

Envío: 16-02-2012

Aceptación: 02-03-2012

Publicación: 02-05-2012

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD EMPLEANDO COMO CASO PRÁCTICO EL REPROCESADO DE ABS

METHODOLOGY FOR THE CALCULATION OF VISCOSITY, USING AS A CASE STUDY ABS REPROCESSING

Miguel Ángel Peydró Rasero¹Miguel Ángel Sellés Cantó²David Juarez Varón³Francisco Parres García⁴

1. Ingeniero Técnico Industrial en Mecánica. Ingeniero de Organización Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales.
2. Ingeniero Técnico Industrial en Electrónica. Ingeniero en Organización Industrial. Doctor Ingeniero en Organización Industrial. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales.
3. Ingeniero en Organización Industrial. Doctor en Ingeniería (programa del dpto. de ingeniería Mecánica y Materiales). Universidad Politécnica de Valencia.
4. Ingeniero Técnico en Diseño Industrial. Ingeniero de Materiales. Doctor Ingeniero de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Instituto de Tecnología de Materiales.

RESUMEN

En este trabajo se explica la metodología de cálculo de la viscosidad, utilizando como caso práctico el reciclado de un Acrilonitrilo–Butadieno–Estireno (ABS). Para simular el ABS reciclado se ha reprocesado ABS virgen durante cinco ciclos a las dos temperaturas extremas de procesamiento, 220°C y 260°C. Se ha caracterizado reológicamente evaluando como cambia su propiedad con respecto al número de ciclos de proceso. Después de calcular la viscosidad, esta, se ha expresado utilizando el modelo matemático de Cross-WLF. Este modelo matemático sirve para introducir la viscosidad en los programas de análisis de simulación de inyección por ordenador (CAE: Computer Aided Engineering). Los resultados muestran que la viscosidad disminuye ligeramente conforme aumenta el número de ciclos de reprocesado.

ABSTRACT

This paper explains the methodology for calculating the viscosity, using as a case study the recycling of Acrylonitrile–Butadiene–Styrene (ABS). To simulate recycled ABS, virgin ABS was processed through 5 cycles, at extreme processing temperatures, 220°C and 260°C. The virgin ABS and the recycled ABS were rheologically characterized after the various cycles of reprocessing in order to evaluate their corresponding properties and correlate them with the number of cycles undergone. The viscosity is expressed using the mathematical model of Cross-WLF. This mathematical model is used to introduce viscosity in Computer Aided Engineering (CAE). The results show that viscosity decreases as the number of reprocessing cycles increases.

PALABRAS CLAVE

Inyección, plásticos, modelización, viscosidad, ABS.

KEY WORDS

Injection, plastics, modelization, Viscosity, ABS.

INTRODUCCIÓN

La actual crisis económica ha provocado un incremento de la competitividad de las empresas, las cuales han tenido que reducir al máximo los costes de producción, tales como precio de materias primas, reducción de residuos, optimización del proceso, etc. En el caso de las empresas transformadoras de materiales poliméricos, la crisis económica y la dependencia del precio del petróleo, han provocado que estas recurran al uso de materiales reciclados para disponer de una materia prima con precios más estables, además de obtener mayor beneficio medioambiental por la reutilización de residuos.

Uno de los condicionantes de mayor importancia a la hora de sustituir un material virgen por otro reciclado es que este último posea y presente unas características similares al material virgen. Una desventaja que poseen los termoplásticos es su variación de propiedades, no sólo por el efecto de los sucesivos procesos térmicos, sino también por efecto de su exposición a fenómenos atmosféricos^[1,2]. Esta variación de propiedades es subsanada por diversos autores mediante el uso de aditivos e incluso otros polímeros^[3,6].

Una propiedad muy importante de los polímeros es su comportamiento reológico, ya que a partir de éste se conocen los parámetros que marcan una correcta inyección o extrusión del polímero. La viscosidad real del polímero se obtiene mediante el uso de un reómetro capilar y la aplicación de las correcciones de Bagley y Rabinowitsc^[7].

El acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) es un termoplástico técnico ampliamente utilizado en diversos sectores tales como la industria del automóvil, sector eléctrico y electrónico, etc. Su principal ventaja es su buena relación entre precio y propiedades que presenta,^[2] aunque la presencia de una fase de polibutadieno conlleva ciertos problemas cuando es sometido a ciclos de procesado, bien sea por inyección o extrusión^[7,10].

El objetivo principal del presente trabajo es explicar la metodología de cálculo de la viscosidad tanto la aparente como la real. Para llevar a cabo tal objetivo se ha utilizado el estudio del proceso de degradación del ABS mediante condiciones extremas de procesado con las temperaturas límite de transformación (220°C y 260°C). Otro objetivo es explicar cómo se determinan los parámetros del modelo de Cross-WLF, para ello también se utiliza El ABS virgen y sus reprocesados.

