

COMPORTAMIENTO DE MATERIALES COMPUESTOS A PARTIR DE MATRIZ POLIMÉRICA CON NANOCARGAS EN EL PROCESO DE MOLDEO POR INYECCIÓN USANDO SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Juan C. Posada^a, Jorge I. Villegas^a, Leyla Y. Jaramillo^a,
Carlos A. Vargas^a and Luis A. García^a

^a*Grupo de Materiales Avanzados y Energía, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Calle 73N
76ª- 354, Colombia, leylajaramillo@itm.edu.co, <http://www.itm.edu.co>*

Palabras clave: Nanocargas, procesabilidad, moldeo por inyección, simulación.

Resumen. Con el avance de la tecnología, la escala de tamaño en las cargas inorgánicas de los polímeros ha venido reduciéndose, llegando a la escala nanométrica. La integración de nanocargas a materiales poliméricos ha demostrado mejorar algunas de sus propiedades como la rigidez y la resistencia mecánica, sin embargo, la procesabilidad del material se ve afectada. Este estudio analiza el efecto que tiene la incorporación de nanocargas como carbonato de calcio (CaCO₃) y sílice amorfa pirogénica (Cabosil[®]), sobre la procesabilidad y el comportamiento mecánico del material. Con el fin de establecer el efecto de la cantidad de nanocargas en el material, se hacen dos tipos de análisis, uno por medio de la simulación de llenado con volúmenes finitos, para evaluar parámetros como presión de inyección, fuerza de cierre y comportamiento del fundido (aires atrapados y líneas de unión). El otro análisis experimental se realiza, para evaluar parámetros como la rigidez, elongación y Modulo de elasticidad.

1 INTRODUCCIÓN

La incorporación de cargas inorgánicas en polímeros, ha sido una práctica muy empleada en la producción de materiales poliméricos, con el propósito de mejorar el desempeño en sus diferentes propiedades. La posibilidad de emplear carga de tamaño nanométrico ha optimizado el uso de estas, manteniendo o mejorando aún las propiedades del polímero con un nivel menor de concentración de carga (Pavlidou & Papaspyrides 2008).

Son muchas las posibilidades de mejorar las propiedades de polímeros incorporando nanocargas, por citar algunos ejemplos se tienen:

- Propiedades mecánicas: Incremento en la resistencia a la flexión de compuestos de ácido poliláctico con nanotubos de carbono (Kuan et al. 2008). Incremento del módulo de tensión y resistencia a la cedencia de compuestos de poliamida 6 con nanocompuestos de silicato (Liu et al. 2003). Incremento en el módulo elástico de compuestos de polipropileno con nanotubos de carbono y sepiolita (Vargas et al. 2010).
- Propiedades eléctricas: Aumento de la conductividad eléctrica en compuestos de ácido poliláctico con fibras de carbono (LI et al. 2013; Kuan et al. 2008).
- Propiedades térmicas: Alta resistencia al calor en compuestos de ácido poliláctico con nanotubos de carbono (LI et al. 2013). Incremento en la resistencia térmica de compuestos de polipropileno con nanotubos de carbono y sepiolita (Vargas et al. 2010).
- Propiedades electromagnéticas: Compuesto de Polimetileno Terephthalato con nanotubos de carbono como blindaje en interferencias electromagnéticas (Gupta & Choudhary 2011).
- Aplicaciones de bionanocompuestos en aplicaciones de empaques, bienes de consumo duradero, electrónica y biomédica (Reddy et al. 2013).

La obtención y verificación de propiedades de estos polímeros con nano cargas es un primer paso. Sin embargo, por lo general este compuesto debe transformarse en un artículo o pieza requerido para la aplicación específica. En esta etapa debe tenerse en cuenta otro factor importante relacionado con su procesabilidad, ya que el proceso de transformación de polímeros en muchos casos requiere aportar calor para hacer fluir el material en un molde o generar una reacción química para conformar el producto final. En esta situación específica, la incorporación de nanocargas puede afectar la procesabilidad del material e incluso las propiedades finales. Estudios hechos en nanocompuestos de poliestireno para mejorar la conductividad eléctrica del material, muestran que esta propiedad se ve afectada al conformar el material por moldeo de compresión incrementando la temperatura y el tiempo de compresión (Grossiord et al. 2008). En polímeros termoplásticos, donde se debe fundir el material para hacerlo fluir en un molde que conforma el producto final, la reología del polímero es fundamental. (Lee et al. 2008) muestran ejemplo de ello al evaluar polipropileno con diferentes concentraciones de nanotubos de carbono, donde al incrementar la concentración de nanotubos se incrementa la conductividad eléctrica, pero se ve incrementada la viscosidad del polipropileno y este tiende a comportarse más como un material elástico. El proceso de cristalización de un polímero puede verse afectado por la incorporación de nanocargas, (Xu et al. 2011) realiza un estudio donde muestra un incremento de la rata de cristalización y la temperatura de cristalización al incorporar nanocargas de tubos de carbón.

Uno de los procesos de transformación más empleados en la industria de polímeros es la

inyección. Este proceso se ha empleado también para realizar diversas validaciones de la procesabilidad de polímeros con nanocargas. La poliamida 6, polímero muy empleado para reforzarse con nanocargas, dispone de varios estudios que reflejan el efecto del procesamiento por moldeo de inyección en el polímero (Konishi & Cakmak 2005; Seltzer et al. 2009; Uribe-Arocha et al. 2003; Yalcin & Cakmak 2004). Un estudio hecho con un compuesto de polimetil metacrilato y nanocargas muestra una novedosa combinación del proceso de inyección y extrusión de lámina delgada, con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas del material (Lee et al. 2006). Un estudio muy detallado del efecto de las condiciones del proceso de inyección en la resistividad eléctrica que le confiere la incorporación de nanocargas en polímeros es presentado por (Tiusanen et al. 2012). Este estudio muestra que la resistividad eléctrica en la piel solidificada durante el llenado de la pieza inyectada es mayor, causado por el efecto de cizalladura en el proceso, siendo la temperatura y velocidad de inyección, así como la temperatura del molde variables críticas en el procesamiento.

Con los avances en la simulación de procesos, ahora es posible predecir la inyección de piezas poliméricas desde un computador. Por medio de estas herramientas de cómputo, es posible optimizar el proceso de inyección previo a una puesta a punto real de un producto a inyectar. Se tiene la capacidad de realizar análisis de diseños de experimentos para optimizar variables como presión de inyección, fuerza de cierre, tiempos de ciclo, reducciones de contracciones y deformaciones típicas en piezas inyectadas, entre otros (Shen et al. 2007; Ozcelik et al. 2010; Kang et al. 2010; Ilinca et al. 2005; En Otmani et al. 2011; Zhu & Wang 2010), relaciona las variables críticas que afectan la calidad y propiedades del producto final inyectado.

