

# Reingeniería de una Extrusora de Tornillo Simple para el Desarrollo de Compuestos de Poliolefinas con Altas Concentraciones de Carbonato de Calcio

C. Correa, B. Zambrano, A. Rigail-Cedeño \*

Área de Materiales y Procesos de Transformación / Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil - Ecuador  
\*arigail@espol.edu.ec

## Resumen

*Características multifuncionales como altas propiedades térmicas, mecánicas, químicas, de barrera, ópticas, eléctricas y alto desempeño han sido atribuidas a los Compuestos de Polímeros con diversos rellenos. En el Ecuador, los compuestos de Poliolefinas – CaCO<sub>3</sub> se muestran como la alternativa más conveniente en el ámbito industrial debido a su bajo costo, abundancia, efecto reforzante y alta reciclabilidad. El presente trabajo propone que a partir de maquinaria convencional existente en nuestro país, se puede llegar a desarrollar el proceso de dispersión de las partículas en la matriz polimérica con efectividad y eficiencia. Se tratan con particularidad el diseño de tornillos de extrusión para lograr una buena dispersión del relleno y el diseño de cabezales de peletizadoras. Finalmente, se hacen pruebas de desempeño en la máquina, desarrollando mezclas ternarias de HDPE – LLDPE – CaCO<sub>3</sub>, obteniéndose aumentos significativos en el módulo elástico, resistencia a la rotura en tracción, entre otras propiedades mecánicas...*

**Palabras Claves:** Tornillos de extrusión, Cabezal de extrusión, Polímeros compuestos.

## Abstract

*Multifunctional features as enhanced properties and high performance characteristics have been attributed to Polymer Composites with several types of fillers. In Ecuador, Polyolefin – CaCO<sub>3</sub> are the most convenient choice in the industrial environment due to lower cost, abundance, reinforcement effect and high recycling capacity. This work demonstrates that starting from existent machinery in Ecuador, we can develop with effectiveness the filler dispersion process. Extruder screw design and pelletizers die design are revised. Finally, HDPE – LLDPE – CaCO<sub>3</sub> blends are developed to measure the performance of the machine; enhanced Young modulus, Rupture stress and others mechanical properties were found.*

**Keywords:** Extrusion Screw, Extruder die, Polymer Composites.

## 1. Introducción

Desde inicios de la industria plástica moderna a principios del siglo 20, los materiales termoplásticos han sido cada vez más demandados por la sociedad debido a su amplio abanico de aplicaciones. Los termoplásticos denominados “comodities” como el Polietileno y Polipropileno, que por su bajo costo y alta reciclabilidad, continúan con una alta demanda en los mercados mundiales. En Ecuador ha habido un constante crecimiento de las importaciones de termoplásticos debido al alto consumo; sin embargo la tendencia se ha acentuado en los polietilenos en las últimas décadas. Así por ejemplo, podemos citar los polietilenos de alta densidad, lineales de baja densidad y baja densidad constituyen casi el 60% de las importaciones de termoplásticos en el Ecuador, tal

como se muestra en la Figura 1. Como se observa en esta figura la tendencia se mantendrá o incrementará en los próximos años [1].

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

Recibido: Junio, 2007

Aceptado: Agosto, 2007

alcanzado con éxito con el desarrollo de compuestos de Polímeros rígidos con “rellenos funcionales” [2] [3] [4].

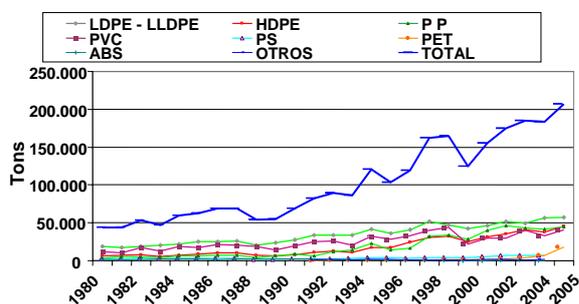


Figura 1. Importaciones de Polímeros en Ecuador en los últimos años

Existen algunos minerales utilizados en conjunto con los termoplásticos, sin embargo, el carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es una alternativa de importancia para nuestro país debido a su abundancia, disponibilidad y bajo costo; pero sobre todo por el aumento de propiedades mecánicas como resistencia a la tensión, módulo elástico, y resistencia al impacto, principalmente [5]. En el presente trabajo se desarrollarán compuestos de Polietilenos con carbonatos de calcio, por ser las materias primas de mayor utilización en la industria plástica ecuatoriana.

