

## ESTUDIO REOLÓGICO DE LA MEZCLA HDPE/PET DE POSTCONSUMO UTILIZANDO UN COMPATIBILIZANTE

J. E. Casillas Báez, E. Michel Valdivia y R. González Núñez

*Universidad de Guadalajara, Departamento de Ingeniería Química,  
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías  
Guadalajara Jalisco, México.*

**Abstract-** Los plásticos de postconsumo representan actualmente un campo de creciente interés, ya que son materiales que pueden ser reciclados. Los envases mas comercializados en la zona metropolitana de Guadalajara son los contenedores de leche y refresco, que son de polietileno de alta densidad (PEAD) y polietilén tereftalato (PET) respectivamente.

En este estudio se analizó la reología de las mezclas con un compatibilizante y los resultados fueron discutidos en términos de la dependencia de las propiedades reológicas de las distintas mezclas PET/HDPE/Kraton con respecto a la composición y la temperatura. Las viscosidades de las mezclas fueron medidas en un reómetro capilar Rosand RH 2000. Se realizaron pruebas a cinco temperaturas: 250, 255, 260, 265 y 270°C. El tipo de prueba realizada fue definida con velocidad de corte constante.

Debido a la gran sensibilidad de la viscosidad de los polímeros tanto a la temperatura como a la velocidad de corte, se requiere una gran cantidad de datos para caracterizar el comportamiento en flujo del polímero. Las curvas reológicas pueden tener formas similares entre ellas, esta situación puede ser representada por el valor de la pendiente similar a distintas temperaturas (posiciones). Esta similaridad permitió combinar los datos de las curvas de viscosidad vs velocidad de corte en una curva maestra para este material.

### Introducción

Los plásticos de postconsumo representan actualmente un campo de creciente interés, ya que son materiales que pueden ser reciclados. Tienen un amplio potencial de aplicación, sin embargo en ocasiones, éste se ve limitado por la gran cantidad de impurezas que contienen y por sus propiedades “degradadas”. Una posibilidad para mejorar la dispersión y la adhesión de los plásticos en el reprocesamiento es mezclarlos con un compatibilizante adecuado (1).

La compatibilización puede interactuar de formas complejas para influenciar en las propiedades finales de las mezclas. Un efecto de los compatibilizantes es reducir la tensión interfacial en el fluido, causando un efecto de emulsificación y llevando a una dispersión extremadamente fina de una de las fases en otra. Otro de los principales efectos es incrementar la adhesión en la interfase (2).

Además de ser dependiente de la velocidad de corte, la viscosidad de la mayoría de los polímeros cambia con la temperatura. Una forma sencilla para relacionar la viscosidad con la velocidad de corte es el modelo empírico de la ley de la potencia (3), representado como:

$$\eta = h\dot{\gamma}^{n-1} = h\dot{\gamma}^m$$

Debido a la gran sensibilidad de la viscosidad de los polímeros tanto a la temperatura como a la velocidad de corte, se requiere una gran cantidad de datos para caracterizar el comportamiento en flujo de un polímero. De esta manera, hay una gran necesidad para predecir la viscosidad a partir de una pequeña cantidad de datos experimentales. También

existe la necesidad de comparar el comportamiento de un polímero con otros polímeros. Algunos esquemas que se describen a continuación, han sido desarrollados para hacer esto por reglas de superposición en las cuales una curva es relativamente cambiada a otra curva. La forma de curvas superpuestas de una curva sencilla, es llamada curva maestra.

Para un material dado, el factor de conversión es sólo una función de la temperatura (4). La superposición de las curvas obtenidas a distintas temperaturas en una curva de referencia, requiere saber cuánto tiene que “moverse” cada curva y cómo este cambio depende de la temperatura. La curva a una temperatura conveniente puede ser seleccionada como la curva de referencia.

