

## Aplicaciones del Melt Flow Index (MFI) en la industria de procesamiento de plásticos

Andrés F. Rigail-Cedeño\*

\*MSc (Polymer Science), Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP),  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Km. 30.5 vía Perimetral, Campus Gustavo Galindo, Casilla 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador  
arigail@espol.edu.ec

### Resumen

El Melt Flow Index (Índice de Fluidez) de un polímero ha sido utilizado extensivamente como una herramienta de control de calidad. Es una medida utilizada en la fabricación de polímeros pero es poco entendida en la industria de procesamiento de plásticos. En esta investigación, se compararon los efectos del procesamiento de diferentes tipos de polietileno y su relación con el comportamiento del MFI a 190 °C y dos presiones: 2.16 y 10 Kg. Se calcularon los valores de MFI para todos los polietilenos en base a modelo newtoniano Rohlfin y Janzen (R-F). Adicionalmente, se hallaron los valores K y n utilizados en la ecuación o ley exponencial de Oswald y de Waele. En base a los modelos AV Sheony se determinaron las curvas reológicas de polietilenos vírgenes y procesados por extrusión, inyección, soplado y rotomoldeo. Los valores de MFI obtenidos permiten identificar los polietilenos, sus características reológicas, efectos de reprocesado, entre las principales utilidades para optimizar el procesamiento de los plásticos.

**Palabra claves:** MFI, procesamiento, polietileno, reología, flujo

### Abstract

Melt Flow Index is a widely test used for quality control proposes in polymers. This value has been mainly used in the polymerization control process; however it has several useful applications in the polymer processing. This research compares the effects of different types of processing polyethylene in the behavior of MFI at 190°C and two pressures for 2.16 and 10 kg. The values of MFI were calculated using the model developed by Rohlfín and Janzen (R-F) for raw polymer and processed polymers. The AV Sheony models determine the rheological curves of different polyethylene processing by extrusion, injection, blowing and rotomolding. Additionally, the K and n values of power law of Oswald and de Waele were obtained and these values were used to get the flow curves with the MFI values for all polyethylene. The MFI were allowed to identify the types of polyethylene, rheological characteristics, and effects of reprocessing among other application to optimize plastics processing.

**Key words:** MFI, processing, polyethylene, rheology, flow

### 1. Introducción

Los polietilenos son las poliolefinas más utilizadas en nuestro país<sup>1</sup>. Un 55% de las importaciones de las resinas termoplásticas están relacionadas con los polietilenos y sus familias. En los últimos años, los sistemas de polimerización le han otorgado versatilidad a los polietilenos incrementando sus rangos de procesamientos y aplicaciones comerciales. Una de las herramientas más utilizadas para controlar las propiedades reológicas y calidad de las resinas termoplásticas es el Melt Flow Index (MFI).<sup>2</sup> El MFI ha sido aceptado como una muestra de la habilidad de una resina para fluir. Como regla general, altos valores de MFI producirán una mejor fluidez en un polímero. Sin embargo, es importante

conocer la uniformidad de un flujo o la tasa de flujo, y otras propiedades reológicas puede ser determinadas mediante un plastómetro.<sup>1</sup> Esta herramienta permite determinar y cuantificar las relaciones entre la tasa de flujo, viscosidad y el MFI en diferentes termoplásticos. Algunos autores han relacionado el MFI con propiedades intrínsecas de los polímeros como peso molecular o densidad y propiedades mecánicas, térmicas o estéticas de los polímeros o sus mezclas<sup>3,4,5</sup>

La mayoría de fabricantes de resinas proveen los valores de MFI de sus resinas vírgenes -sin procesar-, sin embargo no se realiza ninguna medición del MFI en polímeros reprocesados, mezclados o reciclados que permita optimizar y disminuir el efecto del

procesamiento en las propiedades reológicas o finales de un producto procesado.