Las propiedades finales que tendrá el compuesto PE -  $\text{CaCO}_3$ , dependerán ampliamente del proceso de mezclado entre las fases del compuesto [6]. Para cumplir esta función con eficiencia, se diseñó un tornillo nuevo para la máquina con diferentes zonas de mezclado y se realizó un rediseño del cabezal de una extrusora de tubería de termoplásticos para transformarlo en un cabezal de una peletizadora convencional. Finalmente se evalúa el comportamiento a la tensión de un compuesto ternario HDPE – LLDPE -  $\text{CaCO}_3$ , realizado con la extrusora reconstruida, para constatar indirectamente el desempeño del equipo desarrollado.

## 2. Reingeniería de la extrusora de tubería

Para el presente trabajo, se usó una extrusora de tornillo simple Cincinatti, equipada con un dado para fabricación de tubería de termoplásticos, relación  $L/D=24$  (se reconstruyó a  $L/D=26$ ), donada por la compañía Amanco – Plastigama (Fig. 2). Dicha extrusora fue adaptada para transformarla en una máquina para fabricación de compuestos de polímeros y rellenos orgánicos o inorgánicos. Dado que el diseño mecánico de componentes en extrusoras está ampliamente estudiado [7], principalmente el trabajo realizado consistió en dos variables claves para obtener con eficacia un compuesto: la operación de dispersión y distribución del relleno en la mezcla

dentro de la máquina (diseño del tornillo), y el rediseño del dado de la extrusora. El diseño original del tornillos mostrado un sistema simple útil para extruir masterbatch de polietilenos o polipropilenos, sin embargo este mostraba un desgaste y corrosión, igual caso era el cilindro o barril



Figura 2. Vista frontal de la Extrusora donada por Plastigama luego de su reconstrucción.

### 2.1 Sistema Tornillo – Cañón

El término mezclado en extrusión se refiere a todas las operaciones que tienen tendencia a aumentar la uniformidad en los gradientes de concentración, temperatura, tamaño de la fase dispersa u otras propiedades de los materiales [8]. Existe diversidad de tipos de tornillos según el polímero ha extruir. Sin embargo, en los últimos años la tendencia ha sido incluir mezcladores dispersivos y distributivos para incrementar el uso de mezclas de polímeros o desarrollo de compuestos de polímeros. Generalmente, se divide este proceso de mezclado en dos partes:

#### 2.1.1 Mezcladores dispersivos

Estos mezcladores se encargan de dar uniformidad al tamaño de las partículas, rompen los aglomerados y los dispersan en la mezcla. Se incorporaron al diseño del nuevo tornillo un mezclador tipo Maddox (Fig. 3) y 3 mezcladores tipo anillo (Fig. 4) para cumplir los siguientes objetivos:

- Someter al flujo polimérico a altos esfuerzos, minimizando los cortantes y maximizando los de elongación [9].
- Los elementos del flujo deben pasar por las regiones de esfuerzo varias veces para incrementar la acción de mezclado.

Los mezcladores tipo Maddox han sido utilizados con mucho éxito en la extrusión de fundido de LLDPE [10]



**Figura 3.** Mezclador dispersivo tipo Maddox o Le Roy

### 2.1.2 Mezcladores distributivos

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

Se incorporó un mezclador tipo romboide (Fig. 5) al final del tornillo para cumplir con los siguientes objetivos:

- Someter el flujo polimérico a altos esfuerzos cortantes para incrementar la acción de distribución de las partículas.
- El flujo debe ser partido y reorientado constantemente.



**Figura 4.** Mezclador dispersivo tipo anillo



**Figura 5.** Mezclador distributivo tipo romboide

En la Fig. 6 se muestra el tornillo completo de la extrusora de la FIMCP. Este tornillo fue fabricado en acero V-820, se le hizo un tratamiento superficial de nitrado obteniéndose una dureza final de 70 /72 Rc con el objetivo de la realización de compuestos abrasivos en un futuro.

