, 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.

### 3.4.3 Tensión y elongación (ASTM D-638).

La resistencia a la tensión es literalmente, la cantidad de fuerza requerida para la ruptura completa de un material. Las unidades de medida son el kilogramo por centímetro cuadrado del área original transversal.



**FIGURA 3.12    PROBETA DE ENSAYO UNIVERSAL**

La elongación es la cantidad de estiramiento que el material puede soportar antes de romperse. La máquina de prueba consisten en dos mordazas una fija y otra móvil montada sobre dos ejes, estas mordazas sirven para sujetar la

probeta, la tensión es aumentada hasta el punto de ruptura de la probeta y el software da la tensión y la cantidad de elongación de la probeta.

Mucha elongación es índice de resistencia, puesto que indica que el material absorbe una gran cantidad de energía antes de romperse.

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

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 mantenerse limpias y afiladas.

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

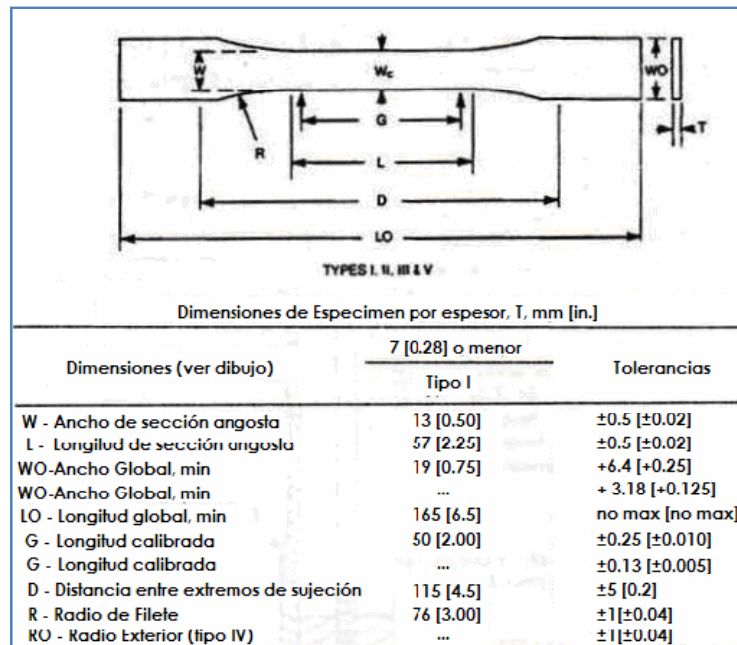


**FIGURA 3.13 TENSION Y ELONGACION**

### **Espécimen de Prueba**

Los plásticos rígidos y semirrígidos tienen de las dimensiones mostradas en la Figura 3.14. El espécimen tipo I es el

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



**FIGURA 3.14 ESPÉCIMEN DE PRUEBA Y MEDIDAS**

# CAPÍTULO 4

## 4. ENSAYOS Y RESULTADOS

### 4.1 Ensayo de índice de fluidez

El índice de fluidez del polietileno de alta densidad con y sin aditivo, se determina usando un Plastómetro de extrusión (Melt flow Tinius Olsen) y siguiendo el procedimiento escrito por la norma ASTM D-1238 [1990].

#### **Condiciones de procedimiento**

Condiciones estándar de prueba están dadas una tabla. El sistema alfabético usado previamente para designar las condiciones de prueba son mostradas en la Figura 4.1, solo para referencia. Las condiciones de prueba se muestran así: Condición \_ \_ \_ / \_ \_ \_ , donde primero se muestra la temperatura que está en grados Celsius, seguida por el peso en kilogramos.



| D 1238  |                      |                 |  |        |       |
|---|----------------------|-----------------|--|--------|-------|
| Tabla 1 Condiciones de prueba de Temperatura y Carga estándar |                      |                 |  |        |       |
| Condición   |                      |                 | Presión Aproximada                             |        |       |
| Solo para referencia  | Designación Estándar | Temperatura, °C | Carga total incluida<br>incluido el pistón, kg | 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 4.1 TABLA DE CONDICIONES, TEMPERATURA Y CARGA ESTÁNDAR PARA LA PRUEBA ASTM D1238**

Al ser todas las muestras polietileno de alta densidad los ensayos se realizan con las siguientes características obtenidas de la tabla anterior:

**TABLA 5 CONDICIONES DE PROCESAMIENTO**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>TEMPERATURA HDPE</b>                            | 190 °C    |
| <b>PESO</b>  | 2,160 Kg. |
| <b>CANTIDAD DE MATERIAL<br/>(por cada muestra)</b> | 0,345 g   |

### Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo fueron los siguientes:

### **Máquina Plastómetro de extrusión.**

- Tipo de medición: Índice de fluidez
- Unidad: Gramos / 10 minutos
- Tinius Olsen Willow Grove, PA USA modelo MP993



**FIGURA 4.2 MÁQUINA DE MFI**

### **Balanza de precisión Ohaus scout**

- Rango: 0 – 500 g.
- Escala mínima: 0.01 g.



**FIGURA 4.3 BALANZA DE PRECISIÓN OAHUS**

### **Procedimiento**

El procedimiento que se emplea según la norma ASTM 1238 es el siguiente:

- Cortar el material en pedazos no mayor a un pellets.
- Pesar 0,345 del material en la balanza de precisión.
- Ingresar las condiciones de procesamiento de la tabla antes mencionadas y esperar que el plastómetro de extrusión alcance la temperatura ingresada que es de 190 °C.
- Colocar la boquilla en el cilindro de la máquina.
- Cuando el cilindro alcanza esta temperatura se agrega el material y se coloca el pistón para que empiece a presionar al material.
- Se presiona start y el tiempo de precalentamiento empieza a correr desde 0 hasta 60 seg.
- Cuando este tiempo termina se escucha un alarma indicando que se debe colocar el peso de 2,160 Kg. en la boquilla.
- Se corta el material que sale de la boquilla en el tiempo de precalentamiento, porque este es material excedente. Este corte debe ser rápido para no afectar a la primera muestra.
- Se espera el tiempo en que demore en salir el primer cuarto de pulgada del material del cilindro. Cuando este sale se escucha una alarma y se procede a cortar la muestra.

- Esta muestra es pesada. Luego se espera que salga el siguiente cuarto de pulgada y se repite el proceso de cortar y luego pesar. Se debe de obtener cuatro muestras.
- Cuando se obtiene las cuatro muestras se las pesa todas y se las divide para cuatro para sacar un promedio. Si una de las anteriores muestras no tiene un peso parecido a las otras se la descarta y se realiza el promedio con las restantes.
- Después de retirar el material sobrante se limpia el cilindro y la boquilla para la nueva muestra.
- Después de obtener el promedio, este se ingresa en la máquina y se obtiene los siguientes resultados.

### **Resultados**

En las siguientes tablas se pueden observar los datos del ensayo Melt Flow Index (Índice de fluidez) y las densidades, viscosidades de cada una de las muestras del HDPE con y sin aditivo. Por cada muestra se realizan cuatro pruebas para obtener una media, mediana, desviación, mínimo y máximo de cada muestra. Con estos valores se puede graficar, comparar y observar las propiedades de cada muestra con y sin aditivo.

**TABLA 6 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 1 SIN ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7612          | 22285,7             | 0,367                        |
| 2                 | 0,7612          | 25435,1             | 0,321                        |
| 3                 | 0,7612          | 24791,1             | 0,329                        |
| 4                 | 0,7612          | 24179,0             | 0,337                        |
| <b>Media</b>      | 0,7612          | 24143,402           | 0,338                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7612          | 22285,700           | 0,321                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7612          | 25435,100           | 0,367                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7612          | 1358,539            | 0,020                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7612          | 24485,050           | 0,333                        |

**TABLA 7 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 2 SIN ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7594          | 21059,1             | 0,384                        |
| 2                 | 0,7594          | 20835,1             | 0,39                         |
| 3                 | 0,7594          | 20615,8             | 0,396                        |
| 4                 | 0,7594          | 20401               | 0,398                        |
| <b>Media</b>      | 0,7594          | 20726,299           | 0,392                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7594          | 20401,000           | 0,384                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7594          | 21059,100           | 0,398                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7594          | 283,205             | 0,006                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7594          | 20725,450           | 0,393                        |

**TABLA 8 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 3 SIN ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7612          | 19585               | 0,416                        |
| 2                 | 0,7612          | 21059,1             | 0,387                        |
| 3                 | 0,7612          | 20831,1             | 0,392                        |
| 4                 | 0,7612          | 20615,8             | 0,395                        |
| <b>Media</b>      | 0,7612          | 20514,878           | 0,397                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7612          | 19585,000           | 0,387                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7612          | 21059,100           | 0,416                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7612          | 650,842             | 0,013                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7612          | 20723,450           | 0,394                        |

**TABLA 9 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 4 SIN ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,765           | 19984,7             | 0,412                        |
| 2                 | 0,765           | 19782,8             | 0,415                        |
| 3                 | 0,765           | 19391,1             | 0,420                        |
| 4                 | 0,765           | 19391,1             | 0,423                        |
| <b>Media</b>      | 0,765           | 19635,753           | 0,417                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,765           | 19391,100           | 0,412                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,765           | 19984,700           | 0,423                        |
| <b>Desviación</b> | 0,765           | 296,134             | 0,005                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,765           | 19586,950           | 0,418                        |

**TABLA 10 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 5 SIN ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,765           | 19984,7             | 0,410                        |
| 2                 | 0,765           | 19391,1             | 0,421                        |
| 3                 | 0,765           | 19014,6             | 0,429                        |
| 4                 | 0,765           | 19014,6             | 0,429                        |
| <b>Media</b>      | 0,765           | 19347,222           | 0,422                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,765           | 19014,600           | 0,410                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,765           | 19984,700           | 0,429                        |
| <b>Desviación</b> | 0,765           | 458,081             | 0,009                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,765           | 19202,850           | 0,425                        |

**TABLA 11 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 1 CON ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7594          | 17804,5             | 0,456                        |
| 2                 | 0,7594          | 16883,6             | 0,481                        |
| 3                 | 0,7594          | 16739,3             | 0,487                        |
| 4                 | 0,7594          | 16320,8             | 0,5                          |
| <b>Media</b>      | 0,7594          | 16928,497           | 0,481                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7594          | 16320,800           | 0,456                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7594          | 17804,500           | 0,500                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7594          | 625,619             | 0,018                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7594          | 16811,450           | 0,484                        |

**TABLA 12 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 2 CON ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7594          | 17179,8             | 0,475                        |
| 2                 | 0,7594          | 15922,8             | 0,509                        |
| 3                 | 0,7594          | 15794,4             | 0,514                        |
| 4                 | 0,7594          | 15543,7             | 0,525                        |
| <b>Media</b>      | 0,7594          | 16098,068           | 0,505                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7594          | 15543,700           | 0,475                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7594          | 17179,800           | 0,525                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7594          | 730,254             | 0,022                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7594          | 15858,600           | 0,512                        |

**TABLA 13 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 3 CON ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7685          | 16597,5             | 0,495                        |
| 2                 | 0,7685          | 15922,8             | 0,515                        |
| 3                 | 0,7685          | 15668               | 0,526                        |
| 4                 |                 |                     |                              |
| <b>Media</b>      | 0,7685          | 16058,016           | 0,512                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7685          | 15668,000           | 0,495                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7685          | 16597,500           | 0,526                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7685          | 480,297             | 0,016                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7685          | 15922,800           | 0,515                        |



**TABLA 14 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 4 CON ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7705          | 17486,6             | 0,474                        |
| 2                 | 0,7705          | 16053,3             | 0,515                        |
| 3                 | 0,7705          | 15668               | 0,525                        |
| 4                 | 0,7705          | 15300,8             | 0,538                        |
| <b>Media</b>      | 0,7705          | 16106,432           | 0,512                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7705          | 15300,800           | 0,474                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7705          | 17486,600           | 0,538                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7705          | 956,945             | 0,028                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7705          | 15860,650           | 0,520                        |

**TABLA 15 RESULTADOS DE MFI MUESTRA 5 CON ADITIVO**

| # MUESTRAS        | DENSIDAD (g/cc) | VISCOSIDAD (Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ (g/10 min) |
|-------------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| 1                 | 0,7612          | 15654,3             | 0,519                        |
| 2                 | 0,7612          | 16053,3             | 0,508                        |
| 3                 | 0,7612          | 15922,8             | 0,511                        |
| 4                 | 0,7612          | 15543,7             | 0,522                        |
| <b>Media</b>      | 0,7612          | 15792,212           | 0,515                        |
| <b>Mínimo</b>     | 0,7612          | 15543,700           | 0,508                        |
| <b>Máximo</b>     | 0,7612          | 16053,300           | 0,522                        |
| <b>Desviación</b> | 0,7612          | 235,224             | 0,007                        |
| <b>Mediana</b>    | 0,7612          | 15788,550           | 0,515                        |

#### 4.2 Ensayo de resistencia al impacto (tipo Izod)

La resistencia al impacto de las muestras con y sin aditivo se determinan con un equipo de resistencia al impacto Tinius Olsen y siguiendo el procedimiento escrito por la norma ASTM D-256 [1990], al ser todas las muestras polietileno de alta densidad los ensayos se realizan con las mismas características.

#### Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo son los siguientes:

#### Máquina de resistencia al impacto

- Tipo de medición: Resistencia al impacto
- Unidad: J/m
- Tinius Olsen Willow Grove, PA USA modelo 892.



**FIGURA 4.4 MÁQUINA DE RESISTENCIA AL IMPACTO**

### Calibrador de precisión

- Rango: 0 – 200 mm.
- Mínima escala: 0.05mm
- Tipo de medición: Largo, ancho, profundidad.

### Condiciones y requerimientos

Las condiciones y requerimientos para realizar este ensayo son las siguientes:

- El ancho de la probeta debe ser  $12,7 \pm 0,15$  mm.
- El largo de la probeta debe estar entre 63,5 – 60,3 mm.
- El espesor de la probeta de ser entre 3 – 12,7 mm.
- El ángulo de la muesca en V debe ser  $22,5^\circ \pm 0,5$ .



**FIGURA 4.5      PROBETAS DIMENSIONADAS SEGÚN LA  
NORMA ASTM D256**

Las probetas deben ser cortadas con sumo cuidado, no deben tener bordes rasgados y deben tener un paralelismo de 5% de error máximo.

## Procedimiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Se corta la probeta de las medidas antes mencionadas.
- Se coloca la probeta con la muesca en sentido del péndulo.
- Se enciende la máquina y se colocan las medidas del espesor de la probeta.
- Se deja caer el péndulo y se observa el tipo de corte que sucedió.
- Se ingresa el tipo de corte total, parcial o bisagra. Entonces esta da los siguientes resultados.

## Resultados

Las pruebas de impacto son realizadas para los dos tipos de reciclados, que se analizan y se muestran los datos obtenidos de ambas muestras.

**TABLA 16 RESULTADOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO  
MUESTRAS SIN ADITIVO**

| # CICLOS | RESISTENCIA AL IMPACTO (J/m) |       |       |       |       | Media   | Mínimo | Máximo  | desviación | mediana |
|----------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|------------|---------|
| 1        | 161,4                        | 161,1 | 172,7 | 94,82 | 174,3 | 149,313 | 94,82  | 174,300 | 33,026     | 161,4   |
| 2        | 173,2                        | 166,7 | 173,7 | 174,3 |       | 171,947 | 166,7  | 174,300 | 3,545      | 173,45  |
| 3        | 174,2                        | 174,3 | 173,9 | 173,6 | 171,9 | 173,578 | 171,9  | 174,300 | 0,978      | 173,9   |
| 4        | 171,2                        | 146,1 | 170,2 | 174   | 174,2 | 166,779 | 146,1  | 174,200 | 11,889     | 171,2   |
| 5        | 167,6                        | 171,6 | 170,4 | 174,2 | 174   | 171,542 | 167,6  | 174,200 | 2,736      | 171,6   |

**TABLA 17 RESULTADOS DE RESISTENCIA AL IMPACTO  
MUESTRAS CON ADITIVO**

| # CICLOS | RESISTENCIA AL IMPACTO (J/m) |       |       |       |       | Media   | Mínimo | Máximo  | desviación | mediana |
|----------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|------------|---------|
| 1        | 124,8                        | 133,7 | 137,3 | 133,8 | 141,6 | 134,124 | 124,8  | 141,600 | 6,187      | 133,8   |
| 2        | 132,5                        | 132,8 | 124,5 | 127   | 136,1 | 130,512 | 124,5  | 136,100 | 4,713      | 132,5   |
| 3        | 122,3                        | 121,3 | 133,4 | 132,8 | 130,5 | 127,953 | 121,3  | 133,400 | 5,827      | 130,5   |
| 4        | 134,8                        | 127,8 | 134   | 122,3 | 131,8 | 130,057 | 122,3  | 134,800 | 5,155      | 131,8   |
| 5        | 126,6                        | 129,9 | 132,6 | 129,6 | 126,4 | 128,999 | 126,4  | 132,600 | 2,581      | 129,6   |

Todas las probetas presentan una fractura tipo Hinge o bisagra, como se encuentra estipulado en la norma.

#### **4.3 Ensayo de tensión**

Los ensayos de tensión de las probetas con y sin aditivo son realizados con la norma ASTM D 638.

#### **Equipos**

Los equipos que se utilizan para este ensayo son los siguientes:

#### **Máquina de tensión universal**

- Máxima capacidad: 10 Kgf.
- Tipo de medición: Tensión.
- Unidad: Kg / cm<sup>2</sup>
- Carga límite: 500 Kg.

- Extensión límite: 500 mm.
- Sintech QTest , USA



**FIGURA 4.6 MÁQUINA DE TRACCIÓN UNIVERSAL.**

#### **Calibrador de precisión**

- Rango: 0 – 200 mm.
- Mínima escala: 0.05 mm.
- Tipo de medición: largo, ancho, profundidad.

#### **Condiciones y requerimientos**

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para realizar este ensayo son las siguientes:

- El largo de la probeta debe ser aproximadamente 200 mm.
- La velocidad de la mordaza móvil debe ser 208 mm./min.
- El espesor de la probeta debe ser entre 5 – 25,4 mm. mientras mayor es el espesor evita el paralelismo en los bordes.



**FIGURA 4.7      PROBETA DE ACUERDO A LA NORMA ASTM  
D638**

### **Procedimiento**

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Medir el espesor de la probeta específicamente en la parte del cuello. Para colocar la separación inicial de las mordazas se escoge una distancia entre mordazas, de 50 mm. y una velocidad de 208 mm/min.

Se coloca la probeta en las mordazas, evitando que está entre desalineada y se aprieta fuertemente para evitar que se aflojen las mordazas durante el ensayo y produzca un error en los datos finales.

Se debe tomar tres probetas de cada muestra con y sin aditivo, para poder tener un valor más exacto al finalizar el ensayo.

Los datos son enviados a la computadora y esta da algunos valores como esfuerzos de corte y de ruptura, elongación, modulo de Young, carga máxima, entre otros.

## Resultados

Los resultados de este ensayo con las probetas con y sin aditivo se muestran a continuación con sus respectivos valores estadísticos.

**TABLA 18 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 1 CON ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| 1                  | 10,45 | 3,23    | 94,43        | 279,76                 | 51,64            | 153                 | 15                |
| 2                  | 10,47 | 3,28    | 97,43        | 283,7                  | 54,29            | 158,08              | 16                |
| 3                  | 10,46 | 3,24    | 97,29        | 287,06                 | 51,14            | 150,91              | 15                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,46 | 3,25    | 96,37        | 283,49                 | 52,34            | 153,97              | 15                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,45 | 3,23    | 94,43        | 279,76                 | 51,14            | 150,91              | 15                |
| <b>Máximo</b>      | 10,47 | 3,28    | 97,43        | 287,06                 | 54,29            | 158,08              | 16                |
| <b>Desviación</b>  | 0,01  | 0,03    | 1,69         | 3,65                   | 1,69             | 3,69                | 1                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,46 | 3,24    | 97,29        | 283,70                 | 51,64            | 153,00              | 15                |

**TABLA 19 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 2 CON ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| 1                  | 10,02 | 3,23    | 92,5         | 285,81                 | 30,07            | 92,91               | 12                |
| 2                  | 10,41 | 3,21    | 97,14        | 290,71                 | 45               | 134,67              | 23                |
| 3                  | 10,41 | 3,24    | 97,71        | 289,71                 | 51,64            | 153,11              | 20                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,28 | 3,23    | 95,75        | 288,74                 | 41,19            | 124,20              | 18                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,02 | 3,21    | 92,50        | 285,81                 | 30,07            | 92,91               | 12                |
| <b>Máximo</b>      | 10,41 | 3,24    | 97,71        | 290,71                 | 51,64            | 153,11              | 23                |
| <b>Desviación</b>  | 0,23  | 0,02    | 2,86         | 2,59                   | 11,05            | 30,84               | 6                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,41 | 3,23    | 97,14        | 289,71                 | 45,00            | 134,67              | 20                |



**TABLA 20 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 3 CON ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,54 | 3,24    | 95,07        | 278,4                  | 48,43            | 141,81              | 23                |
| <b>2</b>           | 10,44 | 3,27    | 91,64        | 268,44                 | 51,14            | 149,81              | 16                |
| <b>3</b>           | 10,54 | 3,24    | 91,86        | 268,98                 | 44,93            | 131,56              | 18                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,51 | 3,25    | 92,84        | 271,90                 | 48,10            | 140,86              | 19                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,44 | 3,24    | 91,64        | 268,44                 | 44,93            | 131,56              | 16                |
| <b>Máximo</b>      | 10,54 | 3,27    | 95,07        | 278,40                 | 51,14            | 149,81              | 23                |
| <b>Desviación</b>  | 0,06  | 0,02    | 1,92         | 5,60                   | 3,11             | 9,15                | 3,61              |
| <b>Mediana</b>     | 10,54 | 3,24    | 91,86        | 268,98                 | 48,43            | 141,81              | 18                |

**TABLA 21 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 4 CON ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,4  | 3,23    | 95,57        | 284,51                 | 52,07            | 155,01              | 15                |
| <b>2</b>           | 10,4  | 3,27    | 93,93        | 276,2                  | 51,36            | 151,01              | 20                |
| <b>3</b>           | 10,4  | 3,24    | 94,71        | 281,08                 | 46,64            | 138,42              | 21                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,40 | 3,25    | 94,73        | 280,58                 | 49,96            | 147,97              | 18                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,40 | 3,23    | 93,93        | 276,20                 | 46,64            | 138,42              | 15                |
| <b>Máximo</b>      | 10,40 | 3,27    | 95,57        | 284,51                 | 52,07            | 155,01              | 21                |
| <b>Desviación</b>  | 0,00  | 0,02    | 0,82         | 4,18                   | 2,95             | 8,66                | 3                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,40 | 3,24    | 94,71        | 281,08                 | 51,36            | 151,01              | 20                |

**TABLA 22 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 5 CON ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,46 | 3,24    | 95,71        | 282,42                 | 47,21            | 139,31              | 22                |
| <b>2</b>           | 10,42 | 3,21    | 92,86        | 277,61                 | 50,86            | 152,05              | 17                |
| <b>3</b>           | 10,46 | 3,23    | 98,86        | 292,6                  | 47,86            | 141,65              | 19                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,45 | 3,23    | 95,78        | 284,14                 | 48,62            | 144,23              | 19                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,42 | 3,21    | 92,86        | 277,61                 | 47,21            | 139,31              | 17                |
| <b>Máximo</b>      | 10,46 | 3,24    | 98,86        | 292,60                 | 50,86            | 152,05              | 22                |
| <b>Desviación</b>  | 0,02  | 0,02    | 3,00         | 7,65                   | 1,95             | 6,78                | 2,52              |
| <b>Mediana</b>     | 10,46 | 3,23    | 95,71        | 282,42                 | 47,86            | 141,65              | 19                |

**TABLA 23 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 1 SIN ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,41 | 3,22    | 122,29       | 364,81                 | 100,86           | 300,88              | 10                |
| <b>2</b>           | 10,40 | 3,24    | 124,43       | 369,27                 | 90,21            | 267,73              | 11                |
| <b>3</b>           | 10,36 | 3,21    | 124,29       | 373,73                 | 72,29            | 21,36               | 12                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,39 | 3,22    | 123,67       | 369,25                 | 86,97            | 119,83              | 11                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,36 | 3,21    | 122,29       | 364,81                 | 72,29            | 21,36               | 10                |
| <b>Máximo</b>      | 10,41 | 3,24    | 124,43       | 373,73                 | 100,86           | 300,88              | 12                |
| <b>Desviación</b>  | 0,03  | 0,02    | 1,20         | 4,46                   | 14,44            | 152,71              | 1                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,40 | 3,22    | 124,29       | 369,27                 | 90,21            | 267,73              | 11                |