El Plastómetro utilizado para obtener los valores MFI es basado en el modelo simple Newtoniano o Ley de Pouselle<sup>6</sup>. Los resultados obtenidos por el plastómetro de los polietilenos procesados y sin procesar se compararon con los datos del modelo de Rohlfín y Janzen<sup>7</sup> (R-F). Una solución analítica de este modelo es el siguiente:

$$Q = \frac{Mg}{8R_p^2 \eta} \left[ \frac{L_b}{R_b^4} + \frac{L_c}{R_c^4} \left( \frac{\sqrt{6}}{3} \frac{R_c}{L_c + 1} \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

La Tabla No. 1 muestra la simbología y valores utilizados para determinar el flujo volumétrico Q. Con los valores de Q y densidad el fundido determinado por el plastómetro se cálculo el MFI:

$$MI, \text{ gr}/10 \text{ min} = [Q, \text{ m}^3/\text{seg}] * [\rho_{fund}, \text{ g}/\text{cm}^3] * [(100\text{cm})^3 / 1\text{m}^3] * [600\text{s}/10\text{min}] \quad (2)$$

En esta investigación se determinó el MFI a 190 °C/2.16 kg y 190 °C/10 Kg. y FRR (MFI<sub>10</sub>/MFI<sub>2</sub>) de diferentes polietilenos sin procesar y procesados por extrusión, inyección, soplado y rotomoldeo a condiciones de procesamiento normalmente utilizados por la industria. Adicionalmente se compararon los valores de MFI determinados por los modelos newtonianos y obtenidos por el plastómetro.

Los cambios en las propiedades reológicas de un polímero dependen principalmente de cuatro factores: tasa del cortante, temperatura, peso molecular y presión. De esta manera cambios en estas variables significarán efectos de las condiciones de procesamiento<sup>8</sup>.

Es de interés en esta investigación determinar las curvas de flujo y variables reológicas de los polietilenos procesados y sin procesar utilizando los modelos desarrollados por A.V Sheony<sup>9</sup> y los valores de MFI obtenidos por el plastómetro. Los modelos AV Sheony simplifican el cálculo de parámetros reológicos en el procesamiento de polímeros. Adicional a estos modelos, los valores de MFI se utilizarán para obtener la ecuación de la ley exponencial Ostwald-de Wade aplicable a tasas de corte de 4 a 1000 s<sup>-1</sup>, los cuales son validos para la mayoría de procesos industriales:

$$\eta * MFI = K \left[ \dot{\gamma} / MFI \right]^{n-1} \quad (3)$$

$\eta$  es la viscosidad no-newtoniano modificada,  $\dot{\gamma}$  es la tasa de corte modificada,  $K$  es el índice de consistencia y  $n$  es un parámetro adimensional

asociado a la ley exponencial. El valor  $n$  puede ser estimado con la siguiente ecuación:

$$\frac{MFI_{10}}{MFI_2} = \left( \frac{10 \text{ kg}}{2.16 \text{ kg}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

El modelo de la ley exponencial permite cuantificar los esfuerzos cortantes y la viscosidad para los procesos de soplado, termoformado, extrusión de tubería, perfiles, extrusión de películas y moldeo por inyección. En el proceso de rotomoldeo, debido a las tasas de corte bajas puede aproximarse al modelo newtoniano. Las curvas de flujo fueron obtenidas para todos los polietilenos.

## 2. Procedimiento Experimental

Los polietilenos sin procesar y procesados se obtuvieron de diferentes productos plásticos tales como fundas extruidas de LDPE para uso industrial accesorios de tuberías inyectados de LDPE para uso sanitario (A-1 –sin procesar, 190/2.16–; A-2 –procesado, 190/2.16–; A-3 –sin procesar, 190/10– y A-4 –procesado, 190/10). Dos tipos de LDPE utilizados en tanques rotomoldeados (tipo 1: B-1, B-2, B-3 y B-4; y tipo 2: C-1, C-2, C-3 y C-4), fundas extruidas de LDPE para uso industrial (D-1, D-2, D-3 y D-4) y envases soplados para yogurt de LDPE (E-1, E-2, E-3 y E-4). Se utilizaron polietilenos vírgenes -sin procesar- y procesados en forma de pellets, polvos o pedazos cortados de películas o de los productos mencionados. Todos los polietilenos procesados y sin procesados tenían en sus composiciones pigmentos, aditivos