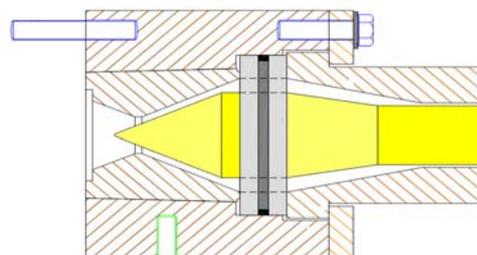


**Figura 6.** Vista general del nuevo tornillo

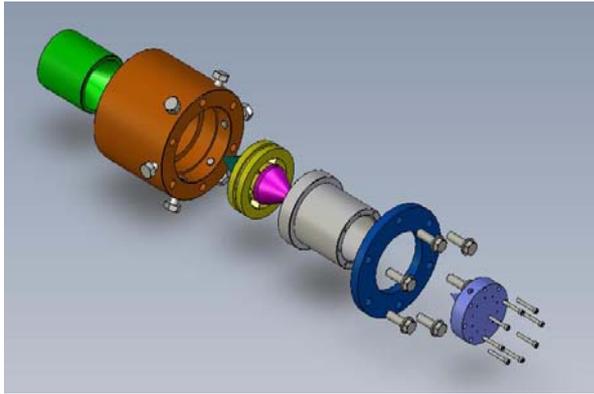
## 2.2 Reingeniería del cabezal de extrusión

El diseño de dados de extrusión está basado en principios de reología, termodinámica y transferencia de calor. El diseño de estos dispositivos es todavía una ciencia semi-empírica [11], en donde la experiencia del fabricante juega un papel primordial en el futuro desempeño del diseño.

En este trabajo se ha partido de un diseño de dado anular para fabricación de tubería de PVC (Fig. 7), el cual fue rediseñado por los autores para la fabricación de "tallarines" de compuestos plásticos, los cuales son enfriados y cortados para producir pellets que posteriormente pueden ser utilizados en operaciones de transformación tales como extrusión, soplado o inyección. En el diseño se tuvo especial atención en evitar puntos muertos de flujo, así como en no producir cambios abruptos de área en las zonas donde fluirán los compuestos plásticos. Asimismo un buen acabado de las superficies interiores. Con esto se busca evitar inestabilidades de proceso que se producen generalmente en los cabezales de extrusión como la fractura del fundido [12]. Para esto se utilizó modelado tridimensional parametrizado del ensamblaje completo del dispositivo. En la Fig. 8 se muestra el diseño final incorporado a la máquina.



**Figura 7.** Ensamble en corte del dado de extrusión de tubería donado por la compañía Amanco - Plastigama



**Figura 8.** Vista en explosionada del modelo del cabezal diseñado y construído por los autores para la extrusora de la FIMCP

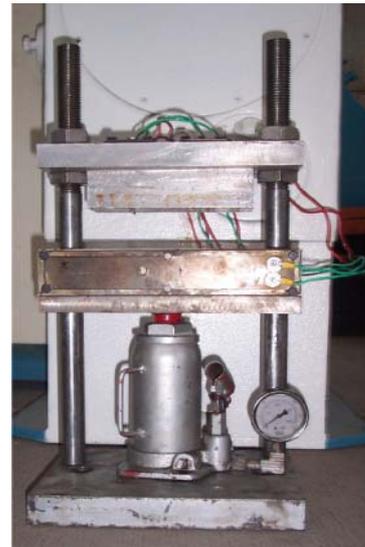
### 3. Procedimiento Experimental

Para evaluar las capacidades de mezclado del sistema, se desarrollaron mezclas ternarias de Polietileno de alta densidad (LG LUTENE FE0070) un masterbatch compuesto de 80% de CaCO<sub>3</sub> y 20% de Polietileno de densidad lineal (LLDPE) en forma de pellets según se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Mezclas desarrolladas en el experimento

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

Se prepararon 5 muestras de 2 Kg. por cada mezcla según los porcentajes de la tabla 1. Posteriormente, estos materiales fueron procesados en estado fluído en la peletizadora FIMCP – ESPOL rediseñada en este trabajo. Con estos compuestos, fueron preparadas placas de 200mm x 70mm x 3mm mediante moldeo por compresión, según la norma ASTM1928 a una temperatura de 150°C y una presión de 10MPa en una prensa hidráulica desarrollada en esta investigación, tal como se indica en la Fig. 9. De estas placas, fueron troqueladas probetas para ensayo de tensión Tipo I (ASTM D638) en un troquel RAY RAN. Finalmente, se ensayó el comportamiento a la tensión de 5 probetas por cada mezcla de la tabla 1, a una velocidad de deformación de 50mm/min, de acuerdo a la norma ASTM-D638. Con este método tendríamos el 95% de confiabilidad según la norma citada.