El factor de cambio para un valor constante del esfuerzo de corte, puede aproximarse a:

$$a_T = \frac{\dot{\gamma}(T_0)}{\dot{\gamma}(T)} = \frac{\eta(T)}{\eta(T_0)}$$

En donde,  $T_0$  es la temperatura seleccionada como referencia.

La mayoría de los polímeros fundidos llegan a ser newtonianos a velocidades de corte muy bajas, con una viscosidad de corte  $\eta_0$ , la cual es una función de la temperatura. Las curvas viscosidad-velocidad de corte pueden ser normalizadas, primero dividiendo la viscosidad por  $\eta_0$  para obtener los valores de la viscosidad relativa  $\eta/\eta_0$ . Las curvas de viscosidad contra velocidad de corte, las cuales son obtenidas a varias temperaturas, pueden entonces ser superpuestas a una sola curva (curva maestra) si se grafica  $\log \eta/\eta_0$  contra  $\log(\dot{\gamma}\eta_0)$ . Notar que  $\dot{\gamma}\eta_0 = \tau$  es la región newtoniana. Por lo tanto, la curva maestra puede realizarse graficando  $\log \eta/\eta_0$  contra  $\log \tau$ . El efecto de la temperatura está compensado automáticamente utilizando la viscosidad relativa  $\eta/\eta_0$  en lugar de la viscosidad y reemplazando la velocidad de corte con el esfuerzo de corte  $\tau$ . Sin embargo, en algunos casos, es difícil utilizar esta técnica porque a una temperatura dada,  $\eta_0$  puede ser desconocida (5). Esto nos lleva a la búsqueda de alternativas para la elaboración de la curva maestra, como por ejemplo, los métodos numéricos.

## Sección Experimental

Fueron utilizadas seis distintas mezclas de materiales de post-consumo, poli(tereftalato de etileno) y polietileno de alta densidad. Las concentraciones de mezclado de estos plásticos fueron 10, 20 y 30% en volumen de PET, con y sin Kraton como compatibilizante. Las mezclas fueron preparadas por extrusión, utilizando un extrusor LEISTRITZ de doble husillo con sistema co-rotatorio, a una velocidad de extrusión de 100 rpm. Las temperaturas en las 9 zonas de calentamiento fueron. 185, 195, 205, 225, 235, 245, 250, 250 y 250°C.

Las viscosidades del R-HDPE, R-PET y sus mezclas en el rango de velocidades de corte  $\dot{\gamma} = (50 - 2500) \text{ s}^{-1}$  fueron realizadas utilizando el reómetro capilar Rosand RH 2000. El capilar tiene un diámetro de 1 mm y una longitud de 16 mm. Se realizaron pruebas a cinco temperaturas: 250, 255, 260, 265 y 270°C. El tipo de prueba realizada fue definida con velocidad de corte constante.

## Resultados y Discusión

En todas las composiciones de las mezclas (PETv10, PETv20 y PETv30 son y sin compatibilizante), se encontró un valor de viscosidad menor a la del HDPE reciclado y conforme se aumenta el contenido de PET en la mezcla este valor de viscosidad disminuyó, por lo tanto se puede decir que es una mezcla con un comportamiento aditivo en sus propiedades (6), así que las propiedades de la mezcla estarán entre las del HDPE y las del PET.

Los datos obtenidos en las pruebas reológicas para los materiales utilizados se presentan en las figuras 1-6, en un rango de velocidades de corte de 50 a 2000  $\text{s}^{-1}$ , este rango es usualmente en el que se realizan operaciones de procesamiento de polímeros (6,7). Además, a velocidades de corte menores a 50  $\text{s}^{-1}$ , el equipo utilizado puede presentar inestabilidad en las mediciones y está limitado para estos casos.

El comportamiento de los “polímeros base” participantes se reportan en la figura 1. El R-HDPE presenta valores de la viscosidad superiores al R-PET. Estos valores disminuyen conforme aumenta la velocidad de corte; no así los valores de R-PET que permanecen en un rango constante, es decir que la viscosidad de este último material no es afectado aparentemente por la velocidad de corte.