**TABLA 24 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 2 SIN ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,5  | 3,22    | 102,57       | 303,38                 | 60,07            | 177,67              | 15                |
| <b>2</b>           | 10,47 | 3,22    | 100,57       | 298,31                 | 54,71            | 162,29              | 15                |
| <b>3</b>           | 10,43 | 3,24    | 104,86       | 310,29                 | 56,57            | 167,40              | 19                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,47 | 3,23    | 102,65       | 303,95                 | 57,07            | 169,00              | 16                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,43 | 3,22    | 100,57       | 298,31                 | 54,71            | 162,29              | 15                |
| <b>Máximo</b>      | 10,50 | 3,24    | 104,86       | 310,29                 | 60,07            | 177,67              | 19                |
| <b>Desviación</b>  | 0,04  | 0,01    | 2,15         | 6,01                   | 2,72             | 7,83                | 2                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,47 | 3,22    | 102,57       | 303,38                 | 56,57            | 167,40              | 15                |

**TABLA 25 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 3 SIN ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,55 | 3,26    | 104,21       | 303,01                 | 59,14            | 171,96              | 19                |
| <b>2</b>           | 10,48 | 3,25    | 103,64       | 304,29                 | 56,00            | 164,42              | 24                |
| <b>3</b>           | 10,56 | 3,25    | 100,21       | 292,00                 | 58,07            | 169,21              | 16                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,53 | 3,25    | 102,67       | 299,72                 | 57,72            | 168,50              | 19                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,48 | 3,25    | 100,21       | 292,00                 | 56,00            | 164,42              | 16                |
| <b>Máximo</b>      | 10,56 | 3,26    | 104,21       | 304,29                 | 59,14            | 171,96              | 24                |
| <b>Desviación</b>  | 0,04  | 0,01    | 2,16         | 6,76                   | 1,60             | 3,82                | 4                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,55 | 3,25    | 103,64       | 303,01                 | 58,07            | 169,21              | 19                |

**TABLA 26 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 4 SIN ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,5  | 3,26    | 101,5        | 296,52                 | 58,21            | 170,07              | 24                |
| <b>2</b>           | 10,54 | 3,26    | 98,93        | 287,91                 | 58,43            | 170,05              | 17                |
| <b>3</b>           | 10,6  | 3,25    | 98,71        | 286,54                 | 56,07            | 162,76              | 17                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,55 | 3,26    | 99,71        | 290,29                 | 57,56            | 167,59              | 19                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,50 | 3,25    | 98,71        | 286,54                 | 56,07            | 162,76              | 17                |
| <b>Máximo</b>      | 10,60 | 3,26    | 101,50       | 296,52                 | 58,43            | 170,07              | 24                |
| <b>Desviación</b>  | 0,05  | 0,01    | 1,55         | 5,41                   | 1,30             | 4,21                | 4                 |
| <b>Mediana</b>     | 10,54 | 3,26    | 98,93        | 287,91                 | 58,21            | 170,05              | 17                |

**TABLA 27 ENSAYO DE TRACCIÓN MUESTRA 5 SIN ADITIVO**

| Número de muestras | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura | Elongación máxima |
|--------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
|                    | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | Kg /cm <sup>2</sup> | (%)               |
| <b>1</b>           | 10,5  | 3,28    | 100,29       | 291,19                 | 50,36            | 146,22              | 49                |
| <b>2</b>           | 10,47 | 3,27    | 97,93        | 286,03                 | 53,57            | 156,47              | 24                |
| <b>3</b>           | 10,56 | 3,29    | 97           | 279,2                  | 55,21            | 158,92              | 22                |
|                    |       |         |              |                        |                  |                     |                   |
| <b>Media</b>       | 10,51 | 3,28    | 98,40        | 285,43                 | 53,01            | 153,77              | 30                |
| <b>Mínimo</b>      | 10,47 | 3,27    | 97,00        | 279,20                 | 50,36            | 146,22              | 22                |
| <b>Máximo</b>      | 10,56 | 3,29    | 100,29       | 291,19                 | 55,21            | 158,92              | 49                |
| <b>Desviación</b>  | 0,05  | 0,01    | 1,70         | 6,01                   | 2,47             | 6,74                | 15                |
| <b>Mediana</b>     | 10,50 | 3,28    | 97,93        | 286,03                 | 53,57            | 156,47              | 24                |

# CAPITULO 5

## 5 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS E ÍNDICE DE FLUIDEZ

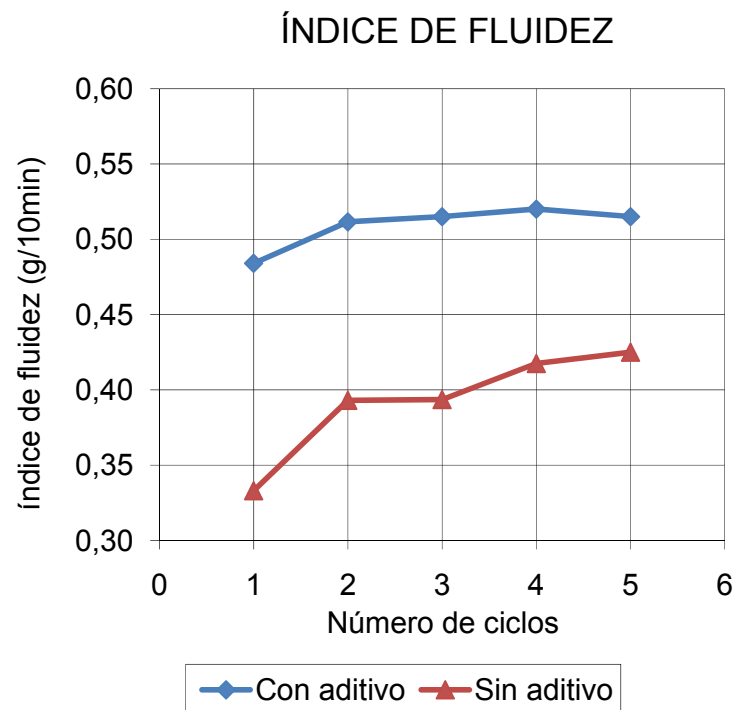
### 5.1 Análisis de Fluidéz y su relación con el reprocesamiento.

El análisis del índice de fluidéz en relación con el reprocesamiento varía de la siguiente manera.

El índice de fluidéz va aumentando desde el primer ciclo hasta el quinto ciclo del polietileno de alta densidad reciclado, como se observa en la figura 5.1. Con un valor aproximado de 0.48 – 0.51 g/10min. El HDPE con aditivo AOX perdió índice de fluidéz con respecto al HDPE sin aditivo, pero se observa que después del segundo ciclo se va estabilizando.

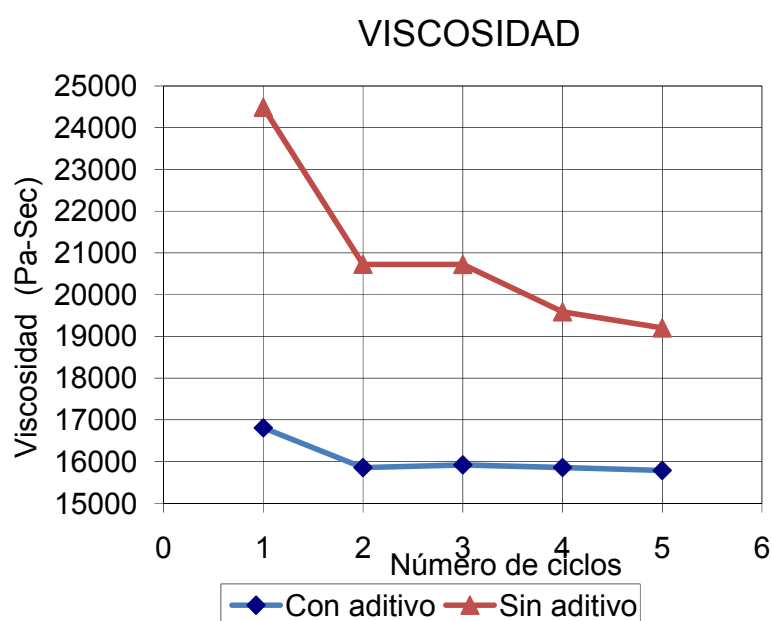
Al disminuir la fluidez aumenta el peso molecular y se tienen las siguientes características:

- Menor permeabilidad
- Disminuye la solubilidad
- Mejora resistencia al impacto
- Mayor Esfuerzo de tensión elástico
- Peligro de ruptura a la extrusión
- Mayor viscosidad de fundido
- Mejor resistencia al impacto



**FIGURA 5.1**      **ÍNDICE DE FLUIDEZ EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**

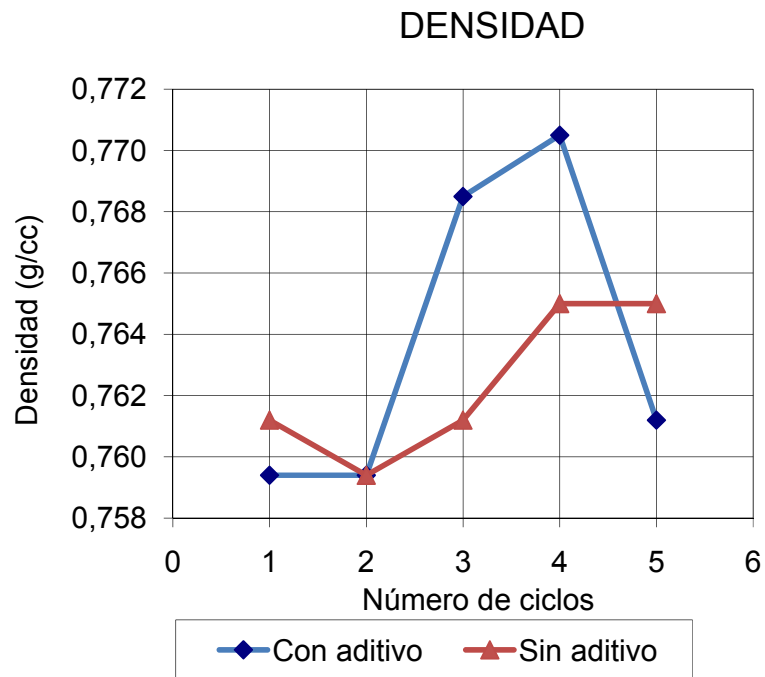
Se observa que la viscosidad es lo opuesto al índice de fluidez. Esta va disminuyendo desde el primer ciclo hasta el quinto con valores aproximados de 25000 – 19000 Pa-Sec. Después del segundo ciclo de HDPE con AOX se estabiliza en un valor aproximado de 16000 Pa-Sec.



**FIGURA 5.2 VISCOSIDAD**

La densidad en ambas muestras varía de forma discontinua, debido a que ambos son material reciclado de HDPE, pero también puede haber residuos de otros materiales que están presentes en el proceso de trituración y separación. Esto afecta porque ambas muestras no fueron mezcladas en una extrusora con tornillo de

dispersión. En la muestra con aditivo la densidad trata de mantenerse estable en un valor cercano 0.76 g/cc.



**FIGURA 5.3 DENSIDAD EN CINCO CICLOS CON Y SIN ADITIVO**

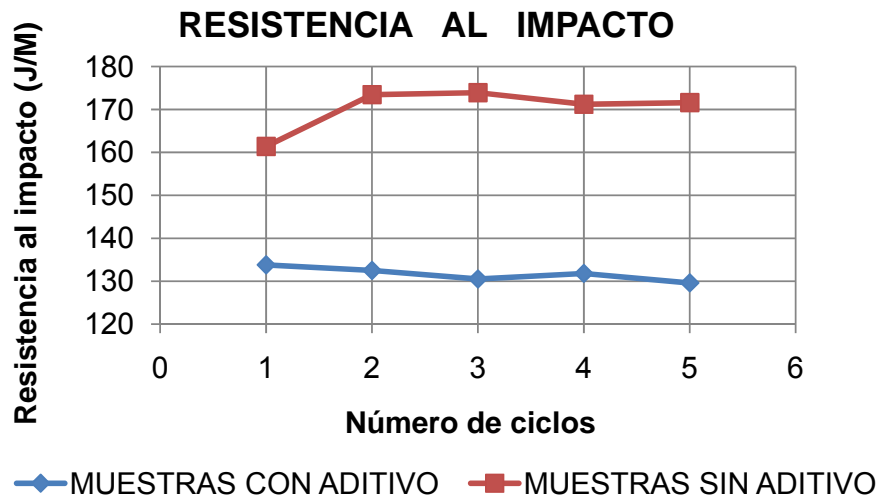
Se observa que el material reciclado sin aditivo va degradándose en su índice de fluidez, de acuerdo al número de ciclos de inyección. El aditivo AOX cumple su función, que es de mantener una temperatura promedio en los cinco ciclos de inyección, para que el material no se degrade fácilmente.