Para determinar el MFI y otras propiedades reológicas de los polietilenos se utilizó un plastómetro Tinius Olsen y las pruebas se realizaron en base a la norma ASTM D 1238. Se realizaron mediciones del MFI, Esfuerzo de Corte ( $\tau$ ), viscosidad ( $\eta$ ), densidad de la fundición ( $\rho$ ) a 190°C/2.16 Kg. (MFI<sub>2</sub>) y 190°C/10 Kg. (MFI<sub>10</sub>) y se calculó el FRR (MFI<sub>10</sub>/MFI<sub>2</sub>). La Tabla No. 1 muestra las constantes físicas utilizadas en los cálculos de MFI.

**Tabla No. 1** Constantes físicas del plastómetro

| Constante                             | Valor     |
|---------------------------------------|-----------|
| Masa (m,kg)                           | 2.16 , 10 |
| Longitud de barril ( $L_b$ ,m)        | 0.048162  |
| Radio de barril ( $R_b$ , m)          | 0.004775  |
| Largo de capilaridad ( $L_c$ , m)     | 0.008     |
| Radio de capilaridad ( $R_c$ , m)     | 0.001048  |
| Radio de piston ( $R_p$ ,m)           | 0.004737  |
| $\Delta P = mg/\pi * R_p^2$ m=2.16 kg | 3.01E+05  |
| m=10 kg                               | 1.39E+06  |

### 3. Discusión y Resultados

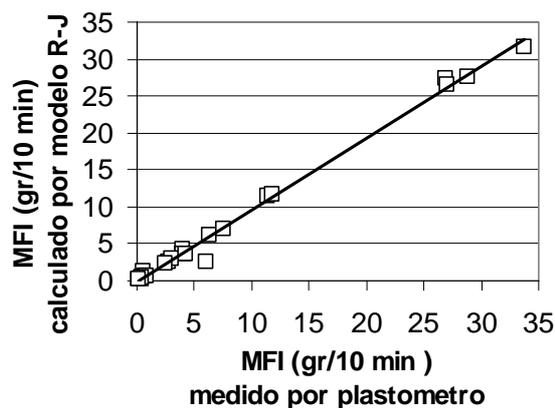
La Tabla No. 2 muestra los resultados obtenidos para los diferentes plásticos y para las condiciones 190°C/2.16 Kg. y 190°C/10 Kg. En la Tabla No.2, en las muestras codificadas aparece una letra seguida del número 1 y 2, estos números indican que el esfuerzo cortante es 19.585 Pa para estas muestras; y cuando los números seguidos de las letras son 3 y 4, el esfuerzo cortante es 90.673 Pa. La Tabla No.2 muestra en términos generales que a valores elevados de la tasa de cortante los valores de viscosidad son menores, bajo las condiciones aquí ensayadas. Sin embargo, la variación de la viscosidad luego de procesado dependerá del nivel de degradación y del tipo de polietileno.

**Tabla No. 2** Datos de MFI obtenidos

| Código | $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | MFI<br>(g/10min) | Viscosidad<br>(Poise) | Tasa<br>cortante<br>(s <sup>-1</sup> ) |
|--------|--------------------------------|------------------|-----------------------|--|
| A-1    | 0,765                          | 0,35             | 23.315,50             | 0,84                                   |
| A-2    | 0,771                          | 0,19             | 44.073,60             | 0,46                                   |
| A-3    | 0,748                          | 6,32             | 5.871,30              | 15,45                                  |
| A-4    | 0,765                          | 2,71             | 14.002,80             | 6,48                                   |
| B-1    | 0,763                          | 3,99             | 1.741,30              | 11,26                                  |
| B-2    | 0,776                          | 4,07             | 2.039,60              | 9,60                                   |
| B-3    | 0,776                          | 33,76            | 1.139,40              | 79,58                                  |
| B-4    | 0,715                          | 26,97            | 1.315,10              | 68,97                                  |
| C-1    | 0,743                          | 3,92             | 2.028,50              | 9,66                                   |
| C-2    | 0,776                          | 4,22             | 1.966,90              | 9,96                                   |
| C-3    | 0,754                          | 27,10            | 1.366,70              | 66,35                                  |
| C-4    | 0,759                          | 28,81            | 1.306,90              | 69,40                                  |
| D-1    | 0,771                          | 0,36             | 22.844,90             | 0,86                                   |
| D-2    | 0,776                          | 0,56             | 6.213,10              | 14,60                                  |
| D-3    | 0,754                          | 6,02             | 14.781,40             | 1,33                                   |
| D-4    | 0,781                          | 7,55             | 5.140,40              | 16,91                                  |
| E-1    | 0,767                          | 0,70             | 10.387,90             | 1,91                                   |