EXPERIMENTAL

MATERIAL, MEZCLA Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

El ABS usado en este estudio es un producto comercial; ABS Terluran GP 35® (BASF, Ludwigshafen, Alemania). El proceso de degradación fue realizado con una inyectora convencional (Meteor 270/75 de Mateu & Solé® Barcelona, España) a dos temperaturas de inyección (220°C y 260°C), que son las temperaturas mínima y máxima de proceso recomendadas para el ABS. Este proceso fue repetido hasta completar 5 ciclos. Previo al proceso de inyección de cada una de estas muestras fueron secadas a 80°C durante 4 horas en un deshumidificador (MDEU1/10 de Industrial y Comercial Marse S.L.®, Barcelona España).

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

El análisis reológico de todos los materiales se ha desarrollado utilizando el reómetro capilar ThermoHaake Rheoflizer MT® de ThermoHaake (Dieselstr – Karlsruhe, Alemania). La temperatura utilizada en el reómetro han sido 260°C. Las velocidades de cizalla se han estudiado en el rango de 100 a 10000 s⁻¹. El reómetro va equipado con tres boquillas distintas, todas con 1mm de diámetro y con relaciones L/D de 10, 20 y 30. Los ensayos se han realizado siguiendo la norma ISO 11443. Los valores de viscosidad para cada boquilla corresponden a la media de cinco ensayos medidos.

METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD

VISCOSIDAD APARENTE

La reología capilar permite obtener con elevada facilidad la viscosidad aparente (η_{ap}) del polímero ensayado mediante el uso de las siguientes ecuaciones a una temperatura constante:

$$(1) \quad \eta_{ap} = \frac{\tau_{ap}}{\gamma_{ap}} \qquad (2) \quad \tau_{ap} = \frac{p \cdot D}{4 \cdot L}$$

Donde: τ_{ap} es la tensión de cizalla aparente [Pa], γ_{ap} es la velocidad de cizalla aparente [s⁻¹] ensayada en el reómetro, p es la presión del ensayo en pascuales, D el diámetro de la boquilla en milímetros y L la longitud de la boquilla en milímetros.

La viscosidad aparente se puede utilizar para comparar la evolución de esta propiedad en un material que han sido modificadas sus propiedades bien por la utilización de diferentes procesos como inyección o extrusión, o bien por la mezclas de otros polímeros o aditivos. En este estudio la viscosidad aparente se ha utilizado para el primer caso.

En la figura 1a se observa la gráfica de presiones obtenida directamente del reómetro para la boquilla de 20 mm de longitud, 1 mm de diámetro y a la temperatura de ensayo de 260°C para el material virgen y los cinco reprocesado a 220°C y en la figura 1b se observa la misma gráfica pero para el material reprocesado a la temperatura de 260°C. En ambos casos de reprocesados se puede observar un comportamiento muy similar en las presiones obtenidas. La presión disminuye ligeramente al aumentar el número de ciclos de reprocesado. Otro comportamiento observable es que las presiones obtenidas con el material reprocesado a 260°C son algo inferiores a las del material reprocesado a 220°C.

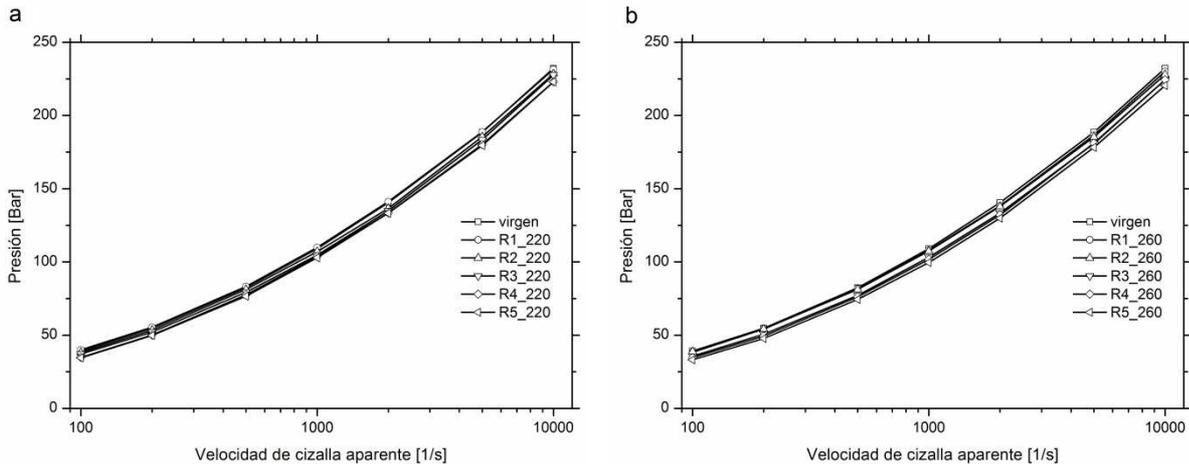


Figura 1: Presiones obtenida en el reómetro. Fuente: Elaboración propia.