## **5.2 Análisis de propiedades mecánicas y su relación con el reprocesamiento.**

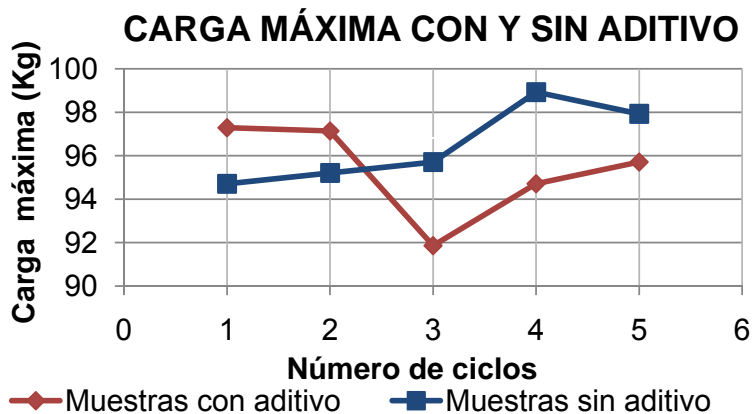
Para el estudio del análisis de las propiedades mecánicas y su relación con el reprocesamiento, se realizan los ensayos de resistencia al impacto y de tracción. Los resultados que se obtiene son los siguientes.

- El HDPE sin aditivo presenta una resistencia al impacto en forma creciente desde su primer ciclo de inyección hasta quinto. Por otro lado el HDPE con aditivo AOX presenta una resistencia menor que el mismo sin aditivo, pero que se mantiene casi estable durante todos los cinco ciclos de inyección.
- La mayor resistencia al impacto se observa en el tercer ciclo de HDPE sin aditivo con un valor de 174 J/m. El HDPE con antioxidante tiene la mayor resistencia en la primera inyección con un valor de 134 J/m.

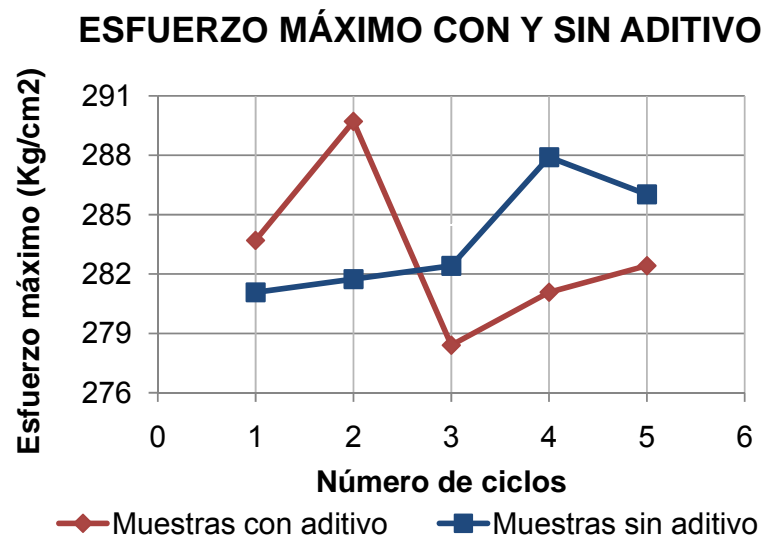


**FIGURA 5.4 RESISTENCIA AL IMPACTO**

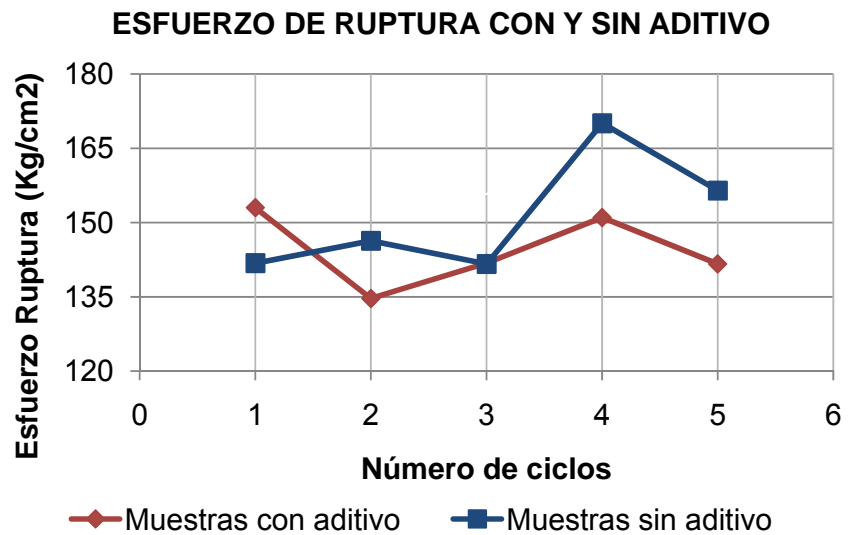
En los siguientes gráficos se observan las variaciones de algunas de las propiedades mecánicas como; el esfuerzo de ruptura, el esfuerzo máximo, la elongación, carga máxima y la carga de ruptura. Esta comparación se realiza en cada ciclo de inyección con y sin aditivo.



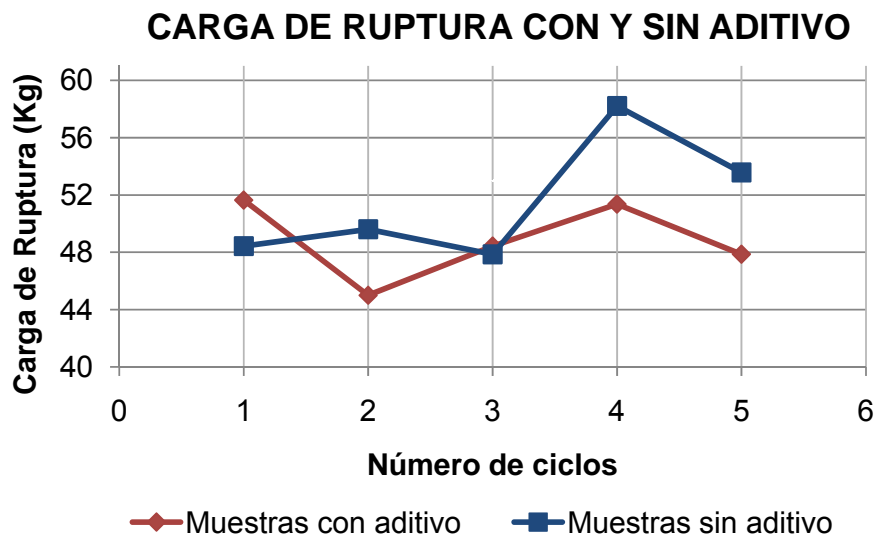
**FIGURA 5.5 CARGA MÁXIMA EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**



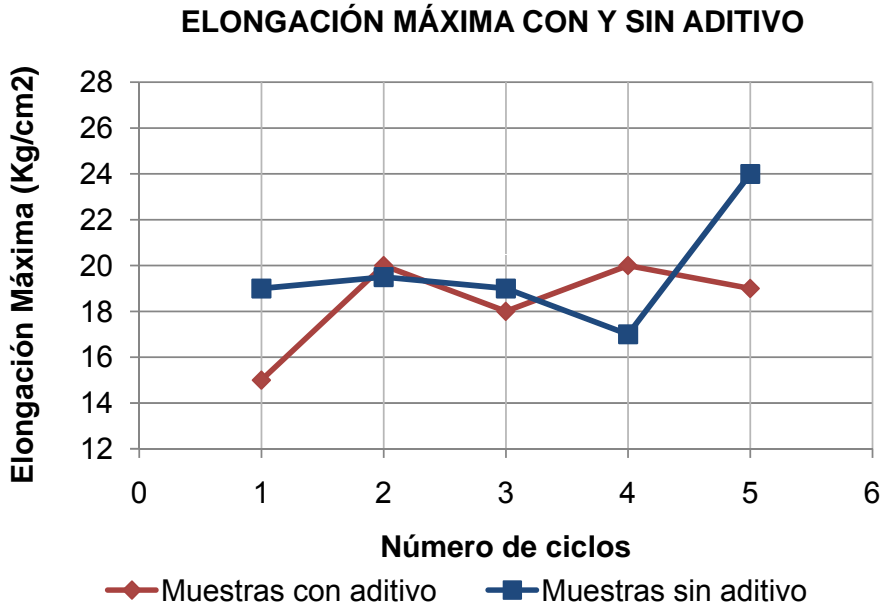
**FIGURA 5.6 ESFUERZOS MÁXIMOS EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**



**FIGURA 5.7 ESFUERZOS DE RUPTURA EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**



**FIGURA 5.8 CARGAS DE RUPTURAS EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**



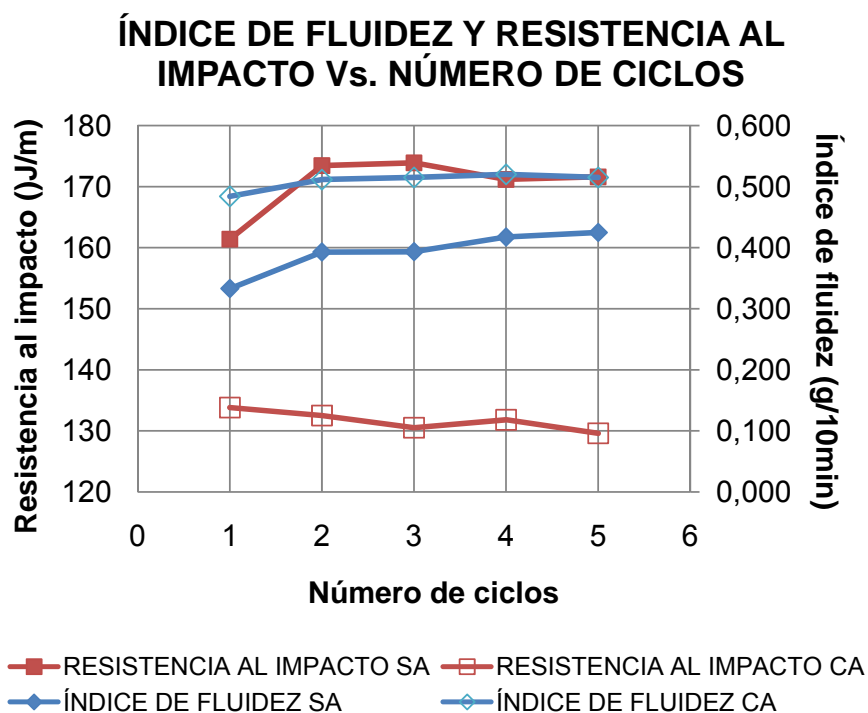
**FIGURA 5.9 ELONGACIONES EN 5 CICLOS CON Y SIN ADITIVO**

Se observa que el esfuerzo máximo sin aditivo permanece casi estable durante sus cinco ciclos y el esfuerzo máximo del HDPE con AOX varía en los tres primeros ciclos en forma creciente, pero se trata de estabilizar en los dos últimos ciclos.

### **5.3 Análisis comparativos de las propiedades mecánicas e índice de fluidez del HDPE con y sin aditivo.**

En esta sección se realizan análisis comparativos del esfuerzo máximo con respecto al índice de fluidez y a la resistencia al impacto

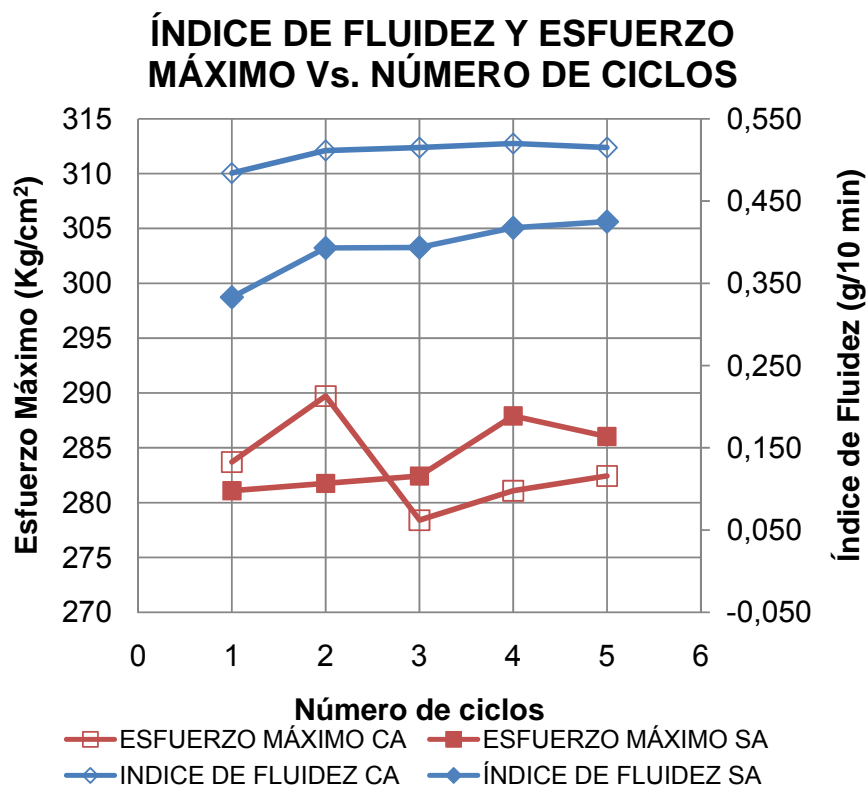
En la figura 5.10, se observa que el índice de fluidez y la resistencia al impacto aumenta entre cada ciclo en el caso sin aditivo. La resistencia al impacto disminuye con respecto al índice de fluidez en el caso de la muestra con aditivo. Pero la resistencia al impacto y el índice de fluidez con aditivo se estabilizan desde su tercer ciclo en valor medio. Esto indica, que se puede seguir realizando más ciclos sin disminuir la resistencia al impacto y el índice de fluidez.



