

ESTUDIO TEÓRICO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN SOPLADO DE PELÍCULAS. APLICACIÓN A LA MORFOLOGÍA DE MEZCLAS DE POLÍMEROS.

Robledo-Ortiz J.¹, Ramírez-Arreola D.¹, Rodrigue D.², González-Núñez R.^{1*}

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Gral. Marcelino García Barragán # 1451. Guadalajara, Jalisco, C.P.44430, MEXICO – igrobledo@yahoo.com, daniel_ig@hotmail.com,

*rubenglz@cencar.udg.mx; ²Department of Chemical Engineering, Laval University, Quebec City, Quebec, G1K 7P4 Canada deni.rodrigue@gch.ulaval.ca

Abstract- – El efecto de parámetros de post-extrusión, como la posición de la línea de enfriamiento y la fuerza de estirado, tienen una influencia sobre la morfología final de las películas sopladas de mezclas poliméricas. En el presente estudio se utilizó el sistema polietileno de baja densidad (PEBD) con poliamida-6 (PA6) a bajas concentraciones de PA6: 6% y 10%. Se estudio experimentalmente la deformación biaxial de las películas sopladas variando la posición de la línea de enfriamiento y la velocidad de los rodillos de jalado. Se realizaron mediciones del radio de la burbuja y de su curvatura (ángulo) como función de la distancia. La fuerza de estirado fue medida con un sistema de jalado que contiene un torquímetro en su diseño. Fueron realizadas simulaciones numéricas utilizando los modelos newtoniano, pseudoplástico y viscoelástico para calcular los esfuerzos normales y las dimensiones de las películas considerando el proceso no-isotérmico. Los datos experimentales de radio y curvatura de la burbuja se comportaron de acuerdo con las simulaciones solo cuando se consideró un sistema viscoelástico. Se realizó el análisis morfológico de las películas mostrando que la deformación de la fase dispersa aumenta con la relación de estirado y disminuye con la posición de la línea de enfriamiento.

Introducción

La producción de películas poliméricas es de gran importancia comercialmente. Solo en Estados Unidos 5 millones de toneladas de polietileno son convertidas en películas cada año (1). Actualmente la demanda de películas basadas en polietileno con propiedades mejoradas ha promovido el desarrollo de nuevas tecnologías involucrando co-extrusión, copolimerización y mezclas de polímeros. Las mezclas de polímeros son usadas para mejorar propiedades mecánicas, resistencia térmica y procesabilidad. Las propiedades finales dependen del tipo de polímeros, morfología de la mezcla, propiedades de interfase, composición y técnica de procesamiento (2,3). Además, la composición de las mezclas afecta las propiedades reológicas las cuales a su vez influyen en la morfología final. Estas relaciones han sido estudiadas para diferentes sistemas (4-6). El principal objetivo de este trabajo es medir y calcular las dimensiones de las películas sopladas y la fuerza de estirado como función de la línea de enfriamiento para relacionarlas con la morfología final de las películas.

Sección Experimental y Fundamento Teórico

Los materiales utilizados en este trabajo fueron Nylon 6 (3100) de Celanese y polietileno de baja densidad PX20020P de PEMEX. Se estudió la mezcla de Nylon6 / polietileno de baja densidad a las composiciones del 6 y 10 % en volumen de Nylon 6. Se obtuvieron premezclas en forma de gránulos en una extrusora de doble husillo “Leistritz Micro 26 GL/GG-36D” para después obtener las películas en un equipo Haake Rheomix 254.

Las películas se deformaron de forma biaxial utilizando una presión constante dentro de la burbuja y con diferentes relaciones de estirado (DR). Se varió la velocidad del aire de enfriamiento para modificar la línea de solidificación (Z). Las dimensiones finales de las películas obtenidas fueron medidas.

Se tomaron fotografías del proceso para determinar la posición de la línea de enfriamiento y obtener los perfiles de radio y ángulo tangente a lo largo de la deformación.

El jalado se llevó a cabo con un sistema que contiene un torquímetro en su diseño, este permite medir en línea la fuerza necesaria para realizar la deformación (7).

Durante el análisis morfológico se tomaron pequeñas muestras de las películas y fueron introducidas en nitrógeno líquido para después ser fracturadas en dirección al flujo. Se obtuvieron micrografías por medio de un microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM 5400 LV) sobre las superficies fracturadas. Tanto las imágenes del proceso como las micrografías fueron analizadas utilizando un software especial para este fin (Image-Pro Plus, de Media Cybernetic) de esta forma se pudieron medir los ejes mayor (L1) y menor (L2) de las partículas así como los perfiles de radio y ángulo.

Para la simulación de deformación de la burbuja se siguió el trabajo de S. Muke et al. (8) en el que se provee el siguiente sistema de ecuaciones considerando un fluido viscoelástico utilizando el modelo de Kelvin-Voigt:

$$r'' = \frac{[2\alpha r^2 h(1 + r'^2)^{1/2} \ln(r) + 6\beta r' + r_1(1 + r'^2)(A - 3Br^2)]}{2r^2(A + Br^2)} \quad [1]$$

$$h' = h \left[-\frac{r'}{2r} + \frac{\alpha}{4\beta} rh(1 + r'^2) \ln\left(\frac{1}{r^2 h^4}\right) - \frac{(A + Br^2)(1 + r'^2)}{4\beta} \right] \quad [2]$$

donde: r = radio; α = viscosidad; h = espesor; β = modulo; A = fuerza de estirado; B = presión. Las variables anteriores son cantidades adimensionales y se definen como:

$$r = \frac{a}{a_0} \quad h = \frac{H}{H_0} \quad A = \frac{F_z a_0}{\eta_0(T_0)Q} - B(a_f/a_0)^2 \quad B = \frac{\pi a_0^3 \Delta P}{\eta_0(T_0)Q} \quad \alpha = \frac{a_0 G_0(T)}{v_0 \eta_0(T_0)} \quad \beta = \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)}$$

donde: a = radio; a_0 = radio inicial; H = espesor; H_0 = espesor inicial; F_z = fuerza de estirado; T_0 = temperatura de extrusión; η_0 = viscosidad newtoniana evaluada a T ; Q = flujo volumétrico; ΔP = presión; G_0 = módulo elástico; v_0 = velocidad inicial; T = temperatura. En nuestro caso se utilizó un perfil de temperatura lineal para describir esta variable. A partir de [1] y [2] cuando $\alpha = 0$ y utilizando en β la viscosidad constante o el modelo de Carreau-Yasuda para describir el comportamiento reológico se obtienen los casos newtoniano y pseudoplástico respectivamente.

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos con los tres modelos predicen de manera adecuada tanto los perfiles de radio como del ángulo para la burbuja, esto es comprensible ya que el cambio en el radio obedece principalmente a la conservación de volumen. La figura 1 muestra los datos experimentales y la simulación de los perfiles de radio y ángulo para diferentes relaciones de estirado. La figura 2 muestra el perfil tridimensional del radio de la burbuja y el perfil de temperatura para un DR = 63. En el caso de la fuerza estirado, no todos los modelos nos proporcionan buenos resultados. Cuando se utilizan una ecuación constitutiva newtoniana o pseudoplástica la fuerza de estirado calculada esta subestimada con respecto a los datos experimentales, en cambio, utilizando la consideración de fluido viscoelástico es posible obtener una buena simulación de la fuerza de estirado. Sin embargo, es necesario utilizar un factor de corrección en la presión dentro de la burbuja, tal como ha sido propuesto por varios autores (8-11). La figura 3 muestra la simulación de la fuerza de estirado para las tres consideraciones reológicas y la figura 4 muestra la simulación de la fuerza del caso viscoelástico antes y después de aplicar el factor de corrección en la presión, el cual parece tener una relación lineal con la fuerza de estirado (figura 5).

Figura 1. Datos experimentales y simulaciones para los perfiles de radio y ángulo para a) DR = 19 y b) DR = 33

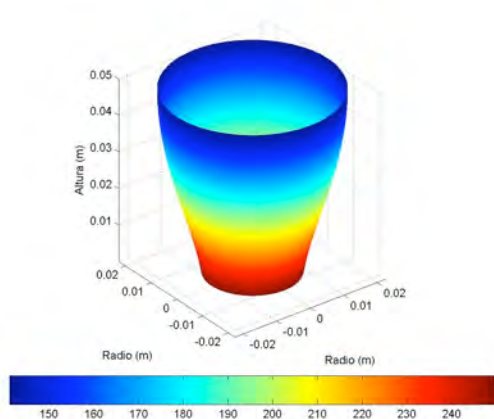


Figura 2. Perfil de radio tridimensional y perfil de temperatura para un DR = 63.

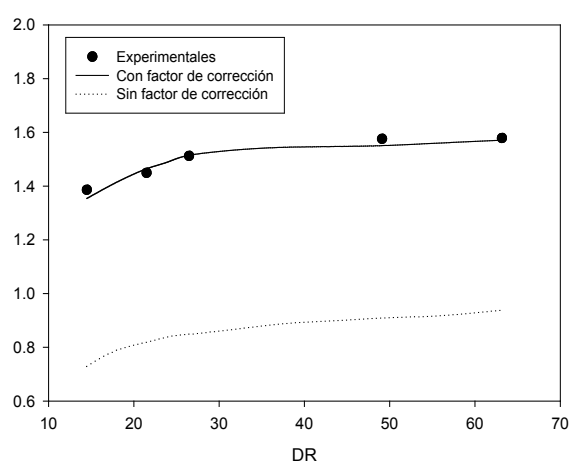


Figura 4. Fuerza de estirado (F) experimental y simulada utilizando y sin utilizar el factor de corrección para la presión dentro de la burbuja.

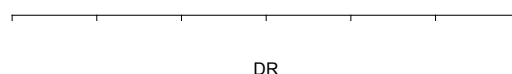


Figura 3. Fuerza de estirado (F) experimental y simulada con los diferentes modelos en función de la relación de estirado (DR).

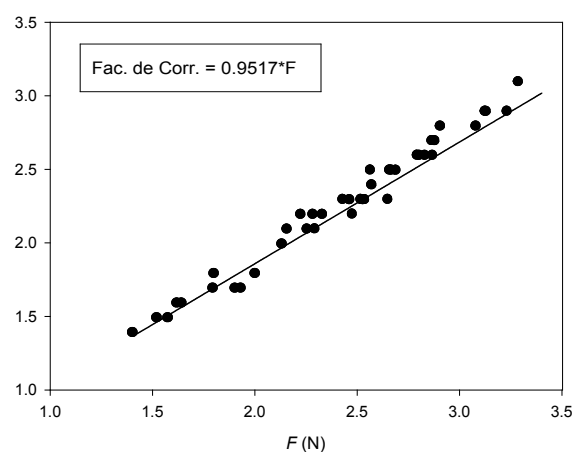


Figura 5. Factor de corrección de la presión como función de la fuerza de estirado.

Para el análisis de la deformación de las partículas esféricas se definió la relación de longitudes $L1/L2$. En las figuras 6 y 7, que son micrografías longitudinales de las películas

obtenidas con las mezclas de 6% y 10% de concentración, es claro observar que la deformación de la fase dispersa es mayor cuando la posición de la línea de enfriamiento es menor debido a que la fuerza de estirado es mayor cuando la posición de la línea de enfriamiento es menor. Este fenómeno se observa tanto a un DR = 14 como a un DR = 21. En las figuras 8 y 9 se observa la relación de longitudes para las micrografías del 6% y 10% respectivamente.

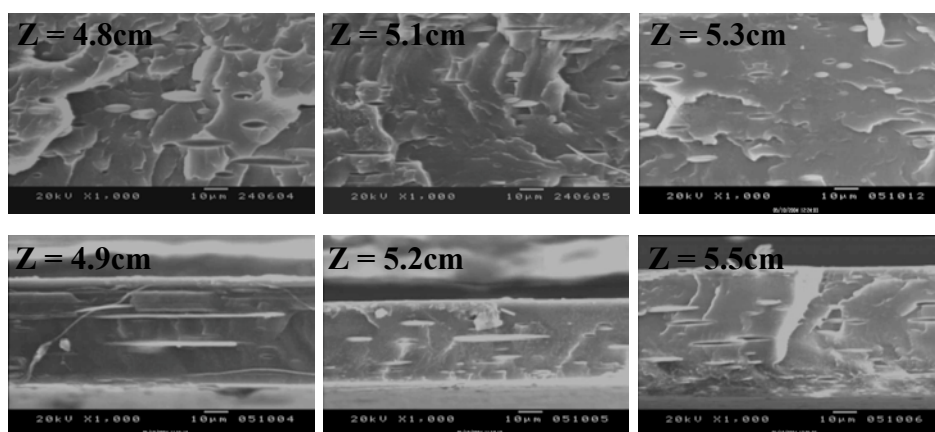


Figura 6. Micrografías longitudinales de las películas de concentración 6% a un DR = 14 (*superiores*) y a un DR = 21 (*inferiores*) a diferentes posiciones de la línea de enfriamiento.

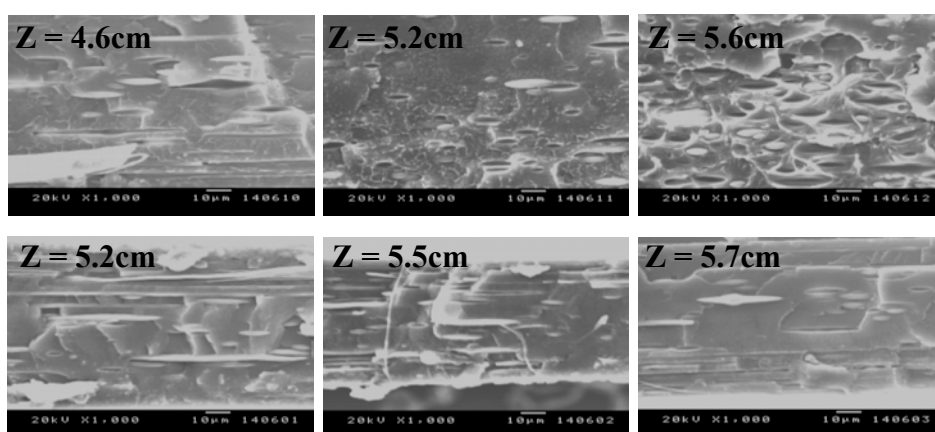


Figura 7. Micrografías longitudinales de las películas de concentración 10% a un DR = 14 (*superiores*) y a un DR = 21 (*inferiores*) a diferentes posiciones de la línea de enfriamiento.

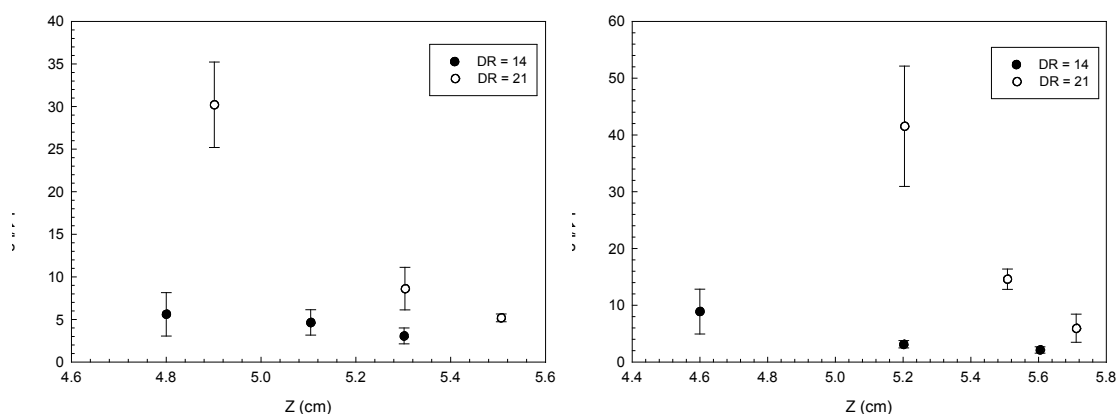


Figura 9. Relación de longitudes $L1/L2$ como función de la posición de la línea de enfriamiento de las películas de a) 6% y b) 10% PA6/PEBD para DR = 14 y DR = 21.

Conclusiones

Se logró obtener de manera experimental la fuerza de estirado durante el proceso. Esto fue posible gracias a la utilización de un torquímetro adicionado al diseño de los rodillos de jalado.

Se pudo observar que a medida que aumenta la línea de enfriamiento, la fuerza de estirado disminuye, y por el contrario cuando aumenta la relación de estirado, la fuerza de estirado aumenta también.

No se observó dependencia de la fuerza con la concentración de la fase dispersa. Esto se debe a que el estudio se realizó a bajas concentraciones y el esfuerzo es absorbido por la matriz.

Se encontró que para una misma relación de estirado la morfología de la mezcla cambia si también lo hace la distancia de enfriamiento. A menor distancia de enfriamiento, el grado de deformación es mayor debido a que el esfuerzo de estirado es también mayor.

La fuerza de estirado y las dimensiones de la película se pueden simular utilizando un modelo viscoelástico no isotérmico.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo a la Universidad de Guadalajara y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Referencias

1. J. F. Ross; J. L. M. Adams, *In The Polymeric Materials Encyclopedia*; CRC Press, 1996.
2. D. R. Paul and C.B. Bucknall, *Polymer Blends*, Wiley Interscience : New York, Vol. I & II, 1999.
3. L. A. Utracki, *Polymer Alloys and Blends: Thermodynamics and Rheology*; Hanser Publishers: New York, 1989.
4. H. K. Chuang and C. D. Han, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1985, 30, 2457.
5. R. M. Patel, T. I. Butler, K. L. Walton and G. W. Knight, *Polym. Eng. Sci.*, 1994, 34, 1506.
6. J.-T. Yeh, C.-F. Jyan, S.-S. Yang; S. Chou, *Polym. Eng. Sci.*, 1999, 39, 1952.
7. H. Padilla-Lopez; M. Vázquez; R. González-Núñez; D. Rodrigue, *Polym Eng Sci*, 43, 1646, 2003.
8. S. Muke; H. Connell; I. Sbarski; S.N. Bhattacharya, *J. Non-Newtonian Fluid. Mech.* 116, 113, 2003.
9. C.J.S. Petrie, *AIChE J.*, 21, 275, 1975.
10. B. Cao; G.A. Campbell, *AIChE J.*, 36, 420, 1990.
11. V. Sidiropoulos; J.J. Tian; J. Vlachopoulos, *TAPPI J.*, 79, 113, 1996.