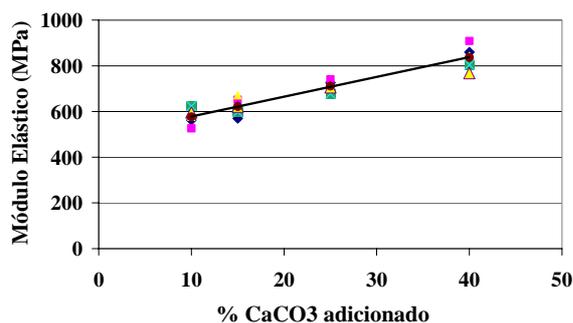
**Figura 9.** Dispositivo desarrollado por los autores para termoformar placas según la norma ASTM-D1928

### 4. Resultados y discusión

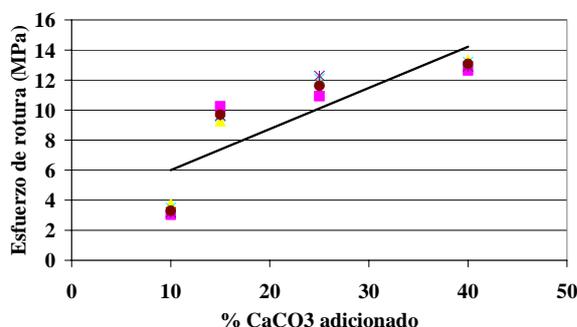
En la tabla 2 muestra la media de 5 valores de los resultados del ensayo de tensión (Módulos Elásticos y Resistencias a la Rotura). Se observó en las líneas de tendencia de las medias calculadas, que conforme se aumentan los porcentajes de relleno en las mezclas, hay un aumento marcado del módulo elástico y el esfuerzo de rotura observándose claramente el efecto reforzante del carbonato de calcio (Fig. 10 y 11). Se deja notar también que el efecto reforzante de las cargas es observable mientras se tenga una buena operación de dispersión y adhesión, caso contrario las propiedades mecánicas de los compuestos resultan ser inversamente proporcionales a los porcentajes de relleno adicionados.

**Tabla 2.** Datos de ensayos mecánica ASTM D638

CaCO <sub>3</sub> (%)	Modulo de Elasticidad (Mpa)	Esfuerzo de Rotura (Mpa)
10	576,966	3,304
15	622,096	9,706
25	711,564	11,624
40	836,818	13,076

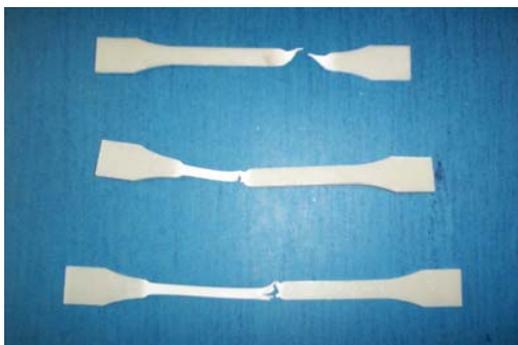


**Figura 10.** Dependencia del Módulo Young con respecto al porcentaje de CaCO<sub>3</sub> contenido. Los puntos rojos indican los valores promedio calculados



**Figura 11.** Dependencia del esfuerzo de rotura con respecto al porcentaje de CaCO<sub>3</sub> contenido. Los puntos rojos indican los valores promedio calculados

La deformación a la rotura disminuyó conforme se aumentaron los porcentajes de relleno debido al aumento de rigidez del compuesto. Este efecto puede ser mejor apreciado en la Fig. 12, donde se puede observar claramente la disminución en la deformación de las probetas luego de su ensayo de tracción.