**FIGURA 5.10 ÍNDICE DE FLUIDEZ Y RESISTENCIA AL IMPACTO EN COMPARACIÓN CON LOS 5 CICLOS DE INYECCIÓN.**

El esfuerzo máximo tiene una variación no uniforme en los cinco ciclos con respecto al índice que tiene una forma creciente, cuando este no contiene aditivo. Pero su esfuerzo máximo se estabiliza al mezclarse con aditivo, como se observa en la figura 5.11, su índice de fluidez aumenta hasta el tercer ciclo y se estabiliza obteniendo como resultado más ciclos de inyección sin variar sus propiedades.

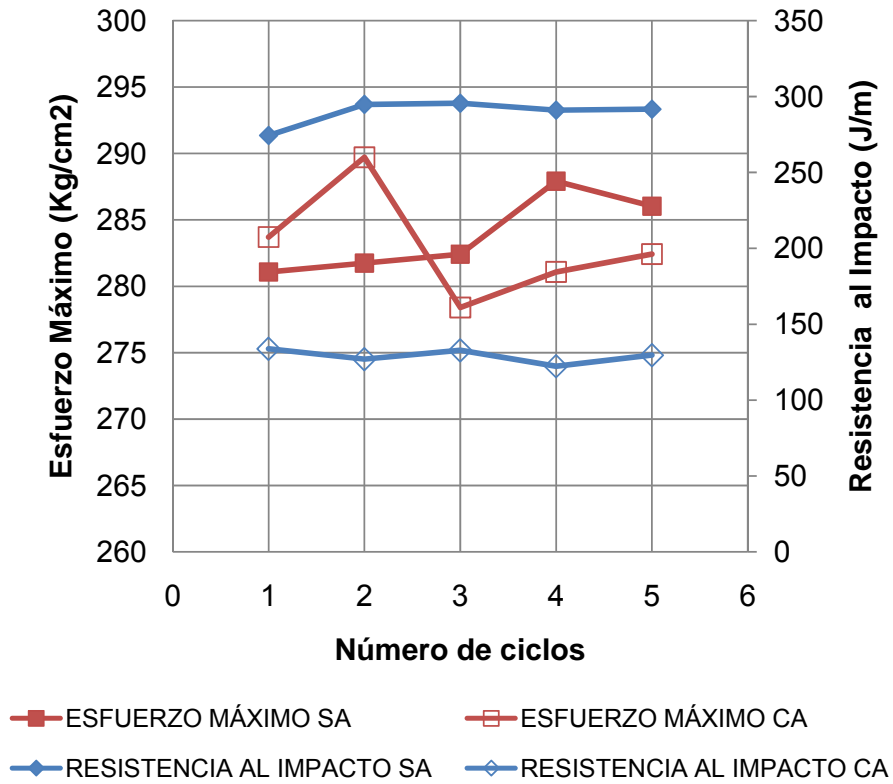
Cuando el índice de fluidez aumenta, la viscosidad y el peso molecular disminuye, lo que produce que los esfuerzos de tensión aumenten de forma creciente.



**FIGURA 5.11 ÍNDICE DE FLUIDEZ Y ESFUERZO MÁXIMO EN COMPARACIÓN CON LOS 5 CICLOS DE INYECCIÓN**

Como se observa en la figura 5.13, la resistencia al impacto disminuye con respecto al esfuerzo máximo que se estabiliza en un valor continuo después del tercer ciclo con aditivo. Pero cuando no contiene aditivo su forma varía en los cinco ciclos.

### RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO MÁXIMO Vs. NÚMERO DE CICLOS



**FIGURA 5.12 RESISTENCIA AL IMPACTO Y ESFUERZO MÁXIMO EN COMPARACIÓN CON LOS 5 CICLO DE INYECCIÓN.**



## CAPITULO 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

1. Las propiedades mecánicas en el primer ciclo con aditivo no empiezan igual a las sin aditivo, debido a que la máquina en que se inyectaron las probetas son tipo industrial. Esta maquinaria en el Ecuador no tienen un mantenimiento adecuado, produciendo variables en los procesos de inyección.
2. Las propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad con aditivo AOX en base de fosfito, se estabilizan después del tercer ciclo de inyección. Esto indica que se puede seguir realizando más ciclos sin tener variaciones dispersas en las propiedades mecánicas.

3. El aumento del índice de fluidez con aditivo implica un cambio en el peso molecular y en su distribución. Esto produce una variación en el esfuerzo máximo con aditivo.
4. El aditivo causa un aumento del MFI de 0.35 a 0.5 en el primer ciclo cuando se agrega en proporción de 1.5%.
5. El aditivo permite estabilizar la fluidez a través de los ciclos de procesamientos. Con el uso del AOX en base de fosfito, no existen muchas variaciones en el MFI. Esto implica poca degradación de polietileno de alta densidad en inyección durante los cinco ciclos.
6. El primer ciclo con y sin aditivo debe coincidir, pero en la gráfica 5.1 se puede observar lo contrario. Esto se debe a que los factores de inyección como velocidad de inyección, temperatura de inyección, no fueron iguales en los dos procesos, por ende afectaron en las propiedades mecánicas y reológicas.
7. La inclusión del AOX en el re-procesamiento estabiliza las propiedades mecánicas durante los ciclos, también causa una disminución en las propiedades de resistencia al impacto.

8. Se observa que el color del material se degrada en cada ciclo de inyección sin aditivo, pero con aditivo este mantiene su color durante los cinco ciclos.

## **6.2 Recomendaciones**

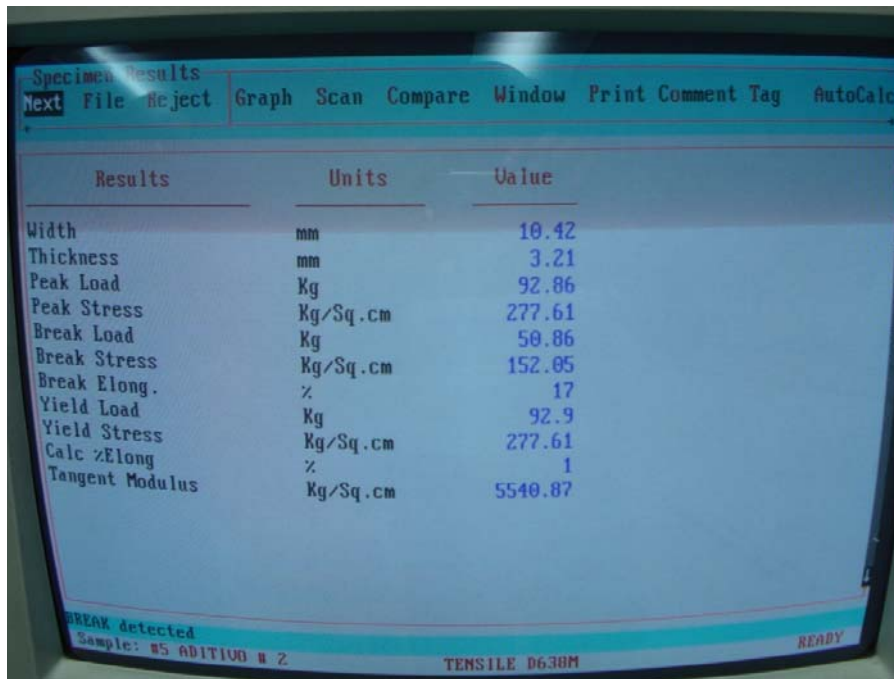
1. Se recomienda realizar los procesos de separación de material reciclado, post-consumo de una manera adecuada con el fin de evitar posibles inclusiones de materiales ajenos en la mezcla que conlleven a pérdidas en las propiedades mecánicas y reológicas.
2. En el proceso de inyección se debe tener en cuenta que no quede material del ciclo anterior dentro del tornillo, ya que esto afecta al nuevo material inyectado.
3. Tratar de mantener la temperatura de inyección en el tornillo en todos los ciclos, ya que esto se refleja en el momento de realizar los ensayos respectivos.
4. De ser posible realizar todas las probetas inyectadas con las mismas características de velocidad de inyección y presión de inyección.

5. Es recomendable dejar secar al aire libre el material durante 3 días, luego de ser lavado, sino se usa ningún equipo de secado.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## PANTALLA DEL SISTEMA DE ENSAYO DE TRACCIÓN



# APÉNDICE B

## HOJA TÉCNICA DEL ANTIOXIDANTE AOX



### MB AOX

El QUÍMICAL 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.

El QUÍMICAL MASTERBATCH AOX es elaborado con tecnología de ARCO COLORES S.A. de C.V de México y bajo las más estrictas normas de calidad.

### INFORMACIÓN TÉCNICA

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Apariencia                | Gránulos blancos                       |
| Resina base               | LDPE y LLDPE                           |
| Fluidez de la resina base | 5-8                                    |
| 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                        |

## HOJA TÉCNICA DEL CYANOX 2777

### PROPERTIES

# CYANOX<sup>®</sup> 2777 antioxidant

CYANOX 2777 antioxidant is a 1:2 blend of CYANOX 1790 antioxidant and phosphites.

#### TYPICAL PROPERTIES

|                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| Melting Point, °C           | 166-171                   |
| Description                 | White to off-white powder |
| CYANOX <sup>®</sup> 1790, % | 33.3 ± 3                  |
| Acid Number                 | 1.0 max                   |
| Specific Gravity (25°C)     | 1.07                      |

#### PERFORMANCE BENEFITS

- Minimal color and odor contribution
- Low volatility
- Excellent processing stabilizer
- Low gas yellowing
- Low water carry-over
- FDA sanctioned components
- Resistant to black speck formation and pinking
- Compatible with polymeric HALS and UVAs

#### HEALTH AND SAFETY

##### EFFECTS OF OVEREXPOSURE:

Acute oral (rat) and acute dermal (rabbit) LD<sub>50</sub> values are >10.0 and >5.0 g/kg, respectively. The 4-hour LC<sub>50</sub> (rat) value is estimated to be greater than 20mg/L. No skin irritation and no eye irritation were observed during primary irritation studies with rabbits.

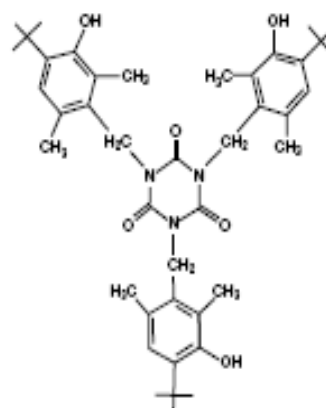
Direct contact with this material may cause minimal eye and skin irritation.

Before handling this material, read the corresponding Cytec Industries Inc. Material Safety Data Sheet (MSDS) for safety, health, and environmental data.

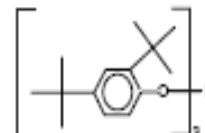
#### FDA STATUS

Both components of CYANOX 2777 antioxidant are sanctioned as antioxidants and/or stabilizers for use in polyolefins (21 CFR 178.2010) and in polystyrene and rubber modified polystyrene (21 CFR 177.1640). Use limitations are provided in the Code of Federal Regulations.

#### CYANOX 1790 antioxidant structure



#### Phosphite structure



#### Chemical Name of CYANOX 1790 antioxidant

1,3,5-Tris(4-tert-butyl-3-hydroxy-2,6-dimethylbenzyl)-1,3,5-triazine-2,4,6-(1H,3H,5H)-trione

#### Chemical Name of phosphite

Tris (2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite

CAS NUMBER (CYANOX 1790) 040601-76-1

CAS NUMBER (phosphite) 31570-04-4

#### Shipping Classification:

Chemical NOI

#### Shipping Container:

32-gallon fiber drum, polyethylene bag liner, 125 lb. net

#### Storage Conditions:

**Important!** To maintain product integrity, store indoors in a cool dry place, preferably at 25°C (77°F) or below. Avoid direct exposure to sunlight or temperature above 40°C (104°F).