|     |       |       |           |       |
|-----|-------|-------|-----------|-------|
| E-2 | 0,748 | 0,79  | 10.095,00 | 1,94  |
| E-3 | 0,732 | 11,45 | 3.169,40  | 28,62 |
| E-4 | 0,743 | 11,82 | 3.116,20  | 29,11 |
| F-1 | 0,754 | 0,44  | 18.764,77 | 1,06  |
| F-2 | 0,752 | 0,14  | 39.372,60 | 0,51  |
| F-3 | 0,759 | 3,06  | 12.326,13 | 7,38  |
| F-4 | 0,754 | 2,42  | 15.462,23 | 5,87  |

En la Figura No. 1 se muestran los valores de MFI calculados por el modelo newtoniano Rohlfin y Janzen (R-J) de todos los polietilenos y los valores de MFI obtenidos por el plastómetro. El modelo nos permitió observar valores de MFI obtenidos de polietilenos de diferentes formas: polvo, pellets, pedazos de películas o partes inyectadas. Sin embargo los valores de MFI del plastómetro son ligeramente mayores a los obtenidos por el modelo R-F, esto posiblemente se debe a que el equipo es basado en el modelo Newtoniano simple. Valores mayores de MFI entre modelos newtonianos y no newtonianos han sido obtenidos por otros autores, obteniendo resultados similares por cuanto los esfuerzos y tasa cortantes de un plastómetro son bajos comparados a aquellos valores en equipos industriales de procesamiento<sup>6</sup>

**Figura No. 1** Relación entre valor de MFI obtenidos por el plastómetro y modelo R- J

En la Figura No.2 se muestra los valores del FRR ( $MFI_{10}/MFI_2$ ) de los valores de MFI sin procesar y los valores de MFI procesados. Los valores del  $MFI_{10}$  fueron mayores que los valores de  $MFI_2$  a similares condiciones del plastómetro. El FRR es mayor en el caso de los polietilenos de las serie A, D, E. Los polietilenos rotomoldeados – series B y C- tiene valores menores de FRR en comparación con los cambios de valores de FRR en los polietilenos utilizados en extrusión o inyección. Sin embargo, en todos los casos, a excepción de la serie F, los valores de FRR sin procesar son mayores que los FRR procesados. El  $\Delta P$  total a la salida del dado se incrementa de 3.01 E+05 para la masa de 2.16 Kg. a 1.39E+06 para la masa de 10 kg. (Ver Tabla No.1)

Esto indica que el incremento de la presión tiene una incidencia directa en la fluidez de un polietileno a similares condiciones de procesamiento.