Aplicando las formulas (1) y (2) a las presiones representadas en la figura 1 se obtienen las gráficas de la figura 2. En ambos casos de reprocesados se puede observar un comportamiento muy similar de la viscosidad frente a la velocidad de cizalla en el cual hay un ligero descenso de la viscosidad a medida que se incrementa el número de ciclos.

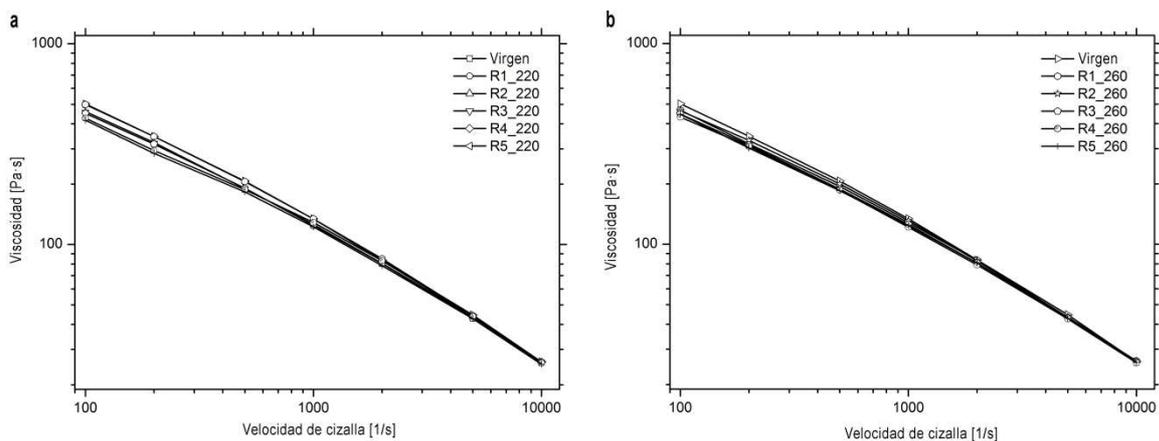


Figura 2: Viscosidad aparente del ABS reprocesado a 220°C y 260°C. Fuente: Elaboración propia.

Para poder observar las diferencias en la viscosidad entre ambos reprocesados se han extraído los datos de velocidad de cizalla bajas (100s^{-1}) y altas (5000s^{-1}), Figura 3. El estudio de la viscosidad del polímero a bajas y altas velocidades de cizalla es de elevada importancia ya que durante el proceso de inyección estas velocidades de cizalla se producen tanto en el proceso de llenado (altas velocidades de cizalla) como en la etapa de compactación (bajas velocidades de cizalla)^[7,11-13]. En la figura 3 se puede observar que el descenso de viscosidad es muy parecido para ambos reprocesados, aunque algunos de los reprocesados a 260°C están por debajo de los reprocesados a 220°C .

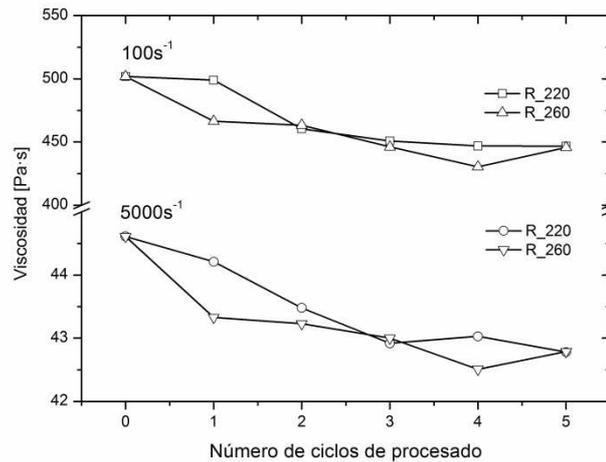


Figura 3: Viscosidad aparente a velocidad de cizalla 100s^{-1} y 5000s^{-1} . Fuente: Elaboración propia.

VISCOSIDAD REAL

En el apartado anterior se ha explicado que se puede utilizar la viscosidad aparente para comparar la evolución de esta propiedad en un material que han sido modificadas sus propiedades. Si la viscosidad se necesita como datos para realizar otros estudios, para que estos estudios sean reales, hay que utilizar la viscosidad real.