## APÉNDICE C

### DATOS ADICIONALES EN PRUEBAS DE ÍNDICE DE FLUIDEZ ASTM D1238

| <b>TABLA C1</b>              |             |                 |               |                          |                            |                   |                          |                        |
|------------------------------|-------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| <b>MUESTRA 1 SIN ADITIVO</b> |             |                 |               |                          |                            |                   |                          |                        |
| <b># MUESTRAS</b>            | <b>PESO</b> | <b>DENSIDAD</b> | <b>FUERZA</b> | <b>TIEMPO DE CAPTURA</b> | <b>TAZA DE CIZALLADURA</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>ÍNDICE DE FLUIDEZ</b> | <b>TASA DE VOLUMEN</b> |
|                              | <b>(g)</b>  | <b>(g/cc)</b>   | <b>(Pa)</b>   | <b>(Sec)</b>             | <b>(Sec<sup>-1</sup>)</b>  | <b>(Pa-Sec)</b>   | <b>(g/10 min)</b>        | <b>(cc/min)</b>        |
| <b>1</b>                     | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 562,33                   | 0,88                       | 22285,7           | 0,367                    | 0,481                  |
| <b>2</b>                     | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 643,16                   | 0,77                       | 25435,1           | 0,321                    | 0,421                  |
| <b>3</b>                     | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 627,28                   | 0,79                       | 24791,1           | 0,329                    | 0,433                  |
| <b>4</b>                     | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 612,23                   | 0,81                       | 24179,0           | 0,337                    | 0,443                  |
| <b>Media</b>                 | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 610,480                  | 0,811                      | 24143,402         | 0,338                    | 0,444                  |
| <b>Mínimo</b>                | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 562,330                  | 0,770                      | 22285,700         | 0,321                    | 0,421                  |
| <b>Máximo</b>                | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 643,160                  | 0,880                      | 25435,100         | 0,367                    | 0,481                  |
| <b>desviación</b>            | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 34,973                   | 0,048                      | 1358,539          | 0,020                    | 0,026                  |
| <b>mediana</b>               | 0,343       | 0,7612          | 19585         | 619,755                  | 0,800                      | 24485,050         | 0,333                    | 0,438                  |

| <b>TABLA C2</b>              |             |                 |               |                          |                            |                   |                          |                        |
|------------------------------|-------------|-----------------|---------------|--------------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| <b>MUESTRA 2 SIN ADITIVO</b> |             |                 |               |                          |                            |                   |                          |                        |
| <b># MUESTRAS</b>            | <b>PESO</b> | <b>DENSIDAD</b> | <b>FUERZA</b> | <b>TIEMPO DE CAPTURA</b> | <b>TAZA DE CIZALLADURA</b> | <b>VISCOSIDAD</b> | <b>ÍNDICE DE FLUIDEZ</b> | <b>TASA DE VOLUMEN</b> |
|                              | <b>(g)</b>  | <b>(g/cc)</b>   | <b>(Pa)</b>   | <b>(Sec)</b>             | <b>(Sec<sup>-1</sup>)</b>  | <b>(Pa-Sec)</b>   | <b>(g/10 min)</b>        | <b>(cc/min)</b>        |
| <b>1</b>                     | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 536,16                   | 0,93                       | 21059,1           | 0,384                    | 0,506                  |
| <b>2</b>                     | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 527,97                   | 0,94                       | 20835,1           | 0,39                     | 0,513                  |
| <b>3</b>                     | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 520,1                    | 0,95                       | 20615,8           | 0,396                    | 0,522                  |
| <b>4</b>                     | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 517,23                   | 0,96                       | 20401             | 0,398                    | 0,524                  |
| <b>Media</b>                 | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 525,313                  | 0,945                      | 20726,299         | 0,392                    | 0,516                  |
| <b>Mínimo</b>                | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 517,230                  | 0,930                      | 20401,000         | 0,384                    | 0,506                  |
| <b>Máximo</b>                | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 536,160                  | 0,960                      | 21059,100         | 0,398                    | 0,524                  |
| <b>desviación</b>            | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 8,509                    | 0,013                      | 283,205           | 0,006                    | 0,008                  |
| <b>mediana</b>               | 0,343       | 0,7594          | 19585         | 524,035                  | 0,945                      | 20725,450         | 0,393                    | 0,518                  |

| TABLA C3              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 3 SIN ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 496,44                        | 1,00   | 19585                  | 0,416                           | 0,546                          |
| 2                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 533,35                        | 0,93   | 21059,1                | 0,387                           | 0,508                          |
| 3                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 527,39                        | 0,94   | 20831,1                | 0,392                           | 0,514                          |
| 4                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 523,1                         | 0,95   | 20615,8                | 0,395                           | 0,519                          |
| <b>Media</b>          | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 519,875                       | 0,955  | 20514,878              | 0,397                           | 0,522                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 496,440                       | 0,930  | 19585,000              | 0,387                           | 0,508                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 533,350                       | 1,000  | 21059,100              | 0,416                           | 0,546                          |
| <b>desviación</b>     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 16,304                        | 0,031  | 650,842                | 0,013                           | 0,017                          |
| <b>mediana</b>        | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 525,245                       | 0,945  | 20723,450              | 0,394                           | 0,517                          |

| TABLA C4              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 4 SIN ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 503,63                        | 0,98   | 19984,7                | 0,412                           | 0,538                          |
| 2                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 498,93                        | 0,99   | 19782,8                | 0,415                           | 0,543                          |
| 3                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 493,72                        | 1,01   | 19391,1                | 0,420                           | 0,550                          |
| 4                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 490,41                        | 1,01   | 19391,1                | 0,423                           | 0,553                          |
| <b>Media</b>          | 0,345       | 0,765              | 19585          | 496,647                       | 0,997  | 19635,753              | 0,417                           | 0,546                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,345       | 0,765              | 19585          | 490,410                       | 0,980  | 19391,100              | 0,412                           | 0,538                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,345       | 0,765              | 19585          | 503,630                       | 1,010  | 19984,700              | 0,423                           | 0,553                          |
| <b>desviación</b>     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 5,815                         | 0,015  | 296,134                | 0,005                           | 0,007                          |
| <b>mediana</b>        | 0,345       | 0,765              | 19585          | 496,325                       | 1,000  | 19586,950              | 0,418                           | 0,547                          |

| TABLA C5              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 5 SIN ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 505,56                        | 0,98   | 19984,7                | 0,410                           | 0,536                          |
| 2                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 492,28                        | 1,01   | 19391,1                | 0,421                           | 0,550                          |
| 3                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 484,12                        | 1,03   | 19014,6                | 0,429                           | 0,560                          |
| 4                     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 483,83                        | 1,03   | 19014,6                | 0,429                           | 0,561                          |
| <b>Media</b>          | 0,345       | 0,765              | 19585          | 491,369                       | 1,012  | 19347,222              | 0,422                           | 0,552                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,345       | 0,765              | 19585          | 483,830                       | 0,980  | 19014,600              | 0,410                           | 0,536                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,345       | 0,765              | 19585          | 505,560                       | 1,030  | 19984,700              | 0,429                           | 0,561                          |
| <b>desviación</b>     | 0,345       | 0,765              | 19585          | 10,191                        | 0,024  | 458,081                | 0,009                           | 0,012                          |
| <b>mediana</b>        | 0,345       | 0,765              | 19585          | 488,200                       | 1,020  | 19202,850              | 0,425                           | 0,555                          |

| TABLA C6              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 1 CON ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 451,34                        | 1,10   | 17804,5                | 0,456                           | 0,601                          |
| 2                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 427,19                        | 1,16   | 16883,6                | 0,481                           | 0,634                          |
| 3                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 422,67                        | 1,17   | 16739,3                | 0,487                           | 0,642                          |
| 4                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 411,90                        | 1,2  | 16320,8                | 0,5                             | 0,659                          |
| <b>Media</b>          | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 428,035                       | 1,157  | 16928,497              | 0,481                           | 0,634                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 411,900                       | 1,100  | 16320,800              | 0,456                           | 0,601                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 451,340                       | 1,200  | 17804,500              | 0,500                           | 0,659                          |
| <b>desviación</b>     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 16,661                        | 0,042  | 625,619                | 0,018                           | 0,024                          |
| <b>mediana</b>        | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 424,930                       | 1,165  | 16811,450              | 0,484                           | 0,638                          |

| TABLA C7              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 2 CON ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 433,58                        | 1,14   | 17179,8                | 0,475                           | 0,625                          |
| 2                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 403,89                        | 1,23   | 15922,8                | 0,509                           | 0,671                          |
| 3                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 401,08                        | 1,24   | 15794,4                | 0,514                           | 0,676                          |
| 4                     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 392,74                        | 1,26   | 15543,7                | 0,525                           | 0,691                          |
| <b>Media</b>          | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 407,537                       | 1,217  | 16098,068              | 0,505                           | 0,665                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 392,740                       | 1,140  | 15543,700              | 0,475                           | 0,625                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 433,580                       | 1,260  | 17179,800              | 0,525                           | 0,691                          |
| <b>desviación</b>     | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 17,813                        | 0,053  | 730,254                | 0,022                           | 0,028                          |
| <b>mediana</b>        | 0,343       | 0,7594             | 19585          | 402,485                       | 1,235  | 15858,600              | 0,512                           | 0,674                          |

| TABLA C8              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 3 CON ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 420,66                        | 1,18   | 16597,5                | 0,495                           | 0,644                          |
| 2                     | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 405,05                        | 1,23   | 15922,8                | 0,515                           | 0,670                          |
| 3                     | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 396,71                        | 1,25   | 15668                  | 0,526                           | 0,684                          |
| 4                     |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| <b>Media</b>          | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 407,353                       | 1,220  | 16058,016              | 0,512                           | 0,666                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 396,710                       | 1,180  | 15668,000              | 0,495                           | 0,644                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 420,660                       | 1,250  | 16597,500              | 0,526                           | 0,684                          |
| <b>desviación</b>     | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 12,158                        | 0,036  | 480,297                | 0,016                           | 0,020                          |
| <b>mediana</b>        | 0,347       | 0,7685             | 19585          | 405,050                       | 1,230  | 15922,800              | 0,515                           | 0,670                          |

| TABLA C9              |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 4 CON ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 433,63                        | 1,12   | 17486,6                | 0,474                           | 0,615                          |
| 2                     | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 405,42                        | 1,22   | 16053,3                | 0,515                           | 0,668                          |
| 3                     | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 397,31                        | 1,25   | 15668                  | 0,525                           | 0,682                          |
| 4                     | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 388,26                        | 1,28   | 15300,8                | 0,538                           | 0,699                          |
| <b>Media</b>          | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 405,807                       | 1,216  | 16106,432              | 0,512                           | 0,665                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 388,260                       | 1,120  | 15300,800              | 0,474                           | 0,615                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 433,630                       | 1,280  | 17486,600              | 0,538                           | 0,699                          |
| <b>desviación</b>     | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 19,612                        | 0,069  | 956,945                | 0,028                           | 0,036                          |
| <b>mediana</b>        | 0,343       | 0,7705             | 19585          | 401,365                       | 1,235  | 15860,650              | 0,520                           | 0,675                          |

| TABLA C10             |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
|-----------------------|-------------|--------------------|----------------|-------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| MUESTRA 5 CON ADITIVO |             |                    |                |                               |  |                        |                                 |                                |
| # MUESTRAS            | PESO<br>(g) | DENSIDAD<br>(g/cc) | FUERZA<br>(Pa) | TIEMPO DE<br>CAPTURA<br>(Sec) | TAZA DE<br>CIZALLADURA<br>(Sec <sup>-1</sup> ) | VISCOSIDAD<br>(Pa-Sec) | ÍNDICE DE FLUIDEZ<br>(g/10 min) | TASA DE<br>VOLUMEN<br>(cc/min) |
| 1                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 396,51                        | 1,25   | 15654,3                | 0,519                           | 0,680                          |
| 2                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 406,20                        | 1,22   | 16053,3                | 0,508                           | 0,667                          |
| 3                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 404,49                        | 1,23   | 15922,8                | 0,511                           | 0,671                          |
| 4                     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 395,31                        | 1,26   | 15543,7                | 0,522                           | 0,686                          |
| <b>Media</b>          | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 400,599                       | 1,240  | 15792,212              | 0,515                           | 0,676                          |
| <b>Mínimo</b>         | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 395,310                       | 1,220  | 15543,700              | 0,508                           | 0,667                          |
| <b>Máximo</b>         | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 406,200                       | 1,260  | 16053,300              | 0,522                           | 0,686                          |
| <b>desviación</b>     | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 5,514                         | 0,018  | 235,224                | 0,007                           | 0,009                          |
| <b>mediana</b>        | 0,343       | 0,7612             | 19585          | 400,500                       | 1,240  | 15788,550              | 0,515                           | 0,676                          |