En la Figura No.3 se muestra la relación entre los valores de MFI procesados y sin procesar. Los valores cercanos a la línea punteada indican que para las dos presiones investigadas se produce un cambio similar de los valores de MFI o fluidez del material. Esto se presenta en los casos de los polietilenos rotomoldeados (B y C) y extruidos (D y E), en los cuales se obtuvo una relación de cambio de  $MFI_{SP}$  y  $MFI_P$  entre 0.6 y 1.2. En el caso del polietileno A, el cambio del índice de fluidez de  $MFI_{10}$  (SP/P) fue 2 a 3 veces mayor que las valores obtenidos de los  $MFI_2$  (SP/P). Para el polietileno F, existe una mayor disminución de la fluidez en los  $MFI_2$  (SP/P) comparado con los  $MFI_{10}$ . Es una regla general que las cadenas de los polietilenos lineales sometidos a ciclos de procesamiento se cortan aumentando su fluidez y a diferencia de los polietilenos ramificados, cuyas cadenas se entrecruzan disminuyendo la fluidez. Ambos casos se debe a degradación termomecánica<sup>10</sup> Siendo más específico, los polietilenos polymerizados por Ziegler-Natta disminuirán su fluidez y polietilenos polymerizados por Phillips incrementar su fluidez con el incremento del número de veces de procesamiento. En el caso de los LDPE, se produce un entrecruzamiento cuando se procesa entre 150-200°C debido a la degradación termo-oxidativa que ocurre. Es conocido que el  $MFI_P$  no debe variar más del 40% en comparación con el  $MFI_{SP}$  para indicar que se realizó un buen proceso. Los valores obtenidos para los polietilenos A, D y F obtuvieron datos mayores al 40% entre ambos  $MFI_{SP}$  y  $MFI_P$

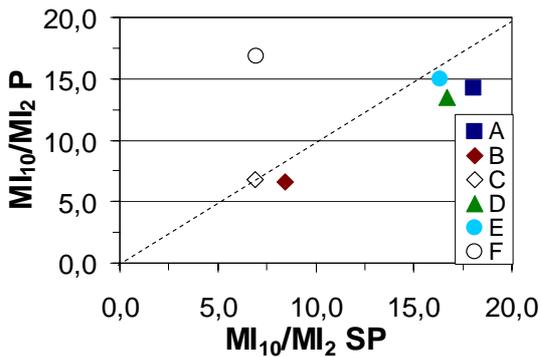


Figura No. 2 Relación de MFI10 y MFI2 a 190°C procesados (P) y sin procesar (SP)

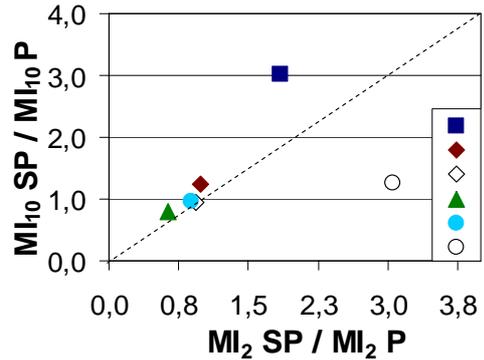


Figura No. 3 Relación de MFI Sin procesar (SP) y Procesados (P) a 190°C/2.16 Kg

En la Figura No. 4 se muestra los valores de  $MFI_2$  (serie sombreada) y  $MFI_{10}$  (serie sin sombrar). La viscosidad aparente disminuye cuando aumenta la presión. Los polietilenos inyectados y extruidos tienen este comportamiento. Sin embargo la viscosidad de los polietilenos rotomoldeados no cambia significativamente cuando aumenta la presión en la salida del dado del plastómetro o se incrementa el esfuerzo cortante, esto revela un comportamiento más bien newtoniano de estos polímeros.

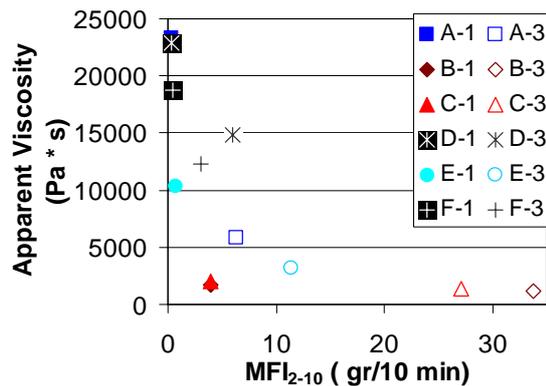


Figura No. 4 Relación entre el MFI y la viscosidad

En la Figura No. 5 se observa el efecto de un ciclo de procesamiento en los valores de  $MFI_2$ . Los polietilenos rotomoldeado casi no sufren cambio ni en la viscosidad aparente ni en los valores de MFI luego del procesamiento, esto se debe a las bajas presiones y cortantes a los que fueron sometidos dichos polímeros y no hay evidencias de degradación térmica. En el caso de los polietilenos extruidos e inyectados no hay mayores cambios en valores de MFI, pero se observa un incremento (A) o decremento (E) significativos de la viscosidad aparente, estos cambios se deben a las características de los polietilenos y sus condiciones de procesamiento. Aunque, el polietileno D aumenta la viscosidad contrariamente a los polietilenos A o E.