El paso del material fundido de un diámetro mayor a otro menor provoca una sobrepresión que altera ligeramente los resultados obtenidos directamente del reómetro capilar. Esta variación puede ser ajustada mediante la corrección de Bagley. Los polímeros fundidos son fluidos no newtonianos y las ecuaciones utilizadas en fluidos newtonianos para cálculo de viscosidades también deben ser ajustadas. Una de las correcciones más empleadas es la corrección de Rabinowitsch, mediante la cual es posible obtener la velocidad de cizalla real en la pared del capilar. Estas correcciones han sido utilizadas por Boronat^[7] en sus trabajos sobre reprocesado del ABS.

CORRECCIÓN DE BAGLEY

La aplicación de este método requiere del ensayo del polímero a una temperatura y en tres boquillas con una relación longitud / diámetro distintas ($L/D = 10$, $L/D = 20$, $L/D = 30$), para obtener la presión de cada boquilla a diferentes velocidades de cizalla (100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 [s^{-1}]).

En la figura 4 se puede observar las presiones obtenidas en el reómetro para las tres boquillas, para el material virgen y los reprocesados a 220°C. Para los reprocesados a 260°C las gráficas serían muy parecidas.

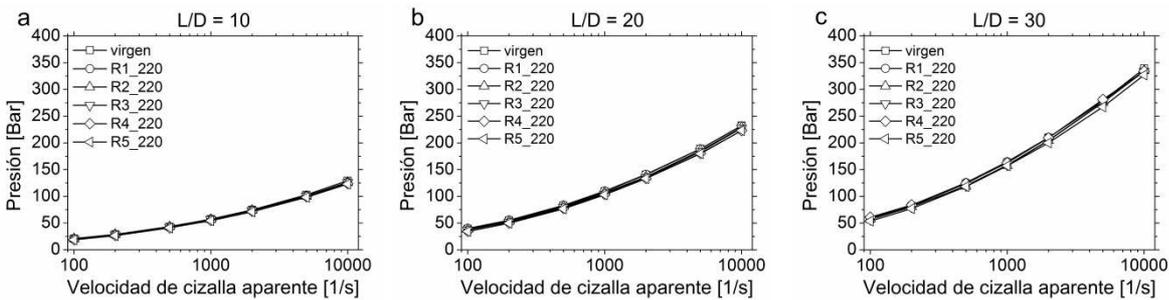


Figura 4: Presiones obtenida en el reómetro para las 3 boquillas para ABS inyectado a 220°C. Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 muestra la tendencia lineal de la presión en función de la relación L/D de las boquillas utilizadas y en la cual podemos observar el desajuste que se produce para $L/D = 0$. El método de Bagley corrige la sobrepresión relacionándola con un aumento aparente de longitud de la boquilla. Así, con la expresión (3) se calcula el esfuerzo cortante real τ [Pa], donde p es la presión obtenida por el ajuste de la recta y se utiliza la relación L/D corregida $(L/D)_c$ que es la distancia L/D en la que la presión es cero.

$$(3) \quad \tau = \frac{P}{4[(L/D) + (L/D)_c]}$$

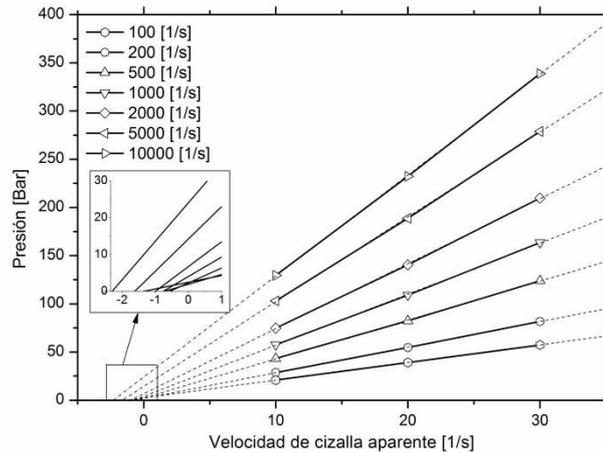


Figura 5: Corrección de Bagley: Medida de la presión como función de L/D para el mismo diámetro de boquilla y para diferentes velocidades de cizalla aparentes para el ABS virgen. Fuente: Elaboración propia.