## APÉNDICE D

### DATOS ADICIONALES EN PRUEBAS DE RESISTENCIA AL IMPACTO ASTM D 256

| TABLA D1             |                        |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
|----------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|------------|---------|
| MUESTRAS SIN ADITIVO |                        |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
| # MUESTRAS           | RESISTENCIA AL IMPACTO |       |       |       |       | Media   | Mínimo | Máximo  | desviación | mediana |
|                      | (J/m)                  |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
| 1                    | 161,4                  | 161,1 | 172,7 | 94,82 | 174,3 | 149,313 | 94,82  | 174,300 | 33,026     | 161,4   |
| 2                    | 173,2                  | 166,7 | 173,7 | 174,3 |       | 171,947 | 166,7  | 174,300 | 3,545      | 173,45  |
| 3                    | 174,2                  | 174,3 | 173,9 | 173,6 | 171,9 | 173,578 | 171,9  | 174,300 | 0,978      | 173,9   |
| 4                    | 171,2                  | 146,1 | 170,2 | 174   | 174,2 | 166,779 | 146,1  | 174,200 | 11,889     | 171,2   |
| 5                    | 167,6                  | 171,6 | 170,4 | 174,2 | 174   | 171,542 | 167,6  | 174,200 | 2,736      | 171,6   |

| TABLA D2             |                        |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
|----------------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|---------|------------|---------|
| MUESTRAS CON ADITIVO |                        |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
| # MUESTRAS           | RESISTENCIA AL IMPACTO |       |       |       |       | Media   | Mínimo | Máximo  | desviación | mediana |
|                      | (J/m)                  |       |       |       |       |         |        |         |            |         |
| 1                    | 124,8                  | 133,7 | 137,3 | 133,8 | 141,6 | 134,124 | 124,8  | 141,600 | 6,187      | 133,8   |
| 2                    | 132,5                  | 132,8 | 124,5 | 127   | 136,1 | 130,512 | 124,5  | 136,100 | 4,713      | 132,5   |
| 3                    | 122,3                  | 121,3 | 133,4 | 132,8 | 130,5 | 127,953 | 121,3  | 133,400 | 5,827      | 130,5   |
| 4                    | 134,8                  | 127,8 | 134   | 122,3 | 131,8 | 130,057 | 122,3  | 134,800 | 5,155      | 131,8   |
| 5                    | 126,6                  | 129,9 | 132,6 | 129,6 | 126,4 | 128,999 | 126,4  | 132,600 | 2,581      | 129,6   |

## APÉNDICE E

### DATOS ADICIONALES EN PRUEBAS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN ASTM D 638

| TABLA E1                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 1 SIN ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,41 | 3,22    | 122,29       | 364,81                   | 100,86           | 300,88                   | 10                | 122,3             | 364,81                   | 1                     | 11752,5                  |
| 2                       | 10,40 | 3,24    | 124,43       | 369,27                   | 90,21            | 267,73                   | 11                | 124,4             | 369,27                   | 1                     | 12137,6                  |
| 3                       | 10,36 | 3,21    | 124,29       | 373,73                   | 72,29            | 21,36                    | 12                | 124,3             | 373,73                   | 1                     |                          |
| Media                   | 10,39 | 3,22    | 123,67       | 369,25                   | 86,97            | 119,83                   | 11                | 123,66            | 369,25                   | 1                     | 11943,5                  |
| Mínimo                  | 10,36 | 3,21    | 122,29       | 364,81                   | 72,29            | 21,36                    | 10                | 122,30            | 364,81                   | 1                     | 11752,5                  |
| Máximo                  | 10,41 | 3,24    | 124,43       | 373,73                   | 100,86           | 300,88                   | 12                | 124,40            | 373,73                   | 1                     | 12137,6                  |
| Desviación              | 0,03  | 0,02    | 1,20         | 4,46                     | 14,44            | 152,71                   | 1                 | 1,18              | 4,46                     | 0                     | 272,24                   |
| Cov.                    | 0,25  | 0,47    | 0,97         | 1,21                     | 16,45            | 16,05                    | 11                | 1,00              | 1,21                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,40 | 3,22    | 124,29       | 369,27                   | 90,21            | 267,73                   | 11                | 124,30            | 369,27                   | 1                     | 11945,1                  |

| TABLA E2                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 2 SIN ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,5  | 3,22    | 102,57       | 303,38                   | 60,07            | 177,67                   | 15                | 102,6             | 303,38                   | 1                     |                          |
| 2                       | 10,47 | 3,22    | 100,57       | 298,31                   | 54,71            | 162,29                   | 15                | 100,6             | 298,31                   | 1                     |                          |
| 3                       | 10,43 | 3,24    | 104,86       | 310,29                   | 56,57            | 167,40                   | 19                | 104,9             | 310,29                   | 1                     |                          |
| Media                   | 10,47 | 3,23    | 102,65       | 303,95                   | 57,07            | 169,00                   | 16                | 102,68            | 303,95                   | 1                     |                          |
| Mínimo                  | 10,43 | 3,22    | 100,57       | 298,31                   | 54,71            | 162,29                   | 15                | 100,60            | 298,31                   | 1                     |                          |
| Máximo                  | 10,50 | 3,24    | 104,86       | 310,29                   | 60,07            | 177,67                   | 19                | 104,90            | 310,29                   | 1                     |                          |
| Desviación              | 0,04  | 0,01    | 2,15         | 6,01                     | 2,72             | 7,83                     | 2                 | 2,15              | 6,01                     | 0                     |                          |
| Cov.                    | 0,34  | 0,36    | 2,09         | 1,98                     | 4,76             | 4,63                     | 13                | 2,10              | 1,98                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,47 | 3,22    | 102,57       | 303,38                   | 56,57            | 167,40                   | 15                | 102,60            | 303,38                   | 1                     |                          |

| TABLA E3                |       |         |              |                        |                  |                        |                   |                   |                        |                       |                        |
|-------------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| MUESTRA # 3 SIN ADITIVO |       |         |              |                        |                  |                        |                   |                   |                        |                       |                        |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura    | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia   | Cálculo de elongación | Módulo tangente        |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg./cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg./cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,55 | 3,26    | 104,21       | 303,01                 | 59,14            | 171,96                 | 19                | 104,20            | 303,01                 | 1                     |                        |
| 2                       | 10,48 | 3,25    | 103,64       | 304,29                 | 56,00            | 164,42                 | 24                | 103,60            | 304,29                 | 1                     |                        |
| 3                       | 10,56 | 3,25    | 100,21       | 292,00                 | 58,07            | 169,21                 | 16                | 100,20            | 292,00                 | 1                     |                        |
| Media                   | 10,53 | 3,25    | 102,67       | 299,72                 | 57,72            | 168,50                 | 19                | 102,65            | 299,72                 | 1                     |                        |
| Mínimo                  | 10,48 | 3,25    | 100,21       | 292,00                 | 56,00            | 164,42                 | 16                | 100,20            | 292,00                 | 1                     |                        |
| Máximo                  | 10,56 | 3,26    | 104,21       | 304,29                 | 59,14            | 171,96                 | 24                | 104,20            | 304,29                 | 1                     |                        |
| Desviación              | 0,04  | 0,01    | 2,16         | 6,76                   | 1,60             | 3,82                   | 4                 | 2,16              | 6,76                   | 0                     |                        |
| Cov.                    | 0,41  | 0,18    | 2,11         | 2,25                   | 2,77             | 2,27                   | 19                | 2,10              | 2,25                   | 0                     |                        |
| Mediana                 | 10,55 | 3,25    | 103,64       | 303,01                 | 58,07            | 169,21                 | 19                | 103,60            | 303,01                 | 1                     |                        |

| TABLA E4                |       |         |              |                        |                  |                        |                   |                   |                        |                       |                        |
|-------------------------|-------|---------|--------------|------------------------|------------------|------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| MUESTRA # 4 SIN ADITIVO |       |         |              |                        |                  |                        |                   |                   |                        |                       |                        |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo        | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura    | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia   | Cálculo de elongación | Módulo tangente        |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg./cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg./cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg./cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,5  | 3,26    | 101,5        | 296,52                 | 58,21            | 170,07                 | 24                | 101,5             | 296,52                 | 1                     |                        |
| 2                       | 10,54 | 3,26    | 98,93        | 287,91                 | 58,43            | 170,05                 | 17                | 98,9              | 287,91                 | 1                     | 5619,65                |
| 3                       | 10,6  | 3,25    | 98,71        | 286,54                 | 56,07            | 162,76                 | 17                | 98,7              | 286,54                 | 1                     | 5669,67                |
| Media                   | 10,55 | 3,26    | 99,71        | 290,29                 | 57,56            | 167,59                 | 19                | 99,69             | 290,29                 | 1                     | 5644,60                |
| Mínimo                  | 10,50 | 3,25    | 98,71        | 286,54                 | 56,07            | 162,76                 | 17                | 98,70             | 286,54                 | 1                     | 5619,65                |
| Máximo                  | 10,60 | 3,26    | 101,50       | 296,52                 | 58,43            | 170,07                 | 24                | 101,50            | 296,52                 | 1                     | 5669,67                |
| Desviación              | 0,05  | 0,01    | 1,55         | 5,41                   | 1,30             | 4,21                   | 4                 | 1,56              | 5,41                   | 0                     | 35,37                  |
| Cov.                    | 0,48  | 0,18    | 1,55         | 1,86                   | 2,26             | 2,51                   | 20                | 1,60              | 1,86                   | 0                     |                        |
| Mediana                 | 10,54 | 3,26    | 98,93        | 287,91                 | 58,21            | 170,05                 | 17                | 98,90             | 287,91                 | 1                     | 5644,66                |



| TABLA E5                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 5 SIN ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,5  | 3,28    | 100,29       | 291,19                   | 50,36            | 146,22                   | 49                | 100,3             | 291,19                   | 1                     |                          |
| 2                       | 10,47 | 3,27    | 97,93        | 286,03                   | 53,57            | 156,47                   | 24                | 97,9              | 286,03                   | 1                     | 5288,69                  |
| 3                       | 10,56 | 3,29    | 97           | 279,2                    | 55,21            | 158,92                   | 22                | 97                | 279,2                    | 1                     | 5235,99                  |
|                         |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Media                   | 10,51 | 3,28    | 98,40        | 285,43                   | 53,01            | 153,77                   | 30                | 98,39             | 285,43                   | 1                     | 5262,27                  |
| Mínimo                  | 10,47 | 3,27    | 97,00        | 279,20                   | 50,36            | 146,22                   | 22                | 97,00             | 279,20                   | 1                     | 5235,99                  |
| Máximo                  | 10,56 | 3,29    | 100,29       | 291,19                   | 55,21            | 158,92                   | 49                | 100,30            | 291,19                   | 1                     | 5288,69                  |
| Desviación              | 0,05  | 0,01    | 1,70         | 6,01                     | 2,47             | 6,74                     | 15                | 1,71              | 6,01                     | 0                     | 37,26                    |
| Cov.                    | 0,44  | 0,30    | 1,72         | 2,11                     | 4,66             | 4,38                     | 47                | 1,70              | 2,11                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,50 | 3,28    | 97,93        | 286,03                   | 53,57            | 156,47                   | 24                | 97,90             | 286,03                   | 1                     | 5262,34                  |