Se investigó el efecto del compatibilizante Kraton-1651 en la viscosidad de las distintas mezclas. Las curvas de viscosidad vs. velocidad de corte se muestra en la figura. 4. Como puede observarse, el compatibilizante produce un incremento muy ligero en la viscosidad de las mezclas con 10 y 20% de PET. Este efecto no es notorio en la mezcla con 30% de PET.

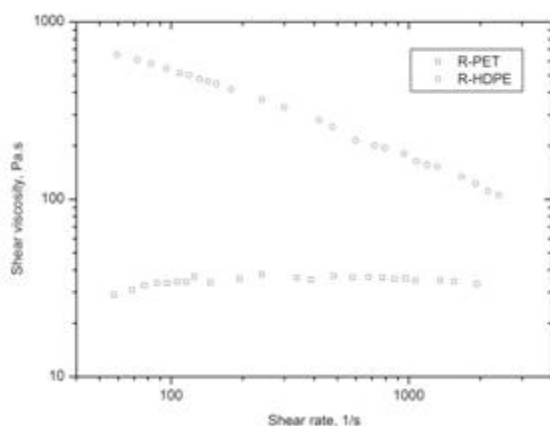


Fig. 1. Viscosidad vs. Velocidad de corte para los polímeros-base (R-PET y R-HDPE) a 265°C.

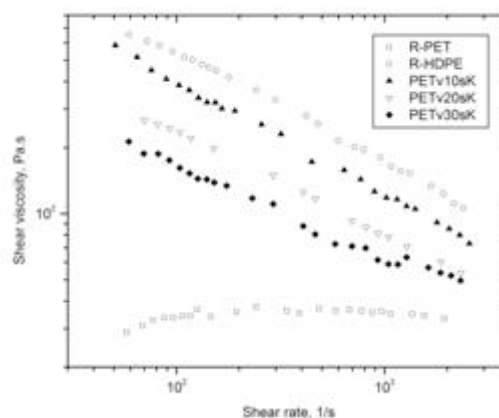


Fig. 2. Curva de flujo de las mezclas incompatibilizadas y de los polímero-base.

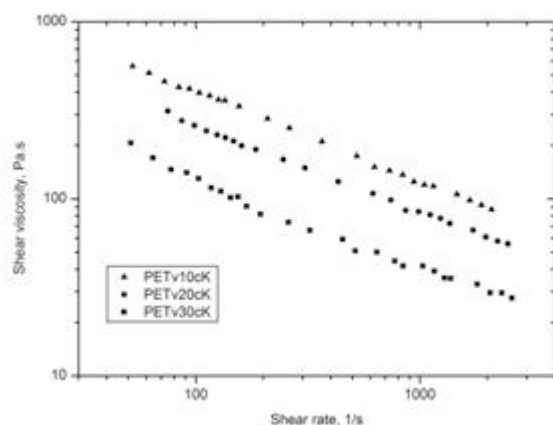


Fig. 3. Viscosidad vs. Velocidad de corte para las mezclas PET v10, PET v20 y PET v30 con compatibilizante.

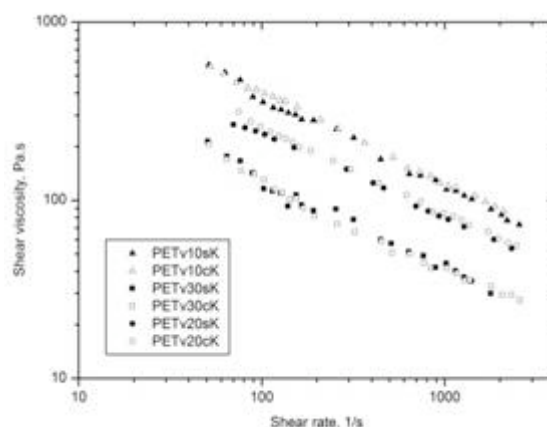


Fig. 4. Viscosidad vs. Velocidad de corte para mezclas con y sin Kraton-1651 a 265°C.