CORRECCIÓN DE RABINOWITSC

La corrección de Rabinowitsc permite determinar la velocidad de cizalla real γ [s^{-1}] mediante la expresión (4). Para obtener los datos con mayor precisión es necesario representar gráficamente “log Esfuerzo cortante real (τ)” frente a “log Velocidad de cizalla real (γ)” (figura 6) y ajustar los puntos con la ecuación de tercer grado (5). En la expresión (4) se ha utilizado como dato del log τ , el log τ_{adjust} ajustado por la curva de la ecuación (5). En dicha figura 6 se puede comprobar que la ecuación utilizada ajusta perfectamente sobre los puntos calculados para el material virgen y la boquilla de L/D 10, Para las boquillas de L/D 20 y 30 también se ha calculado.

$$(4) \quad \gamma = \frac{\gamma_{ap}}{4} \cdot \left(3 + \frac{d \log \gamma_{ap}}{d \log \tau} \right)$$

Donde γ_{ap} [s^{-1}] es la velocidad de cizalla aparente.

$$(5) \quad y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3$$

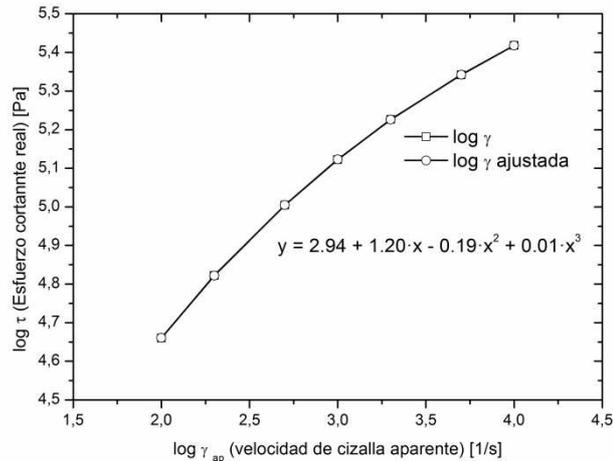


Figura 6: Corrección de Rabinowitsch para la boquilla de L/D 10 y material virgen. Fuente: Elaboración propia.

CALCULO DE LA VISCOSIDAD

La viscosidad se calcula como con el cociente entre la tensión de cizalla y velocidad de cizalla, ecuación (6). Como para el cálculo de la viscosidad se han utilizado tres boquillas, también se obtiene tres curvas de viscosidad para un material. De estas tres curvas, se obtiene una única curva como resultado final. Por ejemplo, en la figura 7a se ha representado la viscosidad de las tres boquillas del material R5 reprocesado a 260°C, y en la figura 7b aparece esta única curva. El cálculo de esta curva única se explica en el siguiente apartado.

$$(6) \quad \eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

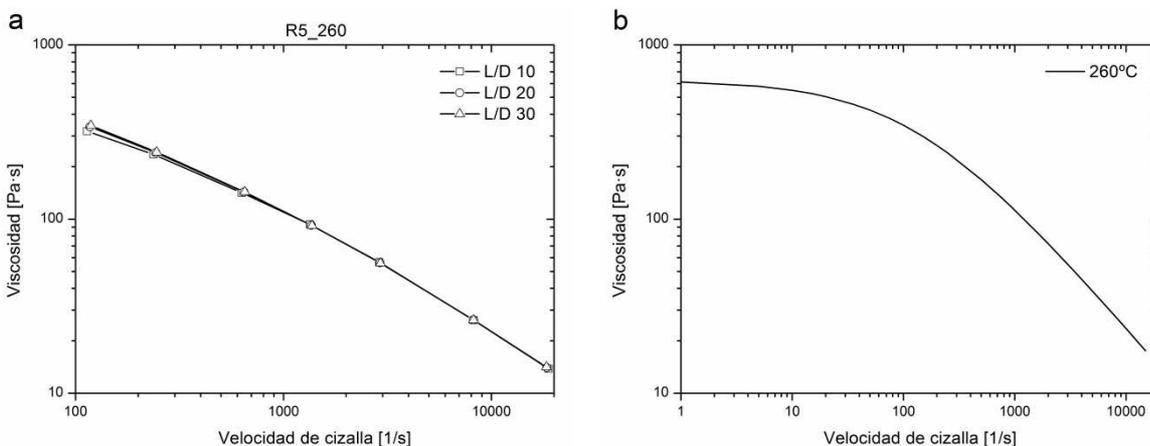


Figura 7. Viscosidad del material R5 reprocesado a 260°C. Fuente: Elaboración propia.

METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD CON EL MODELO DE CROSS-WLF

El modelo de Cross^[14], ecuación (7), ha sido elegido para evaluar la viscosidad del material ya que es el modelo más adecuado para estudiar las dos fases de llenado y compactación. Además permite calcular la viscosidad del material a cualquier temperatura partiendo de una curva de viscosidad a una temperatura dada.

$$(7) \quad \eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0}{\tau^*} \cdot \gamma \right)^{1-n}}$$

donde η_0 [Pa·s] es la viscosidad del material en condiciones de cizalla nula. τ^* [Pa] es la constante del modelo que señala la tensión de cizalla a partir de la cual se inicia el comportamiento pseudoplástico del material. n [-] es la constante del modelo que simboliza, con la forma $(1-n)$, la pendiente del comportamiento pseudoplástico del material.