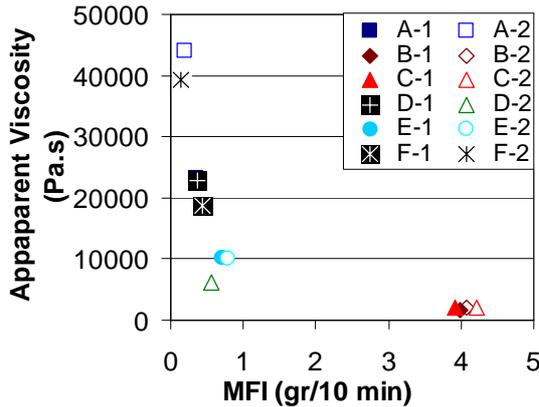


Figura No. 5 Efecto del procesamiento en los valores de MFI (190/2.16)

En la Tabla No. 3 se muestra los valores del índice K y n según el modelo de ley exponencial calculado utilizando la ecuación No. 3 y condiciones de la prueba MFI a 190/2.16. Las Series A, D y E muestran valores de n entre 0.53 y 0.58 y valores también similares de K entre 1.14 y 1.33 x 10<sup>4</sup>. La Series B y C correspondiente a los polietilenos rotomoldeados muestra que K disminuye ligeramente y n aumenta considerablemente (0.72 a 0.81) comparados con los aquellos valores de K y n de las Series A, D y E. A medida que aumenta K, disminuye n. El parámetro n mientras más disminuya mayor será la sensibilidad al cortante de la resina.

Tabla No.3 Constantes de Ley exponencial

| Modelo Exponencial   |  |              |
|----------------------|--|--------------|
| Serie de Polietileno | Indice de consistencia K (g/cm*s <sup>2-n</sup> ) (g/10min) <sup>n</sup> | Constante, n |
| A-1                  | 1.23 x 10 <sup>4</sup>   | 0.53         |
| A-2                  | 1.22 x 10 <sup>4</sup>   | 0.58         |
| B-1                  | 0.93 x 10 <sup>4</sup>   | 0.72         |
| B-2                  | 0.98 x 10 <sup>4</sup>   | 0.81         |
| C-1                  | 0.96 x 10 <sup>4</sup>   | 0.79         |
| C-2                  | 0.99 x 10 <sup>4</sup>   | 0.80         |
| D-1                  | 1.22 x 10 <sup>4</sup>   | 0.54         |
| D-2                  | 1.33 x 10 <sup>4</sup>   | 0.59         |
| E-1                  | 1.14 x 10 <sup>4</sup>   | 0.54         |
| E-2                  | 1.18 x 10 <sup>4</sup>   | 0.57         |
| F-1                  | 0.99 x 10 <sup>4</sup>   | 0.79         |
| F-2                  | 1.01 x 10 <sup>4</sup>   | 0.54         |