Partiendo de la base que un material polimérico modificado con nanocargas, para mejorar sus propiedades, es indispensable transformarlo en una pieza para una aplicación específica, es fundamental validar el proceso de transformación, su viabilidad y como afecta estas las propiedades del producto fabricado. El presente trabajo presenta un estudio que evalúa dos tipos de nanocargas (CaCo₃ y Cabosil) en un polietileno de baja densidad. Se evalúa la procesabilidad empleando un software de volúmenes finitos y las propiedades mecánicas midiendo parámetros de rigidez y el esfuerzo máximo de cedencia.

2 EXPERIMENTOS

2.1 Mezclas

Para la evaluación de las cargas, se tomó como matriz un Polietileno de baja densidad (PEBD), como carga se utilizaron un carbonato de calcio (CaCo₃) y sílice amorfa pirogénica (Cabosil[®]), como se muestra en la Tabla 1.

Mezcla N	1	2	3	4	5
Compuesto (%)					
PEBD	90	93	90	93	100
CaCo ₃	5	2	0	0	0
Cabosil [®]	0	0	5	2	0
Anhídrido Maleico	5	5	5	5	0

Tabla 1, Formulaciones Mezclas

2.2 Preparación de mezclas:

Para la realización de las mezclas se utilizó un mezclador interno Haake Rheodrive 7 PolyLab OS equipado con rotores tipo Roller, con una temperatura controlada de 190 °C, usando una velocidad de 60 rpm durante 7 minutos, con el siguiente orden de incorporación primera fase incorporación del polietileno de baja densidad (PEBD), segunda fase incorporación anhídrido maleico, tercera fase incorporación de la carga, según Norma ASTM D3182 – 2007. Se utilizó una inyectora de laboratorio a con una capacidad de plastificación de 45 cm³, a una temperatura de 190 °C, con una presión de inyección de 75 bar, para la obtención de probetas para los diferentes ensayos,

2.3 Caracterización de mezclas:

Para los resultados de tensión, esfuerzo bajo tensión y elongación bajo tensión se utilizó, una maquina universal de ensayos marca Shimadzu, con una velocidad de ensayo de 50 mm/min, los ensayos se realizaron bajo temperatura ambiente controlada de 23±2 °C Según condiciones de la ASTM D 638.

En la obtención de la viscosidad en función de la rata de cizalladura se utilizó un reómetro rotacional AR 2000, bajo el método estándar ASTM D4440 y un reómetro capilar de alta presión Rheograph 2002 Göettfert bajo el método estándar ASTM D 3835. Las condiciones utilizadas en el ensayo de reometría rotacional y reometría capilar de alta presión se describen en la Tabla.2.

Condiciones de ensayo	Reometría rotacional	Reometría capilar de alta presión
Temperatura de medición (°C)	190,200,220	190,200,220
Geometría	Plato-Plato	N/A
Frecuencia (Hz)	0,1-100	N/A
Diámetro del piston (mm)	N/A	12
Diámetro de los capilares (mm)	N/A	1
Longitud de los capilares (mm)	N/A	10, 20, 25

Tabla. 2. Especificaciones análisis de la reometría

Los parámetros de inyección al interior de un molde de inyección se obtuvieron usando un programa de simulación profesional CAE CoreTech System Co, Ltd. MOLDEX 3D.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efecto de la rata de cizalladura sobre la viscosidad

Las curvas de viscosidad para el material polimérico, polietileno de baja densidad se pueden observar en la Figura. 1.

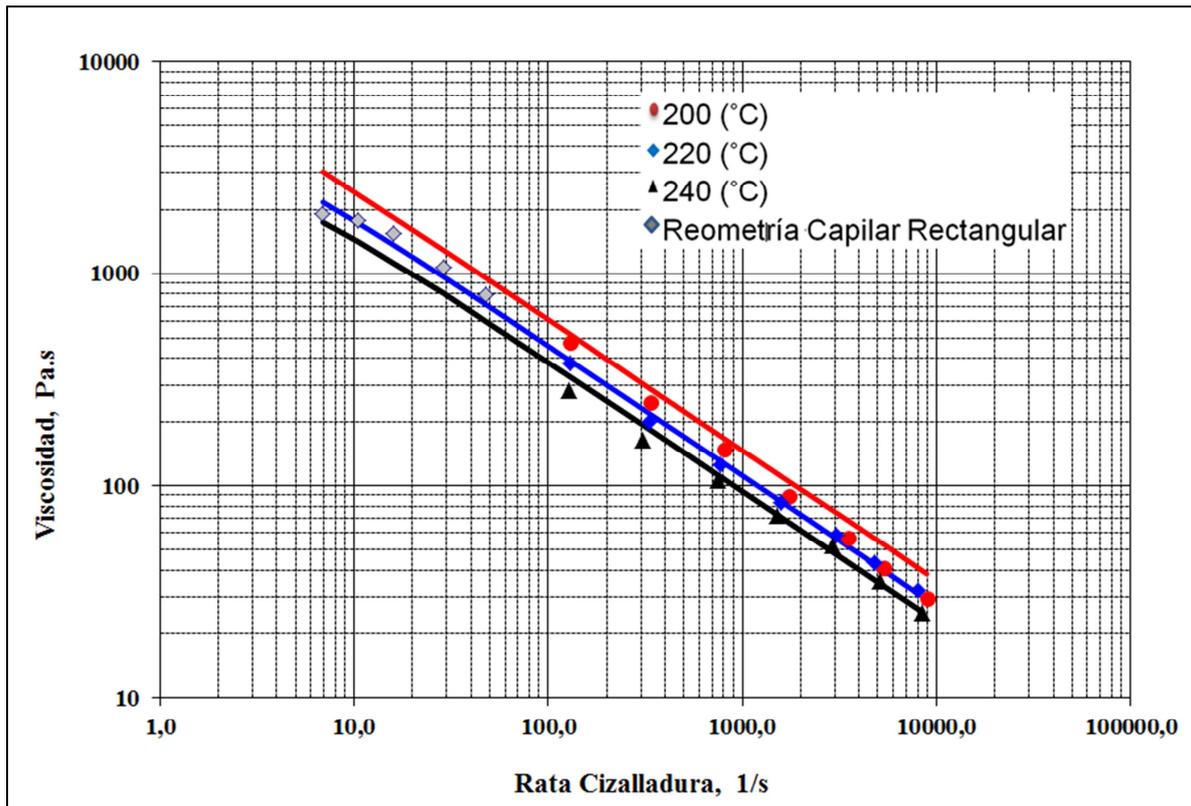


Figura.1. Efecto de la Rata de Cizalladura sobre la Viscosidad para el PEBD.