**Figura 12.** Probetas de 3 mezclas ensayadas (15, 25 y 40% de CaCO<sub>3</sub>). Las menos elongadas corresponden a los más altos porcentajes de carga

En todos los experimentos se observó cierta dispersión de los datos; esto indicaría que no tenemos una alta reproducibilidad en los experimentos realizados. Se

estima este efecto se debe a que los experimentos no son realizados a escala laboratorio, sino a escala industrial, donde todas las condiciones no se pueden controlar con el grado de exactitud que se tiene en un laboratorio experimentando sobre una muestra de masa ínfima. Estos tipos de extrusora son comunes en nuestra pequeña y mediana industria del plástico en Ecuador. Por otro lado los costos involucrados en la limpieza total de la línea de extrusión por el cambio de la mezcla son considerables, por lo que se buscó reproducir de cierta forma la experiencia industrial. Se deja claro, sin embargo, que la línea de tendencia sobre las medias calculadas en las mediciones evidencia un mejoramiento de las propiedades mecánicas, inclusive a altas cargas de carbonato (40% en el experimento 4); teniendo en cuenta que la bibliografía muestra aumentos relativos similares usando otras tecnologías más costosas [12], podemos estimar que la capacidad de dispersión de la máquina es buena.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

- Se ha propuesto una alternativa tecnológica de bajo costo para la fabricación de compuestos plásticos mediante la adaptación de máquinas extrusoras de tornillo simple a sistemas de peletizado de compuestos.
- Los resultados obtenidos muestran un marcado aumento de las propiedades mecánicas en compuestos de polietilenos con carbonatos de calcio; siendo así, podemos estimar que tenemos una buena capacidad de mezclado en la peletizadora desarrollada.
- La adición de carbonato de calcio como relleno, aumenta la rigidez del polietileno para diversas aplicaciones industriales. Se concluye que es posible preparar con éxito técnico compuestos a partir de estos materiales; esto es una alternativa atractiva desde el punto de vista técnico pero también desde la economía por la disponibilidad de este mineral en el país.

## 6. Agradecimientos

Agradecemos a la compañía NUTEC S.A. por la donación del polietileno y carbonatos de calcio para la realización de este trabajo.

Al CICYT, y a FUNDACYT (SENACYT) por el cofinanciamiento en la reconstrucción de la extrusora.

Al Ing. Bolívar Alban por su asesoría e instalación del sistema eléctrico de la Extrusora.

A la Compañía GOLCHE y Hugo Roitman por su asesoría en el diseño y fabricación del tornillo

Especialmente agradecemos a PLASTIGAMA por la donación de una extrusora de tubería y facilitarnos la realización de los ensayos de tensión y troquelado en sus laboratorios.

## 7. Referencias

- [1] Revista Integra ASEPLAS (2005) (2006) (2007) “Estadísticas de Importaciones de Resinas”, ASEPLAS.
- [2] Hornsby PR. In: Jancar J, editor (1999). Rheology, compounding and processing of filled thermoplastics. Mineral fillers in thermoplastics I., Raw materials and processing. Advances in polymer science, vol.139, 1999. p. 67. 1999. p. 155.
- [3] Rothon RN. JancarJ, editor (1999). Mineral fillers in thermoplastics: Filler manufacture and characterisation. Mineral fillers in thermoplastics I. Raw materials and processing. Advances in polymer science, vol.139, 1999. p. 67.
- [4] Tsou Andy (2000), “Fillers”, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 10, 1-5
- [5] A. Lazzeri, S.M. Zabarjad, M. Pracella, K. Cavalier (2005) “Filler toughening of plastics. Part 1—The effect of surface interactions on physico - mechanical properties and rheological behaviour of ultrafine CaCO<sub>3</sub>/HDPE composites” , Polymer 46 827–844”
- [6] Morton-Jones D, (2004), “Polymer Processing”, Chapman & Hall, 128-129
- [7] Rauwendaal C, (2001), “Polymer Extrusion”, Hanser Publishers.
- [8] Baird D, Collias D, (1998) “Polymer Processing: Principles and Design”, Wiley Inter-science, 135
- [9] Rauwendaal C, “Extrusion”, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, Vol. 2, 533-546
- [10]M T Martyn, G D Smith, R Spares and PD Coates (2005), Effect Of Screw Design On Polyethylene Blown Film Processing, Antec
- [11] Vukota B. (2004) “Die design fundamentals”, Hardcover, 125-128
- [12] Heinemann H., (2006), “Polymer Processing Instabilities”, Marcel Dekker, Part B.
- [12] Misra R., Nerikar P., Bertrand K., (2004), “Some aspect on the surface deformation and fracture of calcium carbonate-reinforced polyethylene composites”, Materials Science and Engineering A, 384, 284-298.