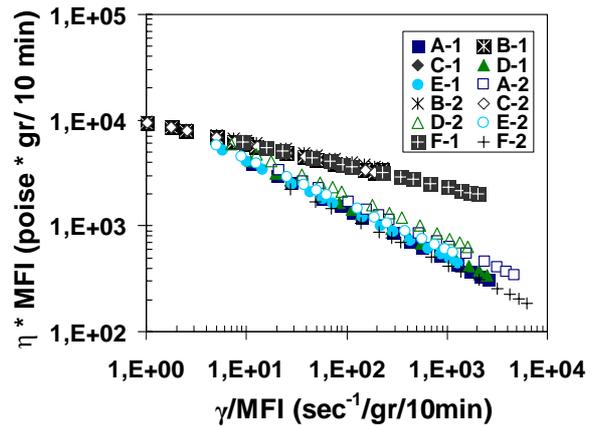


Figura No. 6 Curva de unificada de los polietilenos a condiciones 190/2.15

Cuando n=1 el flujo es newtoniano y K es igual a la  $\eta$ . Este fenómeno puede ser observado en la Figura No.6 en el caso de los polietilenos rotomoldeados con valores de n cercanos a la unidad. En la curva unificada de la Figura No. 6 se muestran los cambios de viscosidad entre los polietilenos rotomoldeados y los inyectados o extruidos. Las curvas obtenidas en la Figura No. 6 pueden verse afectadas por la disminución de fluidez como el caso de del polietileno F. Cuando el número K se acerca a la unidad la curva tiende a ser perpendicular al eje de la viscosidad por su tendencia a fluidez newtoniano como en el caso de la serie B, C y F-1. En un segundo grupo encontramos los polietilenos que tienen valores entre 0.57 a 0.59 en los casos de los reprocesados A-2, D-2 y E-2 mientras que los valores entre 0.53 y 0.54 se presentaron en A-1, D-1, E-1 y F-2.

#### 4. Conclusiones

El MFI no solo es un indicativo del control de calidad. El MFI permite indentificar los tipos de polietilenos. Es una medida cualitativa de la degradación termomecánica. Con el MFI se puede identificar las características reológicas de polietilenos procesados y sin procesar y como el procesamiento se afecta por la fluidez de un polietileno. El modelo de Rohlfin y Janzen permite calcular el MFI para diferentes temperaturas o masas con bastante exactitud. Con diferentes valores de MFI se puede calcular las constantes de la ley exponencial de Ostwald y de Waele y asi obtener las curvas reológicas de flujo de los polietilenos. Los datos de las constantes permitirían optimizar los diseños de dados y/o mejoras tecnológicas a las máquinas actuales. El MFI permite identificar las características reológicas de los polietilenos rotomoldeados, extruidos o inyectados. La curva unificada de polietilenos ayuda a optimizar las

condiciones de procesamiento o porcentaje de reciclado o reprocesado o análisis de aditivos estabilizantes.

## 5. Agradecimientos

Se agradece a la Asociación Ecuatoriana de Plásticos (ASEPLAS) por el uso del plastómetro Tinnus Olsen y a sus compañías socias Plásticos Ecuatorianos, Plastigama y Plastigomez por las muestras de los polietilenos.

## 6. Referencias

- [1] Revista Integra Edición , Revista de la Asociación Ecuatoriana de Plásticos, No. 5 Marzo, 2006
- [2] ASTM Subcommittee D20.30 Standard Test Method for Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. ASTM Standard Method D 1238-00. 2000
- [3] Shenoy,A. V.; Saini, D.R, Melt Flow Index: More Than Just a quality control rheological parameter. Part I Advance Polymer Technology. 1986, 6, 1-58
- [4] Shuster A, Keing S, Marchukov J Impact Enhancement of High Melt Flow HDPE, Society of Plastics Engineers, ANTEC 2002
- [5] McShame P, McNally G, McNally T, Murphy W.R, Cook M, Miller A. The effect of Polypropylene MFI on the rheological, morphological, and mechanical properties of polypropylene / polyethylene-octene copolymer blends, SPE, ANTEC 2001
- [6] Clay John, Melt Index from a Single Pellet. SPE-ANTEC, 2001
- [7] Seavey K, Liu Y, Khare N Quantifying Relationships among the Molecular Weight Distribution, Non-Newtonian Shear Viscosity, and Melt Index for linear Polymers Industrial Engineering Chemical Research, 2003, 42, 5354-5362
- [8] Spence A., Investigation of the Rheological Properties of rotomolding resins, SPE-ANTEC, 1999
- [9] A.V Shenoy, D.R. Saini Rheological models for unified curves for simplified design calculation in polymer processing. Rheologica Acta, 1984, 23, 368-377
- [10] Arup Choudhury, Mandira Mukherjee, Basudam Adhikarib, Thermal stability and degradation of the post-use reclaim milk pouches during multiple extrusion cycles Thermochemica Acta 2005, 430, 87-94