Para la muestra de polietileno de baja densidad (PEBD), se observaron anomalías de fundido a medida que se aumentaba la velocidad del pistón (En el reómetro capilar el aumento en la velocidad del pistón descrito en la Tabla 2, está relacionada con el aumento de la rata de cizalladura e industrialmente se puede asociar con el aumento en la velocidad de la extrusora).

Los valores de esfuerzo de corte críticos aparentes, en los cuales puede ser procesado el PEBD sin presentar anomalías de flujo, se presentan en la Tabla 3.

	Esfuerzo de corte crítico	Rata de cizalladura crítica aparente
	τ_{crit} kPa	$\gamma_{app\ crit}$ s ⁻¹
PEBD	456	5760

Tabla 3. Esfuerzo de corte velocidad de cizalladura críticos

3.2 Modelo de Carreau-Arrhenius

En los fluidos no newtonianos la viscosidad es una función de la presión, de la temperatura y del estado de cizalladura (el estado de cizalladura está asociado a la rata de cizalladura o al esfuerzo de corte). Generalmente no se tiene en cuenta la influencia de la presión sobre la viscosidad, debido a la dificultad experimental para su determinación.

Observaciones de curvas de viscosidad, obtenidas a partir de datos experimentales para una gran cantidad de polímeros, han permitido comprobar que la variación de la viscosidad con la temperatura es más acentuada a bajas ratas de cizalladura y que la forma de la curva no cambia a medida que se varía la temperatura.

Teniendo en cuenta lo anterior se encontró que por medio de un ajuste estadístico de los datos se puede obtener una curva de viscosidad llamada Curva Master de Viscosidad que al ser trasladada representa las curvas a diferentes temperaturas. En otras palabras la curva obtenida por medio de este procedimiento permite encontrar la viscosidad, dada la rata de cizalladura, a una temperatura elegida si previamente se ha hallado el valor del desplazamiento de la curva denominado Factor de Desplazamiento Térmico a_T .

La expresión para hallar a_T varía de acuerdo a la estructura cristalina del material. Para materiales semicristalinos, como el polietileno o el polipropileno, se puede obtener este parámetro a partir de la Ley de Arrhenius. La expresión finalmente obtenida se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Lna}_t = \frac{u}{R} \left(\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_{\text{ref}}} \right) \quad (1)$$

Dónde: U: Es la energía de activación, J/mol
 R: Constante universal de los gases, 8.314 J/(mol°K)
 T_M : Temperatura de la masa fundida, °K,
 T_{ref} : Temperatura de referencia obtenida al correlacionar los datos °K,

Una vez encontrado el valor de a_T se puede hallar la viscosidad a una rata de cizalladura definida. En el caso que la temperatura de la masa T_M sea igual a la temperatura de referencia T_{ref} el valor de a_t es 1.

$$\eta = \frac{a_t A}{(1 + a_t B \gamma)^C} \quad (2)$$

Dónde: η : viscosidad, Pa.s
 γ : rata de cizalladura, s-1
 a_T : Factor de desplazamiento por la temperatura.
 A: Valor obtenido a partir de un ajuste estadístico, Pas
 B: Valor obtenido a partir de un ajuste estadístico, s
 C: Constante obtenida a partir de un ajuste estadístico

$$\gamma = \frac{\left(\frac{a_t A}{\eta} \right)^{1/C} - 1}{a_t B} \quad (3)$$

En la Tabla 4 se muestra un resumen de los parámetros de los modelos.

Modelo Carreau-Arrhenius						
Parámetro	A, Pa.s	B, s	C	U, J/mol	Tref., °C	Error, %
Resultado	1832,51	0,009981	0,759595	27147,4120	220	3,5

Tabla 4. Modelo Carreau-Arrhenius

En cuanto a los valores de los parámetros encontrados para el modelo de Carreau-Arrhenius

se puede decir que:

El valor de A está asociado con la viscosidad nula que a su vez se asocia con el peso molecular promedio.

El parámetro B en la ecuación de arrhenius se asocia con el valor de la rata de cizalladura donde se da la transición entre el comportamiento Newtoniano y la zona del comportamiento no Newtoniano.

El valor de C está relacionado con la pendiente de la curva en la región de adelgazamiento, es decir a altas ratas de cizalladura.

3.3 Modelo de Ley de potencias

El modelo de Ostwald y de Waele, también conocido como el modelo de ley de potencias es uno de los más sencillos. Debido a la facilidad en su uso se utiliza ampliamente para realizar estimados de las propiedades de flujo, sobre todo para la zona de comportamiento seudoplástico.

$$\eta = \phi \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

Dónde:

- $\eta(\dot{\gamma})$ viscosidad que varía con la rata de cizalladura, Pa.s
- $\dot{\gamma}$ rata de cizalladura, s⁻¹
- ϕ factor de consistencia, Pa.sn
- n Índice de la ley de potencias, adimensional. n = 1/m

En la ecuación 4 si n=1 la expresión se transforma en la ley de viscosidad de Newton, siendo k=η. La desviación de n de la unidad se toma como una medida del comportamiento no newtoniano. En los polímeros n tienen un valor entre 0.2 y 0.7. Para valores de n mayores que 1 se dice que el fluido es dilatante.

Para la ecuación 3 si la rata de cizalladura es muy baja la viscosidad es demasiado alta, lo cual está en desacuerdo con las observaciones realizadas, en las que se ha comprobado que los polímeros tienen una viscosidad constante para bajas ratas de cizalladura. No obstante la ecuación de ley de potencias es muy utilizada aunque su uso se restringe a la zona de comportamiento no newtoniano.

3.4 Resistencia a la tensión

En los resultados de tensión, se observa que la carga reforzante de CaCo₃, produce un incremento del orden del 35% y el 24% para las mezclas N-1, y N-2 respectivamente. Para la carga de Cabosil se evidenció un incremento del orden del 26 % para la mezcla N-3 y del 2% para la mezcla N-4 al ser comparados con el material original PEBD Mezcla N-5, ver Figura. 2.

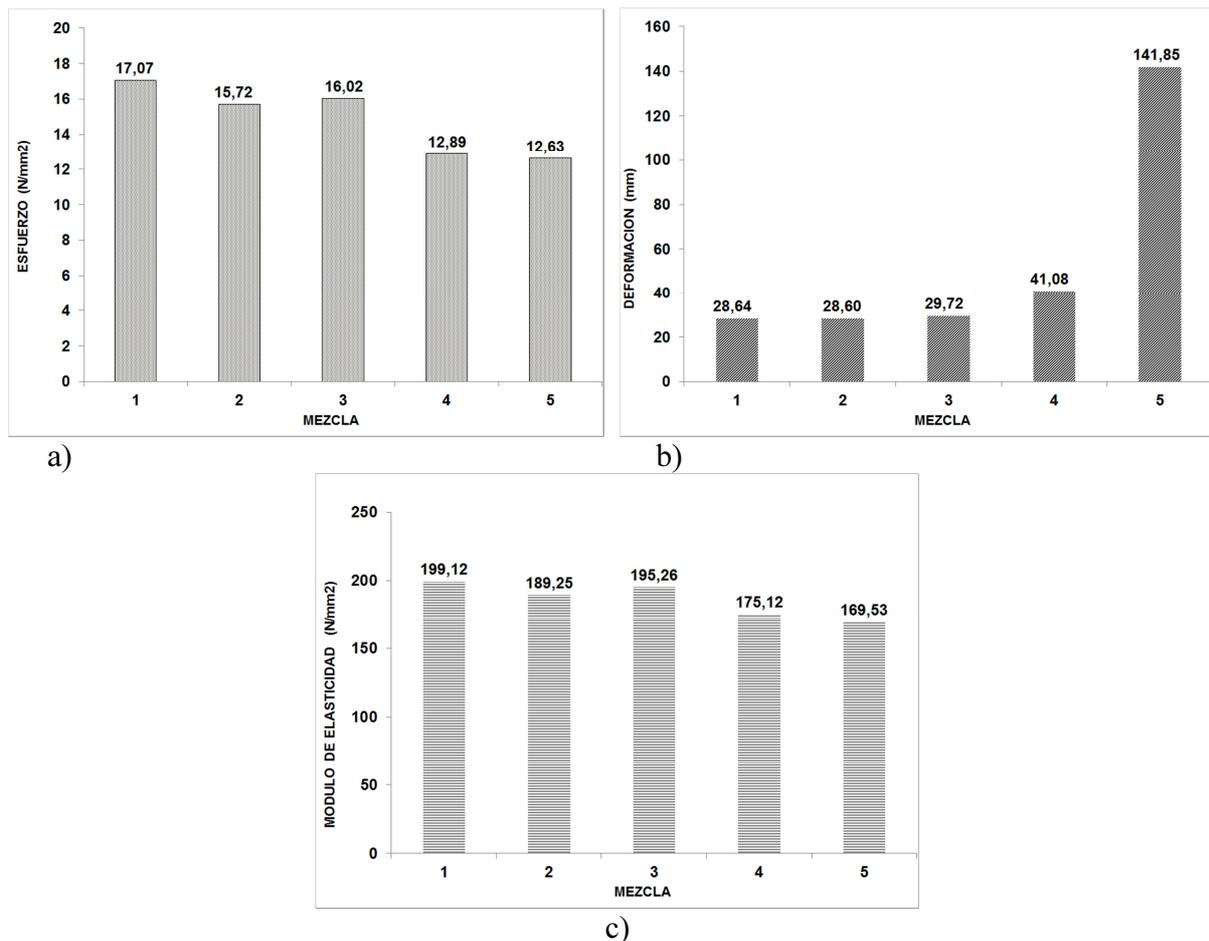


Figura.2. Propiedades Mecánicas del PEBD sin cargas, PEBD con CaCO₃ y PEBD con Cabosil.

a) Esfuerzo bajo tensión, b) deformación bajo tensión, c) Módulo de elasticidad.

El diámetro de la partícula de la carga, está directamente relacionado con el área superficial, al tener un menor diámetro esta otorga mayor área superficial en matriz polimérica.

El aumento en la tensión se ve afectado por el incremento del área superficial, al aumentar proporcionalmente aumenta la resistencia a la tensión.

El efecto causado por las cargas de CaCO₃ y Cabosil, en las mezclas N-1, 2, 3 y 4 en la deformación de la resistencia bajo tensión en comparación con el PEBD, se observa una disminución entre un 71% al 79%, como se observa en la Figura.2.

Para efectos del módulo de elasticidad se observa un incremento para las mezclas N-1 y 2 del 17% y el 11% respectivamente y para las Mezclas N-3 y 4 un incremento del 15% y el 3%

El aumento de la presencia de cargas, causa un aumento en la resistencia a la deformación, y en el módulo de elasticidad, debido al aumento de la rigidez (Osswald 2010).

3.5 Modelo matemático y suposiciones en la modelación del llenado del molde.

En el proceso de llenado de molde se asume tanto el polímero fundido viscoso como el aire como fluidos poco compresibles. El polímero fundido se aproxima a un fluido newtoniano generalizado, por lo tanto, el movimiento de flujo no isotérmico en 3D puede ser descrito matemáticamente como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u - \sigma) &= \rho g \\ \sigma &= -pI + \eta(\nabla u + \nabla u^T) \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \nabla T \right) &= \nabla(k \nabla T) + \eta \dot{\gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

Dónde: u = vector de velocidad, T = temperatura, t = tiempo, p = presión, σ = tensor total de esfuerzos, ρ = densidad, η = viscosidad, k = conductividad térmica, C_p = calor específico, y $\dot{\gamma}$ = velocidad de cizalladura.

La ecuación constitutiva para la viscosidad de los polímeros puede describirse a través del modelo de Cross modificado y con una corrección por temperatura tipo Arrhenius como se muestra a continuación:

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \quad (6)$$

Dónde:

$$\eta_0(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right)$$

Donde n = índice de ley de potencias, η_0 = viscosidad nula, τ^* = parámetro de transición entre la zona newtoniana y no newtoniana de la viscosidad. Una función de fracción de volumen f es introducida para el seguimiento del avance del frente de flujo. Aquí $f=0$ es definida como la fase del aire, $f=1$ como la fase del polímero fundido, por lo tanto el frente de flujo de polímero fundido se encuentra localizado en las celdas con un valor $0 < f < 1$. El avance en el tiempo es gobernado por la siguiente ecuación de transporte:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla \cdot (uf) = 0 \quad (7)$$

3.6 Conservación de la masa.

La ley de la conservación de la masa puede expresarse como se indica a continuación:

$$\nabla \cdot (uf) = 0$$

Donde u = vector de velocidad.

En un molde de inyección se pueden emplear coordenadas cartesianas expresado como:

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

3.7 Conservación de la cantidad de movimiento:

Según la ley de conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento total del fluido dentro de cierto volumen de control se incrementará debido a una influencia neta de cantidad de movimiento a través de la superficie límite y la fuerza externa de gravedad actuando sobre el fluido. Lo cual puede expresarse como:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p - \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (9)$$

Donde $\rho \frac{Du}{Dt}$ es la masa por unidad de volumen multiplicada por la aceleración. Esto es el

efecto de inercia. Cuando el fluido está en estado estable e inercia cero y despreciando el efecto gravitacional la anterior ecuación puede simplificarse como:

$$\nabla \cdot \tau = -\nabla p \quad (10)$$

La cual es conocida como la ecuación de Stokes. Esta ecuación es comúnmente utilizada en paquetes de software de análisis de llenado 3D. Además, basado en esta suposición, la ecuación de cantidad de movimiento puede ser simplificada como:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0; \text{ Componente en } x \quad (11)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial y}{\partial z} \right) = 0; \text{ Componente en } y$$

Aplicando la condición de incompresibilidad e introduciendo los componentes de velocidad promedio $\bar{u} = -S \partial p / \partial x$, $\bar{v} = -S \partial p / \partial y$ se puede expresar como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 0 \quad (12)$$

Donde $S = \int_0^h z^2 / \eta dz$ y h la mitad del espesor.

3.8 Conservación de la energía:

Como en la mayoría de aplicaciones de ingeniería, es conveniente tener esta relación en términos de la temperatura del fluido y la capacidad calorífica. Por lo tanto puede ser expresada como:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \nabla (k \nabla T) + \Phi \quad (13)$$

Donde $\Phi = \eta \dot{\gamma}^2 + \Delta \dot{H}$, el primer término $\eta \dot{\gamma}^2$ es el efecto de disipación viscosa, los restantes se refieren a términos de reacción y otros efectos.

3.9 Simulación de llenado de moldes de inyección empleando materiales con y sin nanocargas.

Para simular el llenado de moldes de inyección de materiales termoplásticos, la propiedad fundamental que influye en el proceso es la viscosidad. En la Figura. 3 se indican las curvas de viscosidad de los diferentes materiales evaluados con y sin carga.

Para efectos de la simulación, se realizó el análisis comparativo para un bio material como es el Ácido Poliláctico (PLA).

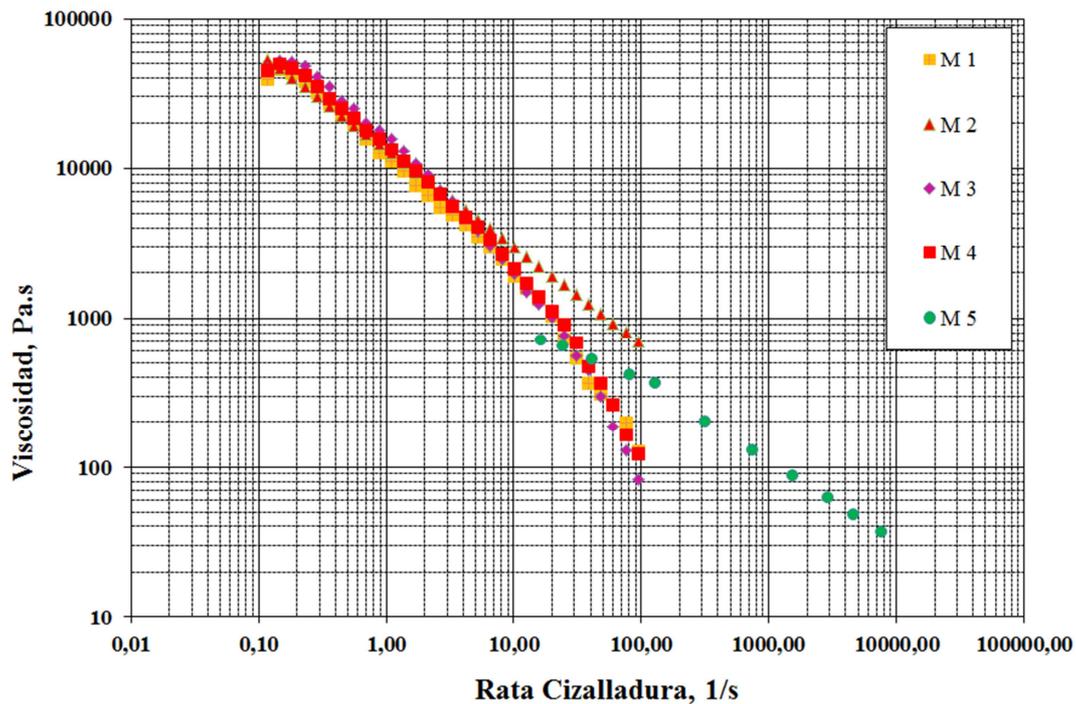


Figura 3. Curvas de viscosidad a una temperatura de 190°C.

En la Figura 3, se puede observar que los materiales con carga incrementan la viscosidad con respecto al polietileno de baja densidad sin carga. El rango de velocidades de cizalladura típicas en el proceso de inyección se encuentra entre 500 y 10000 [1/s].

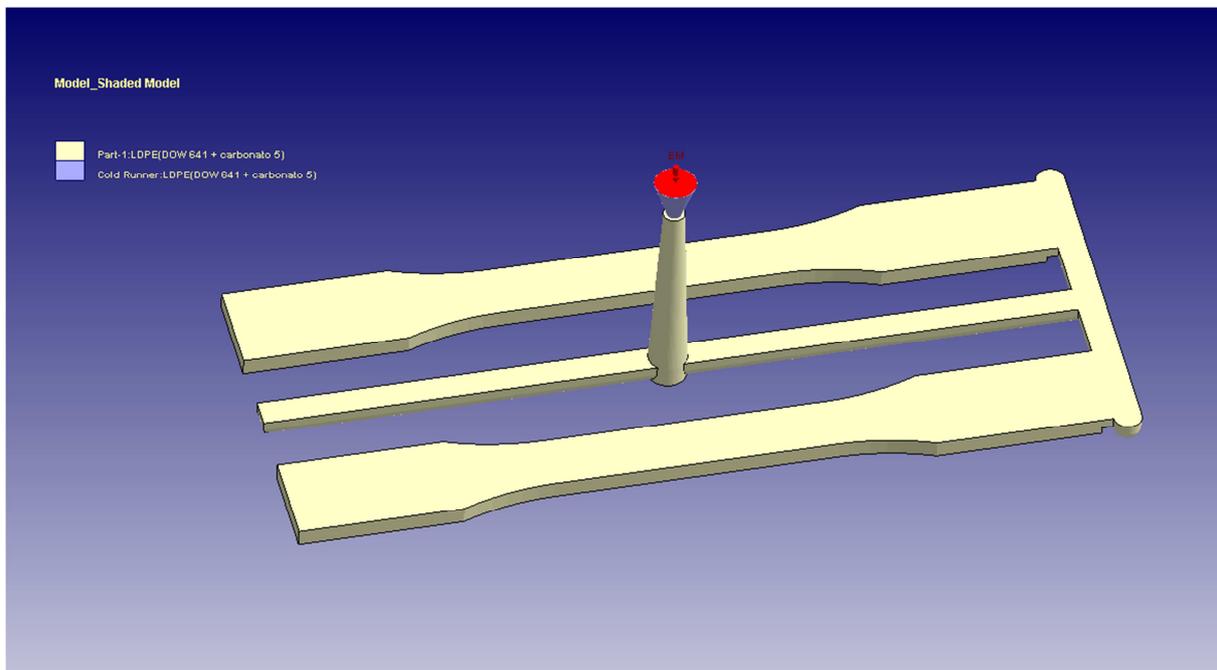


Figura 4. Pieza de inyección a evaluar.

