



Dyna

ISSN: 0012-7353

dyna@unalmed.edu.co

Universidad Nacional de Colombia

Colombia

OSSWALD, TIM A.; AQUITE, WILLIAM; RAMÍREZ, DANIEL; LÓPEZ, LUISA; PUENTES, JOHN;
PÉREZ, CAMILO; GARCÍA RODRÍGUEZ, SYLVANA

RETOS EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS Y COMPUESTOS

Dyna, vol. 79, núm. 175, octubre, 2012, pp. 20-28

Universidad Nacional de Colombia

Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49624956005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

RETOS EN LA INDUSTRIA DE PROCESAMIENTO DE PLÁSTICOS Y COMPUESTOS

TIM A. OSSWALD

Professor, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, osswald@engr.wisc.edu

WILLIAM AQUITE

M.Sc., Research Assistant, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, aquite@wisc.edu

DANIEL RAMÍREZ

Research Assistant, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, dramirez2@wisc.edu

LUISA LÓPEZ

Research Assistant, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, lopez6@wisc.edu

JOHN PUENTES

Research Assistant, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, puentesgil@wisc.edu

CAMILO PÉREZ

Research Assistant, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, jcperez2@wisc.edu

SYLVANA GARCÍA RODRÍGUEZ

Ph.D., Research Associate, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, garcia1@wisc.edu

RESUMEN: La industria de los plásticos actualmente se enfrenta a una variedad de retos relacionados con sostenibilidad, calidad y eficiencia de procesos. La demanda de producción a gran escala e implementación de nuevas tecnologías a nivel industrial requiere avances en herramientas de modelado y simulación de procesos para la solución de problemas y superación de retos actuales. Este trabajo presenta tres casos prácticos en la industria de plásticos donde el modelado y simulación en el procesamiento representan un papel fundamental en la evaluación y disponibilidad de nuevas tecnologías.

PALABRAS CLAVE: Plásticos, Modelación, Simulación, Tecnología.

ABSTRACT: The plastics industry currently faces a variety of obstacles related to sustainability, quality and process efficiency. The demand for large scale production and implementation of new technologies on an industrial level requires advances in modeling tools and process simulation in order to overcome present-day challenges. This work presents three study cases of plastics industry in which modeling and simulation of diverse manufacturing processes is key in both the evaluation and availability of new technologies.

KEYWORDS: Plastics, Modeling, Simulation, Technology.

1. INTRODUCCIÓN

Como resultado de la experiencia en la ingeniería de polímeros, una técnica denominada 6P's ha surgido para relacionar todos los factores involucrados en el diseño de nuevos productos [1]. Esta metodología propone considerar todas las P's cada vez que alguna de ellas se modifique. Así, al diseñar un producto (*product*) con desempeño (*performance*) y un costo específico (*profit*) deben considerarse el material (*plastic*), la técnica de manufactura (*process*) y criterios de sostenibilidad (*post-consumer life*) en cada una de las etapas de procesado, como se observa en la Figura 1.

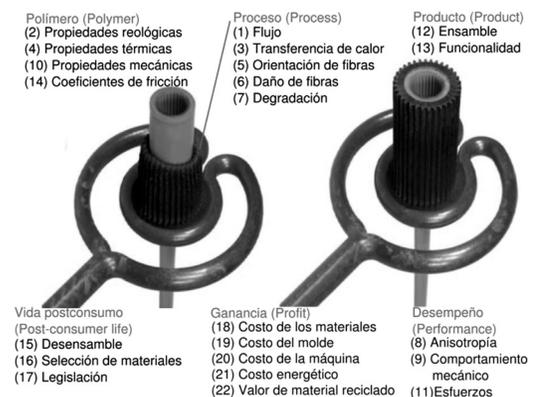


Figura 1. Ejemplo ilustrativo de la interrelación de las 6p's en el diseño de un producto.

Los desarrollos tecnológicos en el procesamiento de plásticos y la demanda de calidad en los productos han causado que la competitividad en esta industria se encuentre orientada a la reducción de costos de producción y a la optimización de las técnicas actuales, clave en el desarrollo de nuevos materiales y procesos. Adicionalmente, la crisis energética ha hecho necesaria la reducción en el consumo de combustibles, motivo por el cual en el área de materiales, procesos y diseño, los avances en ingeniería buscan reducir el peso en las partes fabricadas. Este concepto se conoce en Alemania como *Leichtbau* (construcción liviana) e involucra el uso de materiales compuestos como polímeros reforzados con fibras y materiales híbridos (metal-plástico) así como innovaciones en el diseño para reducir el peso de los artículos producidos.

La disponibilidad de nuevas tecnologías y su implementación en cadenas de producción a gran escala se ven limitadas por la falta de conocimiento con respecto al proceso y debido a restricciones presentes en las aplicaciones. Con el objetivo de superar estas dificultades, actualmente se desarrollan trabajos de investigación en diversas áreas, que involucran la manufactura de polímeros, tales como: inyección, compresión y extrusión. En procesos de moldeo por inyección, por ejemplo, es posible simular en tres dimensiones (3D) y con bastante precisión el enfriamiento, deformación y encogimiento durante el llenado del molde para una gran variedad de materiales y geometrías. Además, en el moldeo con materiales compuestos se desarrollan simulaciones para estudiar la orientación y el movimiento de las fibras durante el procesado y así estudiar fenómenos como la separación entre las fibras y la matriz de polímero en las partes terminadas.

Otro de los enfoques contemporáneos en manufactura de polímeros se conoce como *additive manufacturing* (fabricación por adición de capas). Esta tecnología comprende nuevas o mejores herramientas en el modelado computarizado de procesos más sofisticados, como por ejemplo sinterización selectiva por láser (SLS), la cual se implementa en la producción de prototipos, tiene una participación significativa en aplicaciones biomédicas y busca posicionarse a nivel industrial para la fabricación de productos terminados de alta precisión en geometrías complejas y con alta resistencia mecánica.

En inyección y extrusión de polímeros, el fenómeno de degradación de material en distintas etapas del proceso, relacionada con el historial de temperatura, cizalladura y el tiempo de residencia, es un problema que afecta no sólo el procesamiento de nuevas partes sino la reutilización y reciclaje de los productos que cumplieron su ciclo de vida y/o los residuos poliméricos generados en la industria durante el procesamiento. Trabajos experimentales acompañados con simulación buscan soluciones a este fenómeno mediante el análisis del comportamiento del material desde su estado original como *pellet* hasta que éste adquiere la forma de un componente funcional.

Existen diferentes centros en el mundo que se han dedicado a la investigación en distintas áreas estratégicas en la manufactura con materiales poliméricos. En este sentido, es importante mencionar el trabajo realizado en: el IKV (*Institut für Kunststoffverarbeitung*) en Aquisgrán (Alemania), que se especializa en moldeo de precisión, utilizado en la producción de lentes; el LKT (*Lehrstuhl für Kunststofftechnik*) en Erlangen (Alemania) con proyectos en el área de construcción liviana, fabricación por adición, compuestos e híbridos; el *Fraunhofer-Institut für Chemie. Technologie* en Pfinztal y Augsburg (Alemania) con proyectos relacionados con la manufactura de materiales reforzados con fibras cortas y largas respectivamente. En Suramérica, es importante mencionar el trabajo del ICIPC (Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y el Caucho), que fue fundado con aportes de diferentes empresas colombianas y la GTZ (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*) en Alemania. Entre los aportes del ICIPC es importante mencionar sus trabajos en simulación y optimización de procesos en la industria de polímeros en Latinoamérica.

Este artículo presenta tres áreas actuales donde el modelado y la simulación de los procesos permiten entender la influencia de las distintas variables en el producto final y obtener soluciones a los problemas identificados, disminuyendo la inversión en costo y tiempo. Estos proyectos de investigación se llevan a cabo en el Centro de Investigación de Polímeros en La Universidad de Wisconsin-Madison (*Polymer Engineering Center, PEC*), en cooperación con otros centros de investigación y en alianza con compañías dedicadas a la simulación, procesamiento y ensamble de componentes fabricados con polímeros y/o matrices poliméricas reforzadas.

2. SIMULACIÓN

La predicción de la influencia de los distintos parámetros de producción tanto en el proceso de manufactura como en el producto final, es crucial en la búsqueda de la disminución en los costos de producción.

Los problemas y retos mencionados anteriormente están relacionados con el análisis y comprensión del flujo de materiales y transferencia de calor y masa, en cada uno de los estados del proceso de manufactura. Para comprender estos fenómenos se hace uso de la ciencia de fenómenos de transporte, la cual unifica los principios de la conservación de la masa, momento y energía. La combinación de estos principios con relaciones constitutivas, las cuales describen el comportamiento del material, particularmente su viscosidad, generalmente lleva a ecuaciones altamente no lineales. Es importante enfatizar que los materiales poliméricos en estado fundido no presentan un comportamiento Newtoniano. En cambio, se caracterizan por presentar una disminución de la viscosidad con la tasa de cizalladura (*shear thinning*). Este comportamiento puede caracterizarse mediante ecuaciones constitutivas como el modelo de *power law* y el *modelo de Carreau*. Además, en la simulación de algunos procesos es importante considerar el carácter viscoelástico de los materiales, lo que incrementa la complejidad de los modelos.

Aunque se han obtenido soluciones analíticas para procesos que se pueden caracterizar con geometrías y ecuaciones constitutivas simples, generalmente el grado de complejidad y no linealidad de las ecuaciones obtenidas requiere el uso de métodos numéricos para su solución. Por ejemplo, en el caso del procesamiento de polímeros, el método de los elementos finitos (*Finite Element Method, FEM*) y las diferencias finitas (*Finite Differences Method, FDM*) son comúnmente implementados. El método de elementos finitos, particularmente, es el más extendido dentro de los programas comerciales para simulación del proceso de inyección. Adicionalmente, el método de elementos de frontera (*boundary elements method, BEM*) ha sido utilizado para la simulación del flujo en elementos de mezcla [2, 3], en extrusoras de doble husillo [4] y en el proceso de inyección asistida por gas [5]. Este método se caracteriza por usar una malla en la frontera del dominio en lugar de enmallar todo el volumen (lo

que resulta en un menor costo computacional). En el PEC también se han utilizado métodos libres de malla como el método de funciones de base radial (*Radial Functions Method, RFM*), para simular el proceso de calandrado [6], el desbalance térmico en moldes de inyección [7, 8] y el flujo de tipo fuente en procesos de moldeo [9], entre otros.

3. CASOS DE ESTUDIO

3.1. Industria Automotriz.

Los materiales compuestos reforzados con fibras se han usado por décadas para producir algunas de las partes de automotores como: tableros de instrumentación, estructuras de asientos, partes del chasis y paneles entre otros. Estos materiales permiten la reducción en peso y permiten generar formas más complejas en partes que antes eran fabricadas con metales. El uso de estos materiales ha significado una mejora económica y ecológica para esta industria, reduciendo costos de producción y operación, y minimizando el impacto ambiental generado por estos productos [10].

La longitud y orientación final que tengan las fibras en el producto afecta las propiedades mecánicas. Estas dos variables dependen a su vez del método y los parámetros de proceso así como del tipo de fibras, tipo de resina, distribución inicial de longitudes y orientación inicial de las fibras en la carga. La capacidad para predecir las orientaciones y longitudes de las fibras sería una herramienta muy útil de diseño; la cual permitiría estimar directamente las propiedades mecánicas de las partes [11].

Se han desarrollado modelos fenomenológicos que permiten estimar la orientación como el de Folgar y Tucker [12] y más recientemente el modelo de Phelps y Tucker [13]. Sin embargo, aunque son usados ampliamente, no comprenden en su totalidad los fenómenos físicos asociados al movimiento de las fibras. Por esta razón, problemas en partes inyectadas como el presentado por la **Figura 2**, en la que una parte de la superficie es lisa y libre de fibras, y otra áspera y abundante en fibras, no pueden predecirse utilizando este tipo de modelos. Kurth [14] por otro lado, pudo explicar la presencia de zonas libres de fibras en la superficie de piezas inyectadas simulando el movimiento de las fibras utilizando un modelo

mecánico en el cual se simulan las fibras como una serie de pequeñas esferas conectadas con resortes. Se concluyó que estas zonas libres de fibras podrían ser atribuidas a la interacción entre las fibras y la matriz polimérica en el flujo tipo fuente durante la inyección.

Recientemente en el PEC se han desarrollado simulaciones del flujo de materiales compuestos a través del *gate* en el proceso de inyección (**Figura 3**) con el fin de predecir cambios en la orientación y en la distribución de longitudes de las fibras [15].

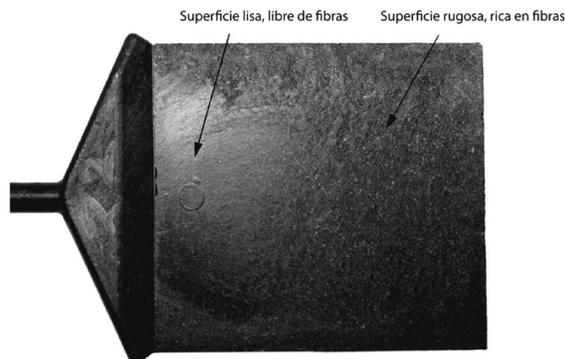


Figura 2. Pieza inyectada con termoplástico reforzado con fibras.



Figura 3. Movimiento de un cluster de fibras a través del *gate* en una pieza inyectada.

La complejidad de la geometría de las partes simuladas, o la cantidad de elementos hacen que la simulación de estos fenómenos utilizando modelos mecánicos involucre un costo computacional alto; sin embargo el incremento del poder computacional disponible y el uso cada vez más común de la computación

en paralelo permiten el desarrollo de simulaciones más complejas y realistas. Estas son buenas noticias para la industria automotriz, pues con ayuda de estas herramientas se podrán superar algunos de los retos existentes, haciendo uso de mejores prácticas, mediante un mejor entendimiento de los materiales con los cuales se trabaja y teniendo un control más preciso sobre las propiedades mecánicas de las partes de automotores.

3.2. Sinterización selectiva por láser

En los procesos de *manufactura por adición* las piezas se forman mediante la deposición sucesiva de capas de material. Estos procesos han cobrado importancia para la producción de partes con diseños complejos a nivel geométrico. Además, estos procesos permiten la producción de artículos en pequeñas cantidades a costos relativamente bajos. En este sentido, presenta ventajas con respecto a la manufactura convencional en la cual el costo de producción por pieza suele ser mucho más alto para producciones en pequeñas cantidades. [16]. Hoy en día estas tecnologías de impresión en 3D ofrecen alta precisión para la fabricación de productos en una gran variedad de aplicaciones. Estos procesos prometen convertirse en una industria de aproximadamente \$3.7 billones de dólares para el 2015 de acuerdo con *Wohlers Associates*; el doble del estimado actual de \$1.7 billones de dólares [17].

El proceso de sinterización selectiva por láser (*Selective Laser Sintering, SLS*) es uno de los procesos de manufactura por adición de capas que ha sobresalido recientemente. En este proceso se realiza una adición sucesiva de capas de material en forma de polvo, haciendo fusión selectiva por medio de un láser y de acuerdo a la geometría en el modelo CAD de la pieza.

La SLS no solamente ofrece una gran precisión geométrica sino también una alta resistencia mecánica de las partes fabricadas [18]. Estas características hacen de este proceso uno de los más prometedores de las tecnologías de manufactura rápida. Aplicaciones importantes se encuentran en la industria aeroespacial, automotriz y biomédica. Esta última ha tenido grandes avances y hoy en día existen estudios de fabricación de implantes óseos, modelos tridimensionales para planeación quirúrgica y estructuras de soporte (*scaffolds*) para ingeniería de tejidos. Al tener un alto control sobre la porosidad y la arquitectura del *scaffold*,

el investigador tiene la oportunidad de realizar estudios estructurales con una mayor afinidad en el impacto de las propiedades mecánicas del scaffold y en el comportamiento de las células implantadas [19, 20].

A pesar de las ventajas de este proceso de manufactura, la mejora del nivel de producción, la reducción del costo por unidad fabricada y la calidad del producto terminado son algunos de los retos en la manufactura de piezas. La integridad de las propiedades estructurales en esta técnica es afectada además por fenómenos de encogimiento y alabeo responsables de los mayores márgenes de error, en precisión, en el producto terminado. En cuanto al área médica, un factor adicional en la precisión de la parte final es la calidad de la imagenología médica [21, 22]. Comúnmente, los modelos CAD para aplicaciones biomédicas provienen de una tomografía o resonancia magnética. Aunque grandes avances en estas tecnologías han motivado el uso biomédico de la SLS, la resolución de las imágenes obtenidas juega un papel importante en la precisión geométrica de la parte final.

En aplicaciones como implantes óseos, la estabilidad estructural y el acabado superficial de la pieza se pueden ver afectados por el efecto de piel de naranja (*orange peel*) causado por deformaciones desiguales y encogimiento de las capas como consecuencia de los cambios de temperatura en el proceso de sinterización. Debido a la dificultad en la predicción de estos fenómenos, actualmente se efectúa un ajuste de las condiciones del proceso mediante ensayo y error a nivel experimental, lo que resulta en la fabricación de una serie de prototipos antes de obtener una pieza con superficies y propiedades estructurales aceptables.

El complejo comportamiento térmico de los polímeros puede influir en la consolidación adecuada de cada capa. La comprensión de los fenómenos que ocurren durante el enfriamiento de la parte permitiría modificaciones previas a las condiciones de proceso, evitando el desperdicio de material y reduciendo el costo y tiempo que se debe invertir en el diseño del producto. La modelación y la comprensión del comportamiento térmico también permiten innovar en los tipos de materiales compuestos que se pueden trabajar con esta tecnología. Antonov investigó, por ejemplo, la actividad enzimática durante la fabricación de un *scaffold* de PLA, y mostró que se mantuvo

durante el proceso sin degradación, lo cual permitiría fabricar *scaffolds* con proteínas que realcen la función celular [23].

Para la manufactura de partes con alta calidad en SLS, parámetros como el ajuste del espesor de cada capa, el nivel de energía del láser y el patrón de fundición se ajustan de acuerdo al tipo de material y a los requerimientos de la aplicación final del producto. Experimentalmente se ha observado que éstos influyen en el alabeo y deformación después de que la pieza se enfría.

En el Polymer Engineering Center, se planea hacer uso de resultados experimentales e integrar modelos computacionales que permitan predecir fenómenos de transferencia de calor y comportamiento de propiedades en el material con el fin de desarrollar herramientas que permitan estimar la cantidad de alabeo y deformación para una pieza y así mismo predecir y evitar fenómenos como la piel de naranja.

3.3. Predicción del fenómeno de degradación durante el procesamiento de polímeros.

El fenómeno de degradación es uno de los principales obstáculos en procesamiento de materiales ya que perjudica las propiedades mecánicas y acabados superficiales de los productos. Actualmente, en el área experimental y mediante las técnicas de simulación, la dependencia de este fenómeno con el historial de temperatura, cizalladura y tiempos de residencia son estudiados con el propósito de prevenir y evitar este problema. En extrusión, por ejemplo, un patrón geométrico inadecuado en el dado puede llegar a generar degradación en el material que compone la tubería durante el primer procesado [24] generando la aparición de pequeñas partículas en la superficie de los productos conocidas como geles (*gels*). En el proceso de extrusión de tubos se estudia como obtener perfiles con acabados superficiales de alta calidad y resistencia mecánica acorde con la aplicación, eliminando la recirculación de material en el interior del dado mediante la disminución de los tiempos de residencia. Adicionalmente, el sector industrial dedicado a la extrusión de tubos debe satisfacer a los clientes y competir en un mercado donde se demandan tuberías con un mejor desempeño a precios más bajos.

Tradicionalmente, algunos productores de perfiles poliméricos tratan de generar soluciones al fenómeno de degradación mediante ensayo y error. Basados en las

sugerencias del o de los expertos, el departamento de mantenimiento o el departamento de diseño maquinas varios perfiles de dados o moldes y luego de varios intentos deciden cuál de las alternativas es más razonable. Sin embargo, esta metodología consume tiempo y dinero que no se encuentran contemplados dentro del plan de producción y no en todos los casos se obtienen soluciones.

En la búsqueda de alternativas que eliminen la degradación de material producida debido a tiempos de residencia prolongados en el interior del dado, El *PEC* y *TEEL Plastics Inc.* [24] trabajan en el diseño de nuevos cabezales para la producción de tuberías, basados en nuevos perfiles geométricos generados mediante simulación. El *PEC* hizo uso del software comercial *COMSOL Multiphysics versión 4.3a* en el análisis de este problema. Varias geometrías que pueden reemplazar los cabezales actuales, surgieron como resultado de la simulación numérica. Estos nuevos patrones geométricos muestran una reducción en el tiempo de residencia dentro del herramental, eliminando la degradación.

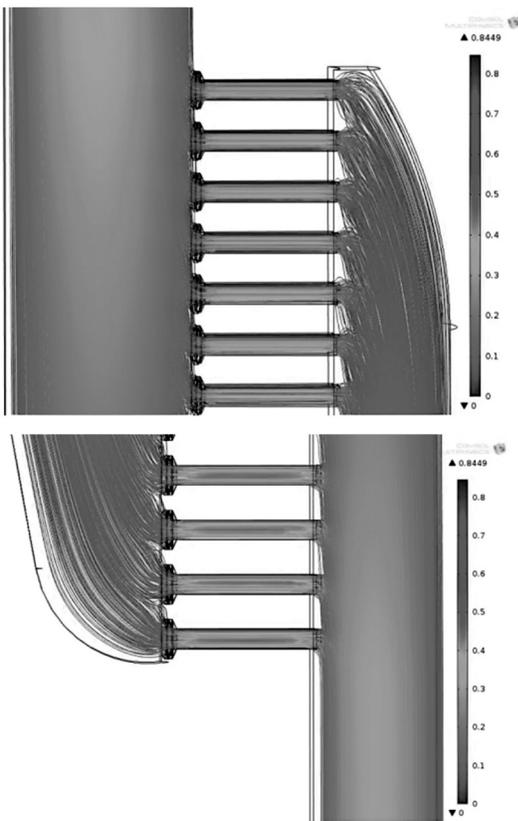


Figura 4. Trayectoria de las partículas en el interior del dado. Las zonas sin trayectoria de partículas representan regiones de estancamiento y recirculación de material [24].

La **Figura 4** es una simulación que incorpora el cálculo de la distribución de velocidades, las líneas de corriente, la trayectoria de las partículas y el tiempo de residencia del material en el interior de un dado. Esta figura corresponde a la trayectoria de partículas de *HDPE (High Density Polyethylene)* dentro de un dado de extrusión de tubos. Las zonas sin flujo de partículas (que son representadas por los distintos colores dependiendo de la velocidad, donde azul oscuro representa las zonas con velocidades bajas y amarillo las zonas con las velocidades más altas) representan zonas de recirculación y estancamiento de material. Este material permanece dentro del dado por un tiempo mas prolongado, y se degrada antes de salir del dado.

En ingeniería de polímeros, la búsqueda de procesos sostenibles ha incorporado el reciclaje y la reutilización de los desechos industriales y de los productos que cumplieron con su ciclo de vida dentro de vida de pos-consumo (*post-consuming life*).

La degradación influye en las propiedades mecánicas y en el flujo del material durante el reprocesamiento, debido a un cambio en el peso molecular del polímero cada vez que éste se somete a un incremento de temperatura y/o a esfuerzos cortantes. Una de las técnicas experimentales utilizadas en la detección de degradación del material consiste en analizar los cambios en el índice de fluidez (*Melt Flow Index, MFI*). En algunos materiales la degradación está asociada a la escisión de las cadenas poliméricas (*chain scission*), con una disminución del peso molecular y un incremento en el MFI; en otros, la degradación está acompañada de fenómenos de reticulación (*cross-link*), lo cual genera un aumento del peso molecular y una disminución del MFI [1, 25, 26].

En las **Figura 5** y **Figura 6**, la reducción en *MFI* en inyección y extrusión pueden relacionarse con la degradación del material de la siguiente manera; tomando como ejemplo *PE-LD (Low Density Polyethylene)* y *PMMA (Polymethyl-methacrylate)*, estos materiales muestran un incremento en el peso molecular (reducción del *MFI*), lo que indica la aparición del fenómeno de reticulación [1]. Esta reacción química es causada por tiempos de residencia prolongados lo que genera la aparición geles [1].

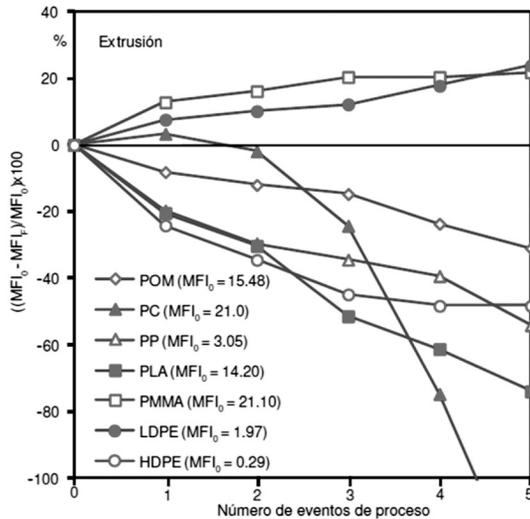


Figura 5. Cambios en el índice de fluidez (*melt flow index, MFI*) como función del número de eventos durante el proceso por extrusión [1].

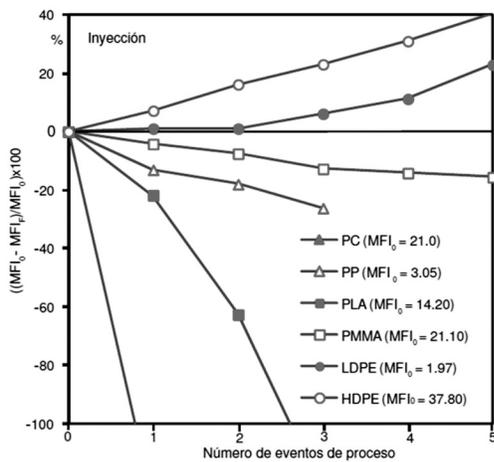


Figura 6. Cambios en el índice de fluidez (*melt flow index, MFI*) como función del número de eventos durante el moldeo por inyección [1].

4. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado tres ejemplos específicos relacionados con la industria de polímeros en los cuales se demuestra cómo la simulación permite la optimización de los procesos.

La tendencia actual en el sector de procesamiento de polímeros incluye tecnologías avanzadas y un pensamiento más crítico en donde productores y centros de investigación en las universidades se congregan en la búsqueda de

nuevas alternativas que consideran la metodología de las 6P's. Antes de llevar a cabo la construcción de nuevos equipos, esta cooperación ataca los problemas mediante el uso de modelado y simulación, utilizando los principios matemáticos que gobiernan el fenómeno físico. La combinación de la tecnología, la experiencia y los recursos del sector industrial junto con el dominio de las herramientas computacionales y los recientes hallazgos y teorías propