

## EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE POST-EXTRUSIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS FINALES DE MEZCLAS DE POLÍMEROS

D. Ramírez Arreola<sup>a</sup>, J. Robledo Ortiz<sup>a</sup>, R. González-Núñez<sup>a\*</sup>, D. Rodrigue<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guadalajara

Blvd. Gral. Marcelino García Barragán # 1451, Guadalajara, Jalisco, 44430, MEXICO

<sup>b</sup> Department of Chemical Engineering, Université Laval, Quebec City, Qc, G1K 7P4, CANADA

**Abstract**– Mezclas de poliestireno y polietileno de alta densidad fueron elaboradas mediante extrusión de cintas, para estudiar experimentalmente el efecto que tienen las condiciones de post-extrusión en sus propiedades físicas finales. Se encontró que tanto la distancia de enfriamiento ( $X$ ) como la relación de estirado ( $DR$ ) tienen una influencia definitiva en las propiedades físicas para mezclas de 3, 6 y 9% de PS en PEAD. Los resultados muestran que la energía media de falla aumenta conforme lo hace la relación de estirado, hasta un punto crítico en donde comienza a decrecer. Lo mismo ocurre con la distancia de enfriamiento, pero el punto en donde comienza a disminuir la energía media de falla se encuentra a  $DR$  mayores. El análisis morfológico demuestra que la transición de esferas a fibras de la fase dispersa durante la post-extrusión alcanza valores críticos donde la fibra se rompe a valores elevados de  $DR$ .

### Introducción

La resistencia mecánica es un requerimiento importante en la mayoría de las aplicaciones de los plásticos. Sin embargo, el proceso de fractura de un material es un proceso complicado, el cual incluye secuencias mecánicas e interacciones térmicas dentro de la zona alrededor de la fractura, así como entre el cuerpo fracturado y su ambiente. En la mayoría de las aplicaciones de los polímeros, las consecuencias de que ocurra una fractura no son catastróficas. No obstante existe una necesidad de balancear una buena resistencia mecánica contra otros factores como el precio y el peso. Por ejemplo, una maleta necesita tener una buena resistencia a la tensión, pero también debe ser ligera y no muy cara. En este sentido, se sabe que el mezclado físico de dos o más polímeros que resulten en uno nuevo con características deseadas, se relaciona fuertemente con la morfología final de la mezcla (Favis, 1991). Morfologías con dispersiones finas son deseables para mejorar las propiedades mecánicas (Iñiguez *et al.*, 2000), mientras que las morfologías laminares aumentan las propiedades de barrera (González-Núñez *et al.*, 2001). Por esta razón, el estudio del estado final de la morfología es importante para determinar las propiedades físicas finales de las mezclas. En el presente trabajo, se realizó un análisis morfológico a profundidad para dar explicación al comportamiento de las propiedades mecánicas de las mezclas.

### Sección Experimental

Los materiales utilizados durante el presente estudio fueron poliestireno cristal HF777 de Resirene y polietileno de alta densidad 61070 fabricado por PEMEX. Con el objeto de observar la influencia de la distancia entre partículas sobre la coalescencia de las mismas se realizaron mezclas de 3, 6 y 9% en volumen de PS y PEAD. Diferentes condiciones de proceso fueron establecidas durante la extrusión. Con el fin de observar el efecto de la relación de estirado ( $DR$ ) sobre la deformación de la morfología, se varió dicho parámetro en los casos de 1.88, 3.76, 5.64, 7.53 y 9.41 a distancia de enfriamiento ( $X$ ) constante. Por el contrario, para conocer el efecto de  $X$  sobre la deformación de la fase dispersa se realizaron varias series de experimentos del caso anterior con diferentes  $X$ . La

fuerza de estirado fue medida en línea en todos los casos. Las condiciones de extrusión utilizadas fueron: temperaturas en las 8 zonas de calentamiento de 160/170/180/190/195/195/200/200, velocidad de husillos de 100 rpm y se utilizó un dado rectangular con un área de  $1.3398 \text{ cm}^2$  (ancho = 6.38 cm por espesor = 0.21 cm).

Durante el análisis morfológico se tomaron pequeñas muestras de las cintas 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. Las imágenes fueron analizadas utilizando un software especial para este fin (Image-Pro Express, de Media Cybernetic). Las pruebas de impacto realizadas en las mezclas de PS/PEAD fueron hechas en un impactador de Gardner. Los cálculos para la energía de impacto, se realizaron de acuerdo al método de resistencia al impacto utilizando la norma ASTM D 5420-96 (1996). Por último, las pruebas mecánicas de tracción se realizaron de acuerdo con el estándar ASTM D-638.

## Resultados y Discusión

En la figura 1 se presenta normalizada la energía media de falla a diferentes distancias de enfriamiento para la mezcla de 9% de PS, como una función de la relación de estirado. En ella se puede observar que la energía de falla aumenta a medida que  $DR$  se incrementa, hasta un punto en donde se aprecia una disminución sensible. Este

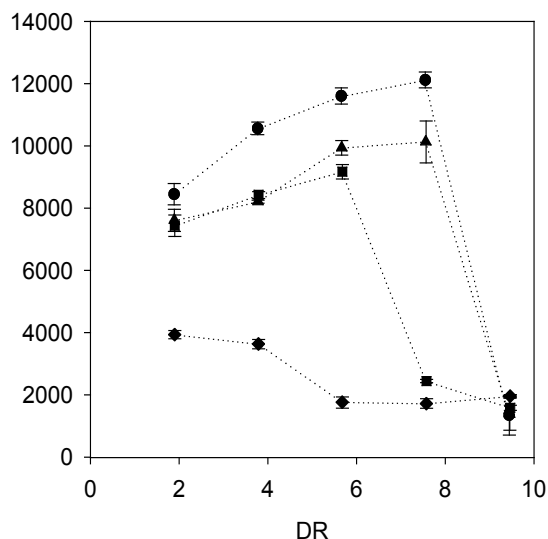


Figura 1. Energía media de falla normalizada para la mezcla de 9% de PS en PEAD como una función de la relación de estirado para las distancias de enfriamiento de 5 (Δ), 10 (▲), 15 (□) y 20 cm (●)

comportamiento (primero el aumento y luego la disminución en la energía media de falla) se atribuye a la formación de morfologías elongadas y después fibras de la fase dispersa inmersas en la matriz. Sin embargo, al seguir aumentando la relación de estirado, las fibras se rompen y por lo tanto disminuye la resistencia al impacto de la mezcla. Otro factor en la mejora de esta propiedad es la relación de estirado del material. Estudios previos (Iñiguez C. *et al.*, 2000) demostraron que para algunos sistemas la orientación previa del material promueve una mejora en propiedades mecánicas.

La figura 2, son micrografías de 9% de PS a diferentes  $DR$  y  $X$ . En ella se puede observar que a medida que se incrementa la relación de estirado aumenta la deformación de las partículas. Sin embargo a distancias de enfriamiento mayores esta deformación tiende a ser menor. También es claro que la coalescencia de partículas se presenta de una manera más nítida a distancias de enfriamiento más cortas comenzando a formar fibras. Esto se puede observar en el caso  $X=5 \text{ cm}$  y  $DR= 5.74$ . Pero al seguir deformando las cintas, estas fibras se rompen confirmando lo planteado anteriormente.

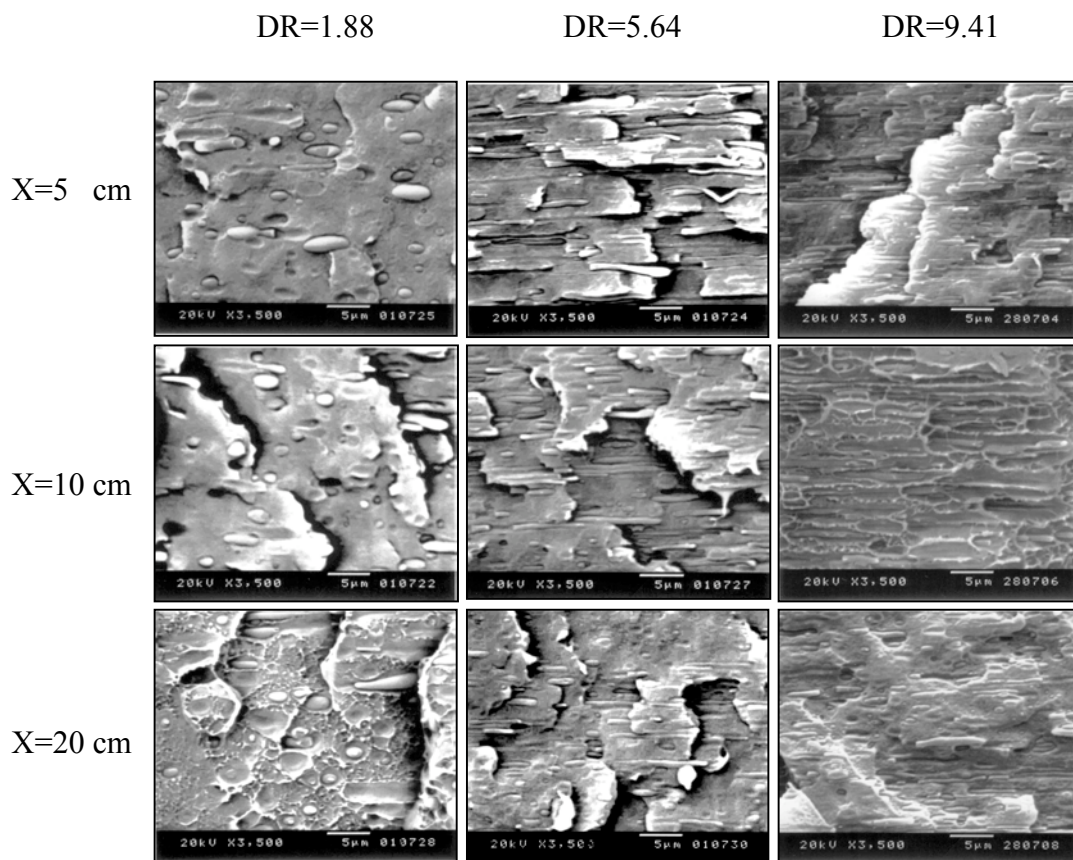


Figura 2. Micrografías para la concentración de 9% en volumen de PS en PEAD a diferentes DR y X.

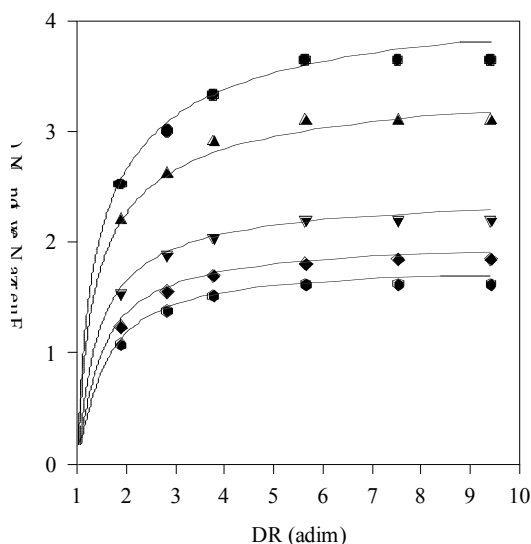


Figura 3. Fuerza de estirado experimental en función de la relación de estirado (DR) a  $X=3.5$  (○),  $X=5$  (□),  $X=10$  (△),  $X=15$  (▽), y  $X=20$  (◇) cm.

El fenómeno anterior se puede explicar fácilmente al observar la figura 3 en la que se muestra la fuerza de estirado durante la formación de las cintas como una función de  $DR$  a diferentes distancias de enfriamiento. Es lógico pensar que el esfuerzo generado durante la deformación de la cinta es transmitido de la matriz a la fase dispersa, generando así deformación en las partículas. Atendiendo lo anterior, mayor fuerza de estirado se traducirá en mayor deformación de partículas. Con respecto al comportamiento de la fuerza, es claro que esta aumenta conforme se incrementa la relación de estirado hasta llegar a un punto en el que se vuelve asintótica. No obstante, la fuerza necesaria para realizar la deformación disminuye a medida que se incrementa la distancia de enfriamiento. Estos resultados coinciden con el trabajo teórico

publicado por Padilla-López *et al.*, (2003). Otro punto importante a considerar es que la energía media de falla aumenta conforme aumenta la distancia de enfriamiento. Esto se

puede observar claramente en la figura 4, en la que se muestra este parámetro como una función de la distancia de enfriamiento para las mezclas de 3 y 6 % de PS. Es muy probable que este fenómeno se deba a la orientación previa del material, ya que a distancias de enfriamiento cortas se favorece la formación de estructuras cristalinas dentro de la matriz polimérica, volviendo más rígida y más frágil la mezcla. Se puede observar el mismo comportamiento en la figura 1 para el caso de 9 % de PS en PEAD. La figura 4 también confirma lo observado en la figura 1, ya que muestra que la energía de falla es mayor a DR mayores.



Figura 4. Energía media de falla normalizada para las mezclas de 3(a) y 6% (b) de PS en PEAD como una función de la distancia de enfriamiento para las relaciones de estirado de 1.88 (□) y 9.41 (○).

Con respecto a las pruebas de mecánicas de tracción, la tabla 1 muestra que el módulo de las mezclas de 9% de PS, disminuye conforme aumenta la distancia de enfriamiento. Esto se puede atribuir de nuevo a la rigidez del material ocasionado en este caso por la conjunción de 2 fenómenos. En primer lugar la formación de morfologías elongadas y en segundo lugar la aparición de estructuras cristalinas. Por último, en la figura 5 se observan las curvas de esfuerzo-deformación para las mezclas de 9 % en volumen con DR=1.88 y varias distancias de enfriamiento. En ellas se puede observar que tanto la elongación máxima del material como el esfuerzo máximo aumentan con la distancia de enfriamiento. Es muy probable que esto se deba a que a  $X$  mayores, la orientación previa de la matriz polimérica y de la fase dispersa es menor.

Tabla 1. Módulo, esfuerzo máximo y elongación máxima para 9% PS, en los casos límite de DR.

<b>DR=1.88</b>			
<b>X</b>	<b>Módulo</b>	<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	<b>Elongación máxima %</b>
5	691.25	19.25	616.21
10	610.76	19.72	647.88
20	506.80	25.87	1248.15
<b>DR=9.41</b>			
<b>X</b>	<b>Módulo</b>	<b>Esfuerzo máximo (Mpa)</b>	<b>Elongación máxima %</b>
5	870.80	25.51	704.69
10	686.23	20.62	982.04
20	712.94	21.29	559.76

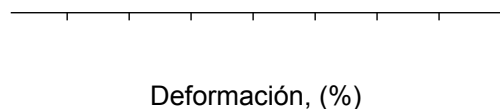


Figura 5. Esfuerzo de tensión para mezclas de 9% de PS a DR=1.88 y distancias de enfriamiento de 5 (- - -), 10 (-), 15 (····) y 20 (- · - ·) cm.

## Conclusiones

Durante el presente trabajo se realizaron estudios para entender el comportamiento y conocer las propiedades de la mezcla PS/PEAD durante la extrusión-estirado de cintas, a diferentes composiciones y condiciones de post-extrusión. Se encontró que tanto la relación de estirado como la distancia de enfriamiento tienen una influencia definitiva en las propiedades físicas finales de las mezclas.

Los resultados muestran que la energía media de falla aumenta conforme lo hace la relación de estirado, hasta un punto crítico en donde comienza a decrecer y que dicho punto crítico depende de la distancia de enfriamiento.

También se observó un aumento en la energía media de falla conforme aumenta la distancia de enfriamiento. El análisis morfológico demuestra que la transición de esferas a fibras de la fase dispersa durante la post-extrusión alcanza valores críticos donde la fibra se rompe a valores elevados de DR.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional De Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado.

## Referencias

1. B.D. Favis., *Can. J. Chem. Eng.* 1991, **69**, 619.
2. C.G. Iñiguez, E. Michel, V.M. González-Romero and R. González-Núñez, *Polym. Bull.* 2000, **45**, 295.
3. R. González-Núñez, H. Padilla, D. De Kee and B.D. Favis, *Polym. Bull.* 2001, **46**, 323.
4. H. Padilla-Lopez, M. Vázquez, R. González-Núñez, D. Rodrigue, *Polym. Eng. Sci.* 2003, **43**, 1646.