Los análisis de simulación de inyección se realizaron empleando el software Moldex3D basado en el método de volúmenes finitos, en el cual se importan los modelos 3D de las piezas a inyectar y se ingresan los parámetros de condiciones de proceso recomendadas. Para

comparar el efecto en el llenado de un molde de inyección de acuerdo al material, se evaluaron los materiales bajo las mismas condiciones de proceso en una pieza inyectada de probetas de tensión, tal como se indica en la Figura. 4. En la tabla 5 se listan las condiciones de proceso evaluadas. Según, (Flórez, L; Thornagel 2013), la tecnología de simulación permite realizar análisis de moldeo virtual, reproduciendo el proceso de inyección para predecir el comportamiento de llenado como la calidad de diversos materiales en la conformación de piezas.

Tiempo de llenado (s)	0.99
Tiempo de pospresión (s)	6.64
Temperatura de inyección (°C)	215
Temperatura de molde (°C)	40
Tiempo de enfriamiento (s)	17.6

Tabla 5. Condiciones de proceso

La velocidad de inyección se programó con un perfil con el fin de lograr obtener una velocidad de inyección en la cavidad del molde los más constante posible y de reducir la presión de inyección del proceso, según se presenta en la Figura. 5.

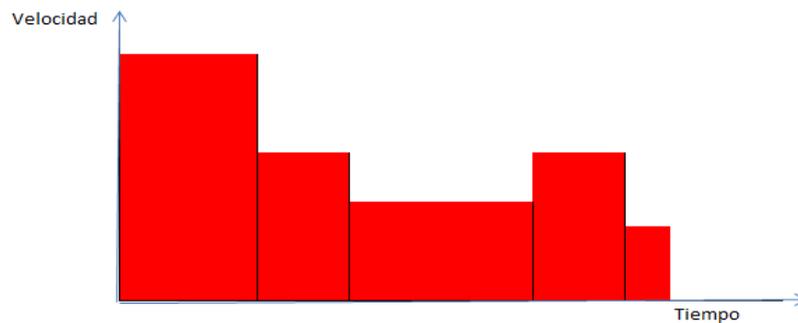


Figura. 5. Perfil de velocidad de inyección.

Durante el llenado de un molde de inyección es importante determinar la presión de inyección y fuerza de cierre que genera el proceso. La presión de inyección es función de la viscosidad, la velocidad de inyección, la longitud de flujo y el espesor de la pieza a inyectar (Flórez, L; Thornagel 2013).

Partiendo de la base que la geometría ya se encuentra definida (espesores y la longitud de flujo) así como las condiciones del proceso de inyección. Se evaluará el efecto de la viscosidad según el tipo de material a inyectar.

En la Figura.6, se muestra la distribución de la presión de inyección durante el llenado de la pieza para el caso del polietileno de baja densidad sin cargas.

Se observa entonces que la presión de inyección para llenar un molde es básicamente una distribución de presiones que desde el punto de vista del molde a llenar es función del espesor donde fluye y la longitud requerida para llenar el molde.

Para cada condición a evaluar es posible determinar la presión de inyección y la fuerza de cierre que se define como la presión de inyección sobre el área proyectada de la pieza inyectada en el plano de apertura del molde.

$$F \cong \overline{P}_{iny}/A \quad (14)$$

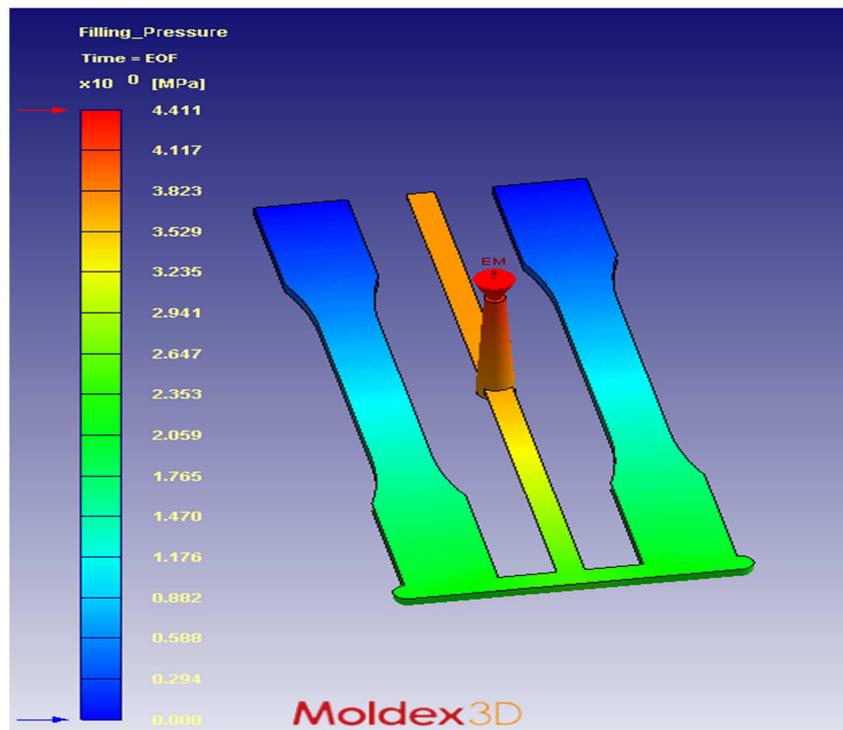


Figura. 6. Distribución de presiones durante el llenado de la pieza empleando PEBD.

Con el análisis del software de simulación, es posible calcular en forma discreta de volúmenes finitos la distribución de la presión de inyección en toda la pieza y por lo tanto se podrá calcular de forma precisa la fuerza de cierre real que se debe aplicar en la máquina que inyecta el material en el molde. Para comparar los diferentes materiales empleados en las Figuras. 7 y 8 se comparan las curvas de presión de inyección y fuerza de cierre durante el llenado del molde.