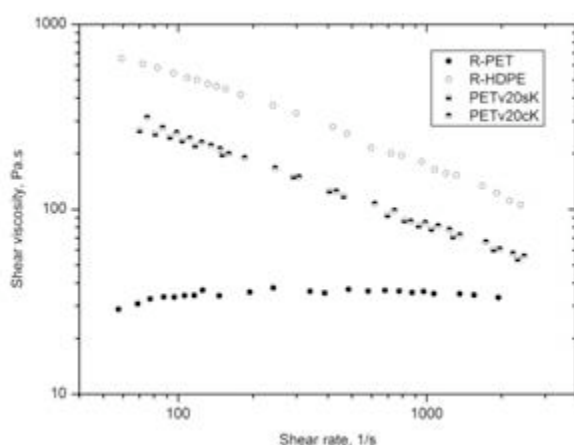


Fig. 5. Viscosidad vs. Velocidad de corte para las mezclas PETv20 con y sin compatibilizante y para los polímeros-base a 265°C

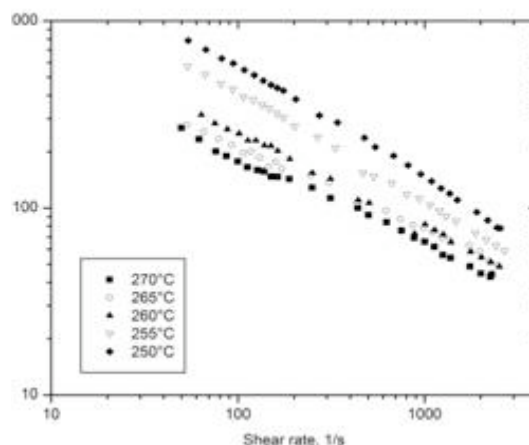


Fig. 6. Viscosidad vs. Velocidad de corte para PETv20cK a 250, 255, 260, 265 y 270°C.

Las viscosidades de corte de la mezcla PETv20cK fueron graficadas como una función de la velocidad de corte a 250, 255, 260, 265 y 270 °C en la figura 6. En coordenadas bilogarítmicas, pueden representarse las distintas curvas como líneas rectas. Las curvas para el PETv20cK aproximadamente por la ley de la potencia:

$$\eta = h \dot{\gamma}^m$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte,  $h$  y  $m$  son constantes. Los valores  $n$  de las curvas a distintas temperaturas (figura 6) se presentan en la siguiente tabla.

Temperatura, °C	$m$
250	-0,573
255	-0,575
260	-0,506
265	-0,436
270	-0,457

El PETv20sK muestra un comportamiento menos viscoelástico y más newtoniano conforme se aumenta la temperatura. Sin embargo, existe una gran similitud en los valores del exponente  $m$ , principalmente a temperaturas menores a 260 °C. Este hecho se aprovechará para el desarrollo del método de elaboración de una curva maestra utilizando mínimos cuadrados. El método consiste en obtener los factores de cambio necesarios para la elaboración de la curva maestra. Para ello, se aplicará el método de mínimos cuadrados al modelo de la ley de la potencia:

$$\eta = h_i \dot{\gamma}^{n_G}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad,  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de corte,  $h_i$  es la constante del modelo de la potencia y  $n_G$  es el exponente representativo y constante para cualquier temperatura.

Un hecho importante en el método desarrollado, es que el exponente de este modelo se considera constante, independientemente de la temperatura a la cual se haya realizado el experimento. Esta consideración permite conocer la dependencia de  $a_T$  únicamente a la temperatura, justificándose con el hecho de que las pendientes de las curvas reológicas (log-log) obtenidas son aproximadamente iguales (ver figura 6).