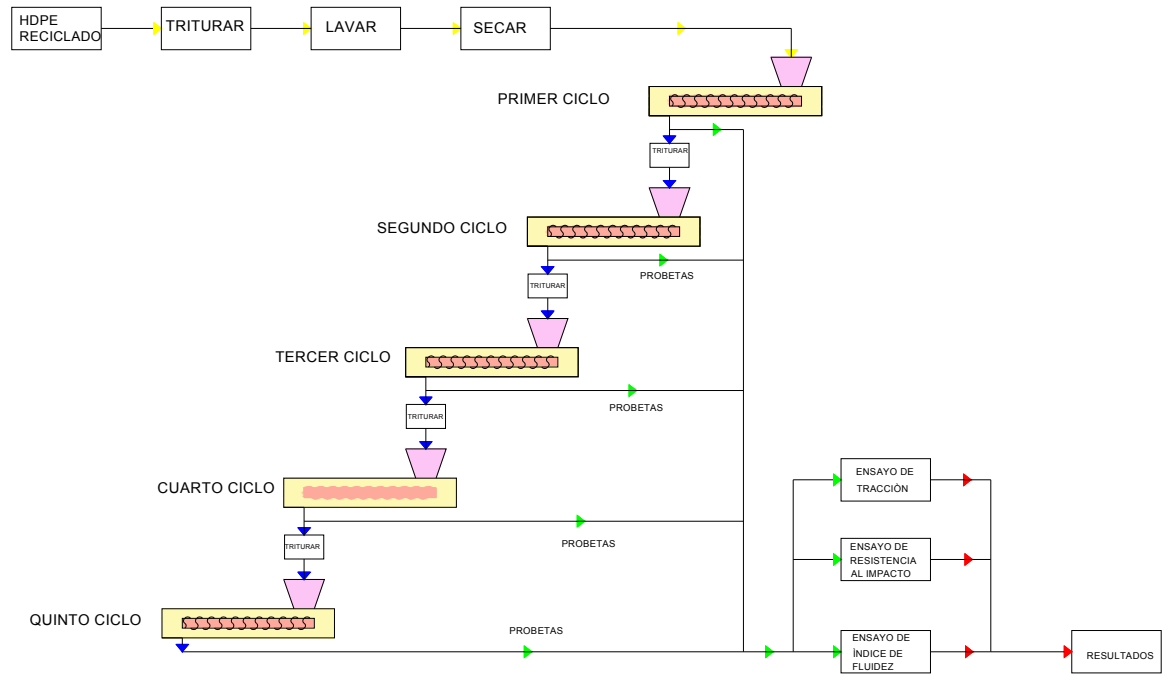
| TABLA E6                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 1 CON ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,45 | 3,23    | 94,43        | 279,76                   | 51,64            | 153                      | 15                | 94,4              | 279,76                   | 1                     | 5520,71                  |
| 2                       | 10,47 | 3,28    | 97,43        | 283,7                    | 54,29            | 158,08                   | 16                | 97,4              | 283,7                    | 1                     | 5804,17                  |
| 3                       | 10,46 | 3,24    | 97,29        | 287,06                   | 51,14            | 150,91                   | 15                | 97,3              | 287,06                   | 1                     | 5491,05                  |
|                         |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Media                   | 10,46 | 3,25    | 96,37        | 283,49                   | 52,34            | 153,97                   | 15                | 96,36             | 283,49                   | 1                     | 5603,55                  |
| Mínimo                  | 10,45 | 3,23    | 94,43        | 279,76                   | 51,14            | 150,91                   | 15                | 94,40             | 279,76                   | 1                     | 5491,05                  |
| Máximo                  | 10,47 | 3,28    | 97,43        | 287,06                   | 54,29            | 158,08                   | 16                | 97,40             | 287,06                   | 1                     | 5804,17                  |
| Desviación              | 0,01  | 0,03    | 1,69         | 3,65                     | 1,69             | 3,69                     | 1                 | 1,70              | 3,65                     | 0                     | 172,86                   |
| Cov.                    | 0,10  | 0,81    | 1,76         | 1,29                     | 3,23             | 2,39                     | 6                 | 1,80              | 1,29                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,46 | 3,24    | 97,29        | 283,70                   | 51,64            | 153,00                   | 15                | 97,30             | 283,70                   | 1                     | 5520,71                  |


| TABLA E7                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 2 CON ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,02 | 3,23    | 92,5         | 285,81                   | 30,07            | 92,91                    | 12                | 92,5              | 285,81                   | 1                     | 5187,92                  |
| 2                       | 10,41 | 3,21    | 97,14        | 290,71                   | 45               | 134,67                   | 23                | 97,1              | 290,71                   | 1                     | 5098,03                  |
| 3                       | 10,41 | 3,24    | 97,71        | 289,71                   | 51,64            | 153,11                   | 20                | 97,7              | 289,71                   | 1                     | 5212,03                  |
| Media                   | 10,28 | 3,23    | 95,75        | 288,74                   | 41,19            | 124,20                   | 18                | 95,74             | 288,74                   | 1                     | 5165,76                  |
| Mínimo                  | 10,02 | 3,21    | 92,50        | 285,81                   | 30,07            | 92,91                    | 12                | 92,50             | 285,81                   | 1                     | 5098,03                  |
| Máximo                  | 10,41 | 3,24    | 97,71        | 290,71                   | 51,64            | 153,11                   | 23                | 97,70             | 290,71                   | 1                     | 5212,03                  |
| Desviación              | 0,23  | 0,02    | 2,86         | 2,59                     | 11,05            | 30,84                    | 6                 | 2,84              | 2,59                     | 0                     | 60,08                    |
| Cov.                    | 2,19  | 0,47    | 2,99         | 0,90                     | 26,16            | 24,30                    | 32                | 3,00              | 0,90                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,41 | 3,23    | 97,14        | 289,71                   | 45,00            | 134,67                   | 20                | 97,10             | 289,71                   | 1                     | 5187,92                  |

| TABLA E8                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 3 CON ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,54 | 3,24    | 95,07        | 278,4                    | 48,43            | 141,81                   | 23                | 95,1              | 278,4                    | 1                     | 5094,71                  |
| 2                       | 10,44 | 3,27    | 91,64        | 268,44                   | 51,14            | 149,81                   | 16                | 91,6              | 268,44                   | 1                     | 5809,97                  |
| 3                       | 10,54 | 3,24    | 91,86        | 268,98                   | 44,93            | 131,56                   | 18                | 91,9              | 268,98                   | 1                     | 5133,53                  |
| Media                   | 10,51 | 3,25    | 92,84        | 271,90                   | 48,10            | 140,86                   | 19                | 92,85             | 271,90                   | 1                     | 5336,25                  |
| Mínimo                  | 10,44 | 3,24    | 91,64        | 268,44                   | 44,93            | 131,56                   | 16                | 91,60             | 268,44                   | 1                     | 5094,71                  |
| Máximo                  | 10,54 | 3,27    | 95,07        | 278,40                   | 51,14            | 149,81                   | 23                | 95,10             | 278,40                   | 1                     | 5809,97                  |
| Desviación              | 0,06  | 0,02    | 1,92         | 5,60                     | 3,11             | 9,15                     | 3,61              | 1,94              | 5,60                     | 0                     | 402,22                   |
| Cov.                    | 0,55  | 0,53    | 2,07         | 2,06                     | 6,47             | 6,48                     | 18                | 2,10              | 2,06                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,54 | 3,24    | 91,86        | 268,98                   | 48,43            | 141,81                   | 18                | 91,90             | 268,98                   | 1                     | 5133,53                  |

| TABLA E9                |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 4 CON ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,4  | 3,23    | 95,57        | 284,51                   | 52,07            | 155,01                   | 15                | 95,6              | 284,51                   | 1                     | 5491,25                  |
| 2                       | 10,4  | 3,27    | 93,93        | 276,2                    | 51,36            | 151,01                   | 20                | 93,9              | 276,2                    | 1                     | 5083,47                  |
| 3                       | 10,4  | 3,24    | 94,71        | 281,08                   | 46,64            | 138,42                   | 21                | 94,7              | 281,08                   | 1                     | 5293,77                  |
| Media                   | 10,40 | 3,25    | 94,73        | 280,58                   | 49,96            | 147,97                   | 18                | 94,73             | 280,58                   | 1                     | 5286,87                  |
| Mínimo                  | 10,40 | 3,23    | 93,93        | 276,20                   | 46,64            | 138,42                   | 15                | 93,90             | 276,20                   | 1                     | 5083,47                  |
| Máximo                  | 10,40 | 3,27    | 95,57        | 284,51                   | 52,07            | 155,01                   | 21                | 95,60             | 284,51                   | 1                     | 5491,25                  |
| Desviación              | 0,00  | 0,02    | 0,82         | 4,18                     | 2,95             | 8,66                     | 3                 | 0,85              | 4,18                     | 0                     | 203,92                   |
| Cov.                    | 0,00  | 0,64    | 0,87         | 1,49                     | 5,90             | 5,84                     | 16                | 0,90              | 1,49                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,40 | 3,24    | 94,71        | 281,08                   | 51,36            | 151,01                   | 20                | 94,70             | 281,08                   | 1                     | 5293,77                  |

| TABLA E10               |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
|-------------------------|-------|---------|--------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| MUESTRA # 5 CON ADITIVO |       |         |              |                          |                  |                          |                   |                   |                          |                       |                          |
| Número de muestras      | Ancho | Espesor | Carga máxima | Esfuerzo máximo          | Carga de ruptura | Esfuerzo de ruptura      | Elongación máxima | Carga de cadencia | Esfuerzo de cedencia     | Cálculo de elongación | Módulo tangente          |
|                         | (mm.) | (mm.)   | (Kg.)        | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (Kg.)            | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |                   | (Kg.)             | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) | (%)                   | (Kg. / cm <sup>2</sup> ) |
| 1                       | 10,46 | 3,24    | 95,71        | 282,42                   | 47,21            | 139,31                   | 22                | 95,7              | 282,42                   | 1                     | 5127,77                  |
| 2                       | 10,42 | 3,21    | 92,86        | 277,61                   | 50,86            | 152,05                   | 17                | 92,9              | 277,61                   | 1                     | 5540,87                  |
| 3                       | 10,46 | 3,23    | 98,86        | 292,6                    | 47,86            | 141,65                   | 19                | 98,9              | 292,6                    | 1                     | 5473,02                  |
| Media                   | 10,45 | 3,23    | 95,78        | 284,14                   | 48,62            | 144,23                   | 19                | 95,80             | 284,14                   | 1                     | 5377,47                  |
| Mínimo                  | 10,42 | 3,21    | 92,86        | 277,61                   | 47,21            | 139,31                   | 17                | 92,90             | 277,61                   | 1                     | 5127,77                  |
| Máximo                  | 10,46 | 3,24    | 98,86        | 292,60                   | 50,86            | 152,05                   | 22                | 98,90             | 292,60                   | 1                     | 5540,87                  |
| Desviación              | 0,02  | 0,02    | 3,00         | 7,65                     | 1,95             | 6,78                     | 2,52              | 3,00              | 7,65                     | 0                     | 221,53                   |
| Cov.                    | 0,22  | 0,47    | 3,13         | 2,69                     | 4,00             | 4,70                     | 13                | 3,10              | 2,69                     | 0                     |                          |
| Mediana                 | 10,46 | 3,23    | 95,71        | 282,42                   | 47,86            | 141,65                   | 19                | 95,70             | 282,42                   | 1                     | 5473,02                  |



| FIMCP - ESPOL   |   | FECHA:      | NDMIREC:     |
|---|---|-------------|--------------|
|   |   | DIBUJO      | 01 / 02 / 09 |
| REVISO  | 12 / 02 / 09  | Ing. RIGAL  |              |
| PROYECTO:   | ESQUEMA DE LOS CINCO CICLOS DE INYECCIÓN DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD CON Y SIN ADITIVO | PLANO N°:   | 1            |
|  ESCALA: 1:1 | CONTIENE: CICLOS DE INYECCIÓN   | MASA (Kg.): |              |
|   | MATERIALES: POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD  |             |              |

## BIBLIOGRAFÍA

1. "Aditivos y Cargas", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://www.quiminet.com.mx>
2. "Antioxidante AOX", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://www.cyttec.com>
3. ASTM Subcommittee D20.30 Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. "ASTM Standard Method D 1238-00. 2000"
4. ASTM Subcommittee D20.30 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. "ASTM Standard Method D 638-00. 2000"
5. ASTM Subcommittee D20.30 Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum impact resistance of Plastics. "ASTM Standard Method D 256-00. 2000"
6. "Efecto del MFI por cambio de temperatura", consulta realizada en Febrero 2009,  
[http://www.immnet.com/article\\_printable.html?article=1131](http://www.immnet.com/article_printable.html?article=1131)

7. "Las partes de una máquina inyectora", consulta realizada en Enero 2009,  
[http:// www.quiminet.com.mx](http://www.quiminet.com.mx)
8. "Lazo continuo de Scrap y resina", consulta realizada en Febrero 2009,  
[http://www.immnet.com/article\\_printable.html?article=83](http://www.immnet.com/article_printable.html?article=83)
9. "Moldeo por inyección", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://www.wikimedia.com>
10. "Polietileno", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>
11. "Proceso de reciclaje", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://www.concienciaambiental.com.mx/cca/plasticos.html>
12. "Propiedades de los Polietilenos", consulta realizada en Febrero 2009,  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades>
13. "Reciclaje Mecánico", consulta realizada en Enero 2009,  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno>

14. Rigáil A. “Aplicaciones del Melt Flow Index (MFI) en la industria del procesamiento de los plásticos”
15. Revista Integra Edición, Revista de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos, No. 8 Marzo, 2007