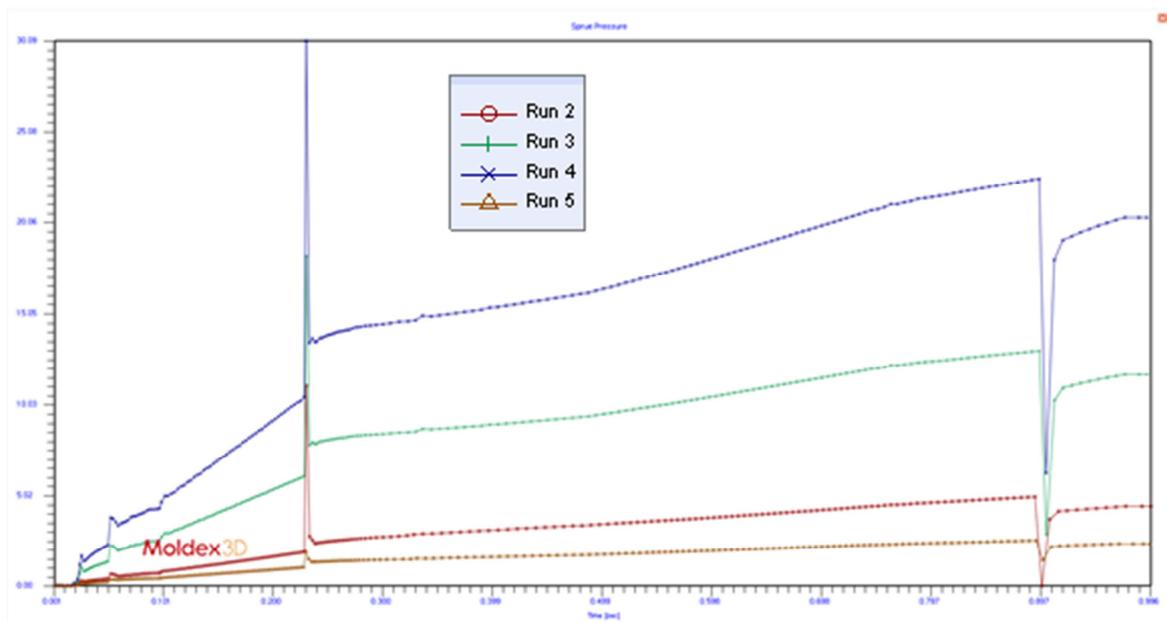


Figura. 7. Curvas de presión de inyección con PEBD (Run2), PEBD+carbonato 5% (Run3), PEBD + cabosil 5% (Run4) y PLA.

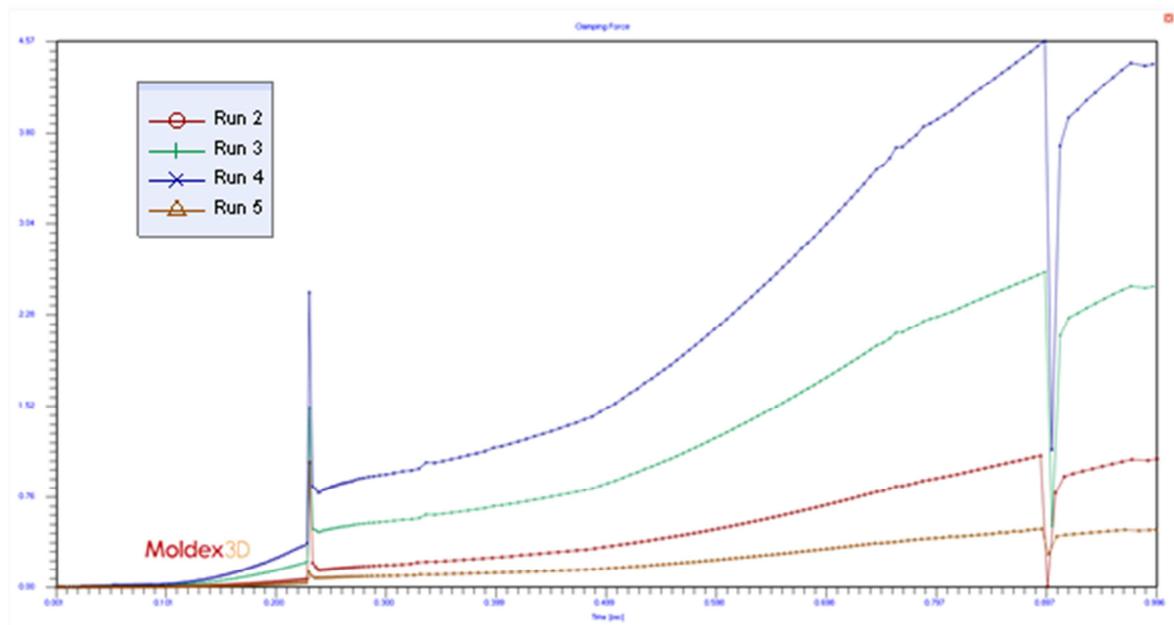


Figura. 8. Curvas de fuerza de cierre con PEBD (Run2), PEBD+carbonato 5% (Run3), PEBD + cabosil 5% (Run4) y PLA.

En la Figura.9, se puede visualizar la velocidad de cizalladura generada en el proceso de llenado, el cual se encuentra dentro el rango bajo de piezas inyectadas.

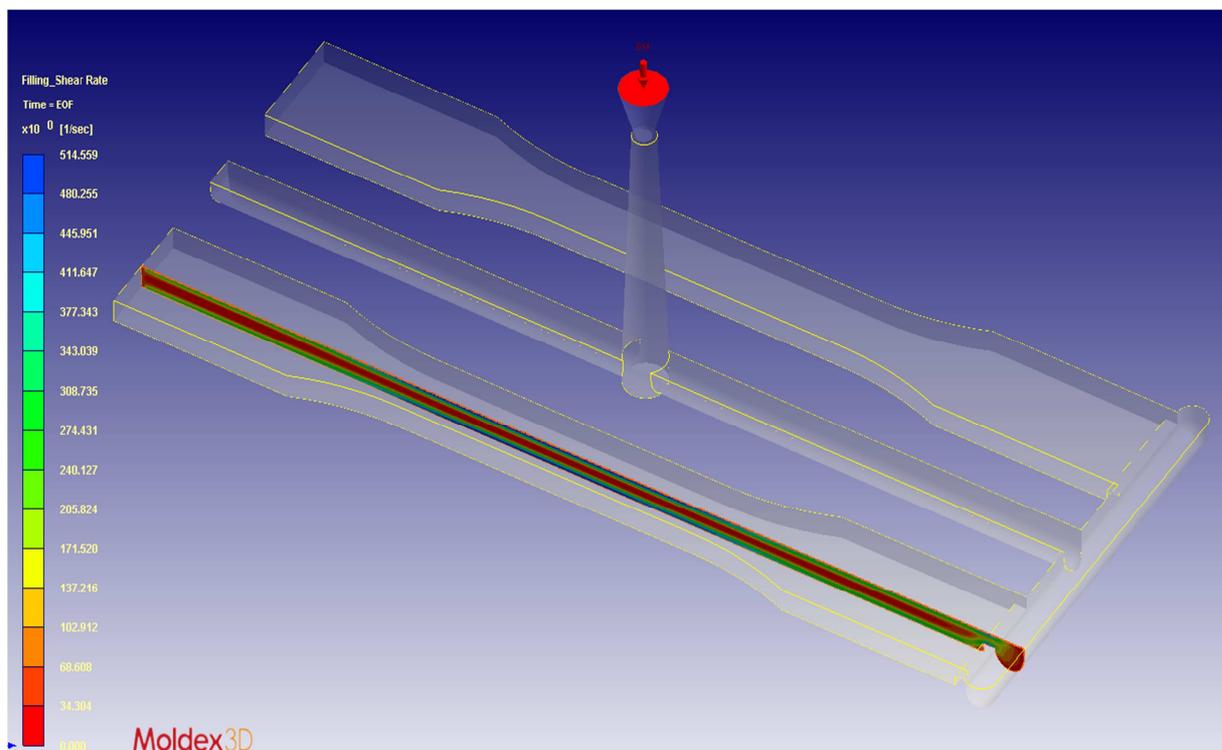


Figura. 9. Velocidad de cizalladura generada en el proceso de inyección.

Conclusiones:

De acuerdo con los análisis de simulación de inyección, la incorporación de cargas incrementa la viscosidad del material y por lo tanto la presión de inyección, lo que permite optimizar la puesta a punto de las variables de procesamiento.

Lo anterior implica el requerimiento de una máquina de procesamiento por inyección de especificaciones de presión y fuerza de cierre suficientes para soportar los incrementos en estas variables para permitir el procesamiento del material con cargas.

La influencia al incorporar cargas reforzantes en un polímero, se evidencia de manera clara en sus propiedades mecánicas, dando como resultado un significativo aumento en su rigidez; en contraste, la procesabilidad se dificulta al incrementarse la viscosidad del PEBD con la incorporación de cargas, lo que se refleja a la hora de realizar la simulación del proceso de inyección en el comportamiento de los parámetros.

La inyección del PLA presentó menores niveles de presión en función de la viscosidad, lo que trae como ventaja el uso de máquinas inyectoras de menor tamaño y consumo de energía.

REFERENCIAS

- Flórez, L; Thornagel, 2013. Oportunidades de Aplicación del Moldeo Virtual para Optimizar el Moldeo por Inyección de Piezas Plásticas. , pp.18–21.
- Grossiord, N. et al., 2008. On the influence of the processing conditions on the performance of electrically conductive carbon nanotube/polymer nanocomposites. *Polymer*, 49(12), pp.2866–2872.
- Gupta, A. & Choudhary, V., 2011. Electromagnetic interference shielding behavior of poly(trimethylene terephthalate)/multi-walled carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 71(13), pp.1563–1568.
- Ilinca, E., Hetu, J.F. & Pelletier, D., 2005. Design Sensitivity Analysis for the Optimization of the Injection Molding Process. *International Polymer Processing*, 20(1), pp.86–92.
- Kang, H.K.H., Wang, Y.W.Y. & Xu, L.X.L., 2010. *Mold-Flow analysis in injection molding process of fan back cover*,
- Konishi, Y. & Cakmak, M., 2005. Structural hierarchy developed in injection molding of nylon 6/clay/carbon black nanocomposites. *Polymer*, 46(13), pp.4811–4826.
- Kuan, C.-F. et al., 2008. Mechanical and electrical properties of multi-wall carbon nanotube/poly(lactic acid) composites. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 69(5-6), pp.1395–1398.
- Lee, S.H. et al., 2008. Rheological and electrical properties of polypropylene/MWCNT composites prepared with MWCNT masterbatch chips. *European Polymer Journal*, 44(6), pp.1620–1630.

- Lee, W.-J., Lee, S.-E. & Kim, C.-G., 2006. The mechanical properties of MWNT/PMMA nanocomposites fabricated by modified injection molding. *Composite Structures*, 76(4), pp.406–410.
- LI, Q. et al., 2013. Enhanced thermal and electrical properties of poly (D,L-lactide)/multi-walled carbon nanotubes composites by in-situ polymerization. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(5), pp.1421–1427.
- Liu, T. et al., 2003. Morphology, thermal and mechanical behavior of polyamide 6/layered-silicate nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), pp.331–337.
- Osswald, T. et al, 2010. *Ciencia de Polímeros para Ingenieros* 1st ed. Guadales, ed., Cucuta.
- El Otmani, R. et al., 2011. Numerical simulation and thermal analysis of the filling stage in the injection molding process: Role of the mold-polymer interface. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(3), pp.1579–1592.
- Ozcelik, B., Ozbay, A. & Demirbas, E., 2010. Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(9), pp.1359–1365.
- Pavlidou, S. & Papaspyrides, C.D., 2008. A review on polymer-layered silicate nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, 33(12), pp.1119–1198.
- Reddy, M.M. et al., 2013. Biobased Plastics and Bionanocomposites: Current Status and Future Opportunities. *Progress in Polymer Science*, null(null).
- Seltzer, R., Frontini, P.M. & Mai, Y.-W., 2009. Effect of hygrothermal ageing on morphology and indentation modulus of injection moulded nylon 6/organoclay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 69(7-8), pp.1093–1100.
- Shen, C., Wang, L. & Li, Q., 2007. Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method. *Journal of Materials Processing Technology*, 183(2-3), pp.412–418.
- Tiusanen, J., Vlasveld, D. & Vuorinen, J., 2012. Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts. *Composites Science and Technology*, 72(14), pp.1741–1752.
- Uribe-Arocha, P. et al., 2003. Effect of sample thickness on the mechanical properties of injection-molded polyamide-6 and polyamide-6 clay nanocomposites. *Polymer*, 44(8), pp.2441–2446.
- Vargas, A.F. et al., 2010. Influence of fiber-like nanofillers on the rheological, mechanical, thermal and fire properties of polypropylene: An application to multifilament yarn. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(12), pp.1797–1806.
- Xu, H., Lele, A. & Rastogi, S., 2011. The influence of carbon-based nanofillers on the melt flow singularity of linear polyethylene. *Polymer*, 52(14), pp.3163–3174.

Yalcin, B. & Cakmak, M., 2004. Superstructural hierarchy developed in coupled high shear/high thermal gradient conditions of injection molding in nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, 45(8), pp.2691–2710.

Zhu, J.Z.J. & Wang, C.W.C., 2010. *Flow analysis in injection molding process based on MoldFlow*,