Si los exponentes de la ley de la potencia fueran distintos en cada una de las curvas reológicas, entonces el factor de cambio dependería también de la velocidad de corte.

Definiendo al error:

$$e_{ij} = \eta_{ij} - h_j \dot{\gamma}_{ij}^{n_G}$$

Los subíndices  $i$  y  $j$  indican datos a diferente velocidad de corte y a distinta temperatura, respectivamente.

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{d_j} e_{ij}^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{d_j} (\eta_{ij} - h_j \dot{\gamma}_{ij}^{n_G})^2 = \varepsilon$$

Los datos a 250°C fueron seleccionados como referencia. Una vez que se aplicó el método de los mínimos cuadrados con el tratamiento matemático, se obtuvieron los factores de cambio y se construyó la curva maestra que se muestra en la figura 7.

Temperatura, °C	$a_T$
250	1
255	0.502
260	0.215
265	0.177
270	0.131

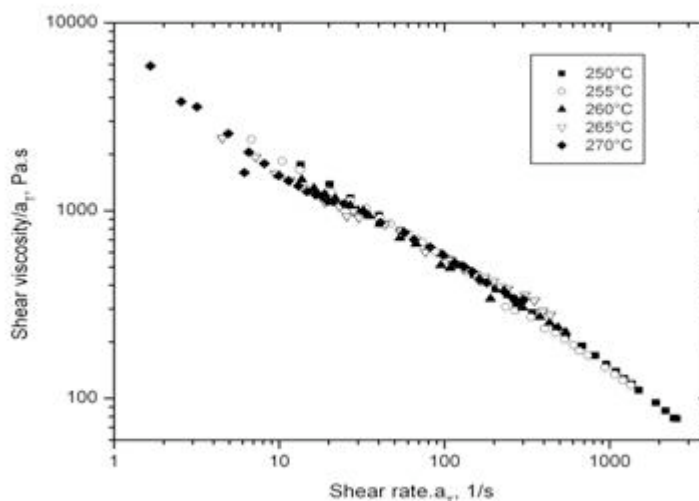


Fig. 7. Curva maestra para PETv20cK.

## Conclusiones

Se investigó el efecto del compatibilizante Kraton-1651 en la viscosidad de las distintas mezclas. Las curvas de viscosidad vs. velocidad de corte ( fig. 4).El compatibilizante produce un incremento muy ligero en la viscosidad de las mezclas con 10 y 20% de PET. Este efecto no es notorio en la mezcla con 30% de PET.

El pequeño incremento de la viscosidad cuando fue añadido el compatibilizante a las mezclas puede ser debido por la adición de un tercer componente con una alta viscosidad o por la acción compatibilizante de este tercer componente. Utilizando el modelo de potencia y un tratamiento matemático basado en las formas similares entre las pendientes a distintas temperaturas (posiciones), permitió combinar los datos de las curvas de viscosidad vs velocidad de corte y se construyó la curva maestra para este material.

## Referencias

1. A. Pawlak, M. Pluta, J. Morawiec, A. Galeski, M. Pracella, European Polymer Journal 2000, 36, 1875.
2. J.G. Bonner, P.S. Hope, Polymer Blends & Alloys pág. 47 (1993).
3. Ostwald W. (1994) *Ueber die Geschwindigkeitsfunktion der Viskosität disperser Systeme*. Kolloid-Z., 36, p. 99-117
4. N. Ganesh Kumar, Xerox Corporation, Viscosity-Molecular Weight-Temperature-Shear Rate Relationships of Polymer Melts: A Literature Review;, Webster, New York.
5. G.C. Berry, Principles, techniques and applications, Carnegie Mellon University.
6. D.R. Paul y J.W: Barlow, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Texas en Austin.
7. The Nordic Rheology Society (NRS) "Rheology Links" www.ncl.ac.uk/rheology.