Para la determinación de la viscosidad del material con velocidad de cizalla nula se ha considerado la expresión de Williams-Landel-Ferry^[15], ecuación (8).

$$(8) \quad \eta_0 = D_1 \cdot e^{\frac{-A_1(T-\tilde{T})}{A_2+(T-\tilde{T})}}, \text{ si } T \geq \tilde{T}$$

$$A_2 = \tilde{A}_2 + D_3 \cdot p$$

$$\tilde{T} = D_2 + D_3 \cdot p$$

donde \tilde{T} [K] es la temperatura de transición del material, dependiente de la presión. D_2 [K] es la constante del modelo que marca la temperatura de transición del material a presión atmosférica. D_3 [K/Pa] es la constante del modelo que simboliza la variación de la temperatura de transición del material en función de la presión. D_1 [Pas] es la constante del modelo que marca la viscosidad del material, en condiciones de cizalla nula, a la temperatura de transición del material y presión atmosférica. A_1 [-] es la constante del modelo que marca la sensibilidad de la viscosidad a cizalla nula, a la temperatura de ensayo y a la temperatura de transición vítrea. \tilde{A}_2 [K] es un parámetro del modelo que depende del tipo de material.

Los parámetros independientes del modelo de Cross son los que sólo dependen del material y se han obtenido de los datos del simulador Autodesk Molflow Insight (versión 2010)® y del DSC.

$$\tilde{A}_2 = 51.6 \text{ K.}; D_2 = T_g = 105^\circ\text{C} = 378.15 \text{ K. } D_3 = \frac{\partial T_g}{\partial p} = 0 \text{ K/Pa}$$

Los **parámetros dependientes** del modelo de Cross y por lo tanto los que hay que calcular son: n [-]; τ^* [Pa]; D_1 [Pa·s]; A_1 [-]. Para el cálculo de estos parámetros se ha utilizado el programa informático MathCad 2001[®] por interacción y partiendo de los datos de viscosidad de las tres boquillas a las dos temperaturas.

Una vez que se han obtenido los parámetros (tabla 1), se han introducido en la base de datos del Autodesk Molflow Insight (versión 2012)[®] obteniendo las gráficas de viscosidad de los materiales. En la figura 8 aparece reflejada la viscosidad real del ABS reprocesado a 220°C y 260°C.

Material	n (-)	τ^* (Pa)	D_1 (Pa·s)	D_2 (°C)	D_3 (K/Pa)	A_1 (-)	\tilde{A}_2 (K)	η_0 (Pa/s)
V	0.23493	81101	$2.33693 \cdot 10^{11}$	378.15	0	25.96	51.6	812.7
R1_220	0.24513	73057	$1.44613 \cdot 10^{11}$	378.15	0	25.10	51.6	960.2
R2_220	0.25578	67698	$7.4067 \cdot 10^{11}$	378.15	0	27.39	51.6	879.8
R3_220	0.26693	60166	$1.01513 \cdot 10^{12}$	378.15	0	27.68	51.6	971.8
R4_220	0.25071	72508	$1.9747 \cdot 10^{11}$	378.15	0	25.69	51.6	840.5
R5_220	0.25999	68512	$1.68448 \cdot 10^{11}$	378.15	0	25.46	51.6	851.7
R1_260	0.25629	71543	$5.23962 \cdot 10^{11}$	378.15	0	27.10	51.6	776.0
R2_260	0.25184	73316	$3.26807 \cdot 10^{11}$	378.15	0	26.40	51.6	818.5
R3_260	0.26261	68648	$5.61485 \cdot 10^{11}$	378.15	0	27.15	51.6	801.4
R4_260	0.27416	65688	$6.07148 \cdot 10^{11}$	378.15	0	27.35	51.6	746.7
R5_260	0.25142	82034	$3.11695 \cdot 10^{11}$	378.15	0	26.69	51.6	628.7

Tabla 1. Parámetros dependientes del modelo de Cross-WLF. Fuente: Elaboración propia.

En ambos casos de reprocesados se puede observar un comportamiento muy similar de la viscosidad frente a la velocidad de cizalla en el cual hay un ligero descenso de la viscosidad a medida que se incrementa el número de ciclos.

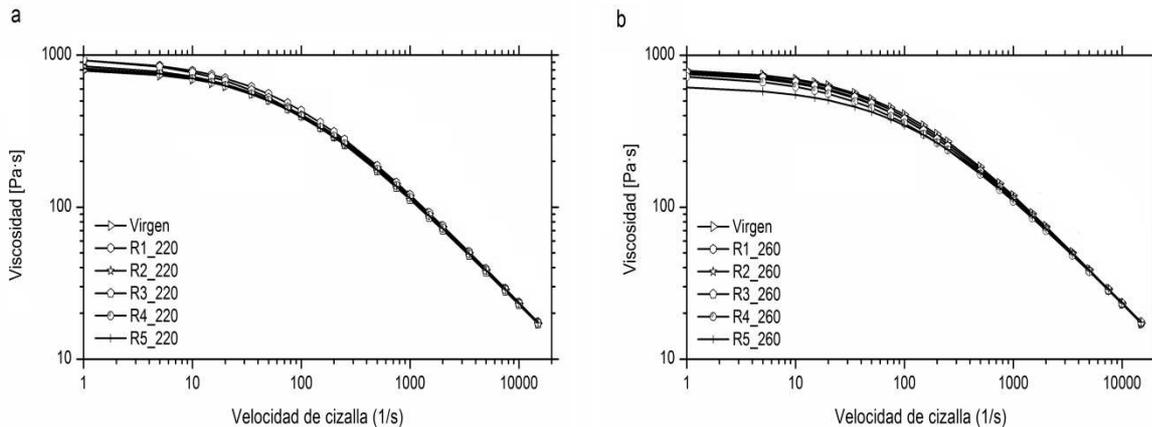


Figura 8. Viscosidad real del ABS reprocesado a 220°C y 260°C. Fuente: Elaboración propia.

De nuevo, al igual que se hizo para la viscosidad aparente, se ha realizado el estudio a velocidad de cizalla bajas (100s^{-1}) y altas (5000s^{-1}) para la viscosidad real. De esta manera se puede observar mejor las diferencias en la viscosidad entre ambos reprocesados. En la figura 9 se puede observar un descenso general de la viscosidad para la velocidad baja (100s^{-1}) para ambos reprocesados (220 y 260) en función del número de ciclos de reprocesado. Aunque para los reprocesados a 260°C es más acusado. En cambio para la velocidad de cizalla alta (5000s^{-1}) la caída de viscosidad es más suave, incluso se recupera para el cuarto y quinto reprocesado. Unos resultados parecidos ya lo obtuvieron otros autores como Boronat^[7] que observó con un ABS de viscosidad parecida al nuestro el mismo efecto, es decir, caída de la viscosidad solo a bajas velocidades de cizalla.

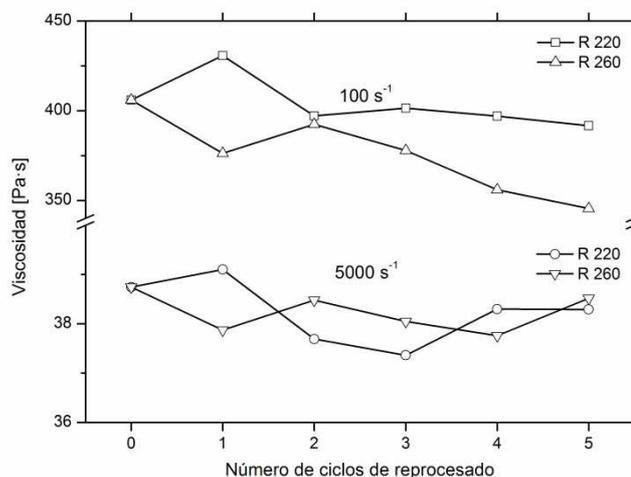


Figura 9. Viscosidad real a velocidad de cizalla 100s^{-1} y 5000s^{-1} . Fuente: Elaboración propia.

COMPARATIVA ENTE LA VISCOSIDAD APARENTE Y LA REAL

Después de haber calculado la viscosidad aparente y la viscosidad real se va a presentar una comparativa entre ellas. En la figura 9 se representa la viscosidad aparente y real del ABS virgen a la temperatura de 260°C. Se puede observar como la viscosidad aparente es mayor que la viscosidad real, exactamente un 10.1%. Por esto se puede concluir que el error cometido al usar la viscosidad aparente es de aproximadamente un 10% con respecto a la real.

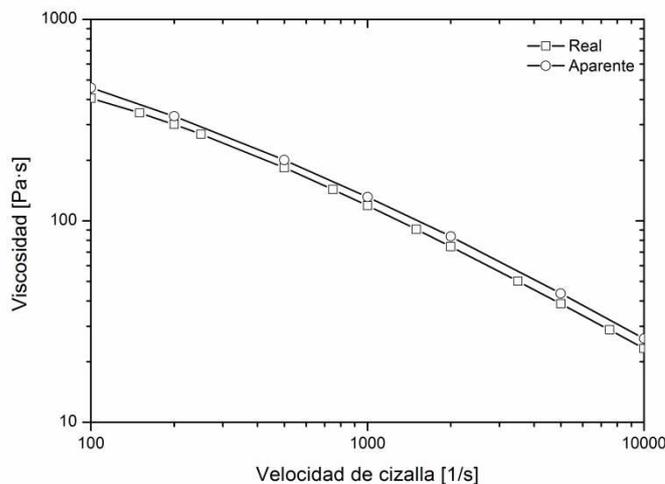


Figura 9. Viscosidad real y aparente del ABS virgen. Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se expone claramente la metodología para calcular la viscosidad aparente y la viscosidad real. Para ello se utiliza como caso práctico el reciclado de un ABS. Se ha comparado ambas viscosidades llegando a la conclusión de que la viscosidad aparente es mayor que la viscosidad real, exactamente un 10%. Por esto se puede concluir que el error cometido al usar la viscosidad aparente es de aproximadamente un 10% con respecto a la real. Además, la posibilidad de procesar los polímeros en un rango de temperaturas plantea el estudio del efecto de la temperatura cuando el polímero es sometido a un reprocesado. En este caso, el ABS reprocesado a las temperatura límite (220°C y 260°C) muestra algunas diferencias en la evolución de la propiedad evaluada. Si se observa la viscosidad aparente, aparece un descenso de esta en ambos reprocesados en función del número de ciclos de reprocesado. Sin embargo, al observar la viscosidad real, aparece un descenso de esta para las velocidades bajas (100s⁻¹) para ambos reprocesados, aunque mucho mayor para el reprocesado a 260°C y para la velocidad de cizalla alta (5000s⁻¹) la caída de viscosidad es más suave, incluso se recupera para el cuarto y quinto reprocesado. Con este estudio también se demuestra que hay diferencias en la evolución de la viscosidad según se observe la viscosidad aparente o la real.

REFERENCIAS

- [1] **Eguiazabal J I, Nazabal J.** "Reprocessing polycarbonate Acrylonitrile-Butadiene-Styrene blends - influence on physical-properties." *Polymer Engineering and Science*, Vol.30-9, p.527-531.
- [2] **Liu X D, Boldizar A, Rigdahl M, et al.** "Recycling of blends of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and polyamide." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.86-10, p.2535-2543.
- [3] **Tasdemir M.** "Properties of acrylonitrile-butadiene-styrene/polycarbonate blends with styrene-butadiene-styrene block copolymer." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.93-6, p.2521-2527.
- [4] **Tasdemir M, Karatop S.** "Effect of styrene-isopren-styrene addition on the recycled polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene polymer blends." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.101-1, p.559-566.
- [5] **Yin N A W, Zhang Y X, Zhang Y, et al.** "Preparation and properties of PC/SAN alloy modified with styrene-ethylene-butylene-styrene block copolymer." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.106-1, p.637-643.
- [6] **Li B, Wan C Y, Zhang Y, et al.** "Blends of Poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)/Polyamide 6 Toughened by Maleated Polystyrene-based Copolymers: Mechanical Properties, Morphology, and Rheology." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.115-6, p.3385-3392.
- [7] **Boronat T, Segui V J, Peydro M A, et al.** "Influence of temperature and shear rate on the rheology and processability of reprocessed ABS in injection molding process." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.209-5, p.2735-2745.
- [8] **Perez J M, Vilas J L, Laza J M, et al.** "Effect of Reprocessing and Accelerated Weathering on ABS Properties." *Journal of Polymers and the Environment*, Vol.18-1, p.71-78.
- [9] **Karahaliou E K, Tarantili P A.** "Preparation of Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)/Montmorillonite Nanocomposites and Degradation Studies During Extrusion Reprocessing." *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.113-4, p.2271-2281.
- [10] **Bai X J, Isaac D H, Smith K.** "Reprocessing acrylonitrile-butadiene-styrene plastics: Structure-property relationships." *Polymer Engineering and Science*, Vol.47-2, p.120-130.
- [11] **Salari D, Ranjbar H.** "Study on the recycling of ABS resins: Simulation of reprocessing and thermo-oxidation." *Iranian Polymer Journal*, Vol.17-8, p.599-610.
- [12] **Karahaliou E K, Tarantili P A.** "Stability of ABS Compounds Subjected to Repeated Cycles of Extrusion Processing." *Polymer Engineering and Science*, Vol.49-11, p.2269-2275.
- [13] **Navarro R, Ferrandiz S, Lopez J, et al.** "The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate." *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.195-1-3, p.110-116.

[14] **Cross M M.** "Rheology of Non-Newtonian Fluids - a New Flow Equation for Pseudoplastic Systems." *Journal of Colloid Science*, Vol.20-5, p.417-437.

[15] **Williams M L, Landel R F, Ferry J D.** "Mechanical Properties of Substances of High Molecular Weight .19. the Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids." *Journal of the American Chemical Society*, Vol.77-14, p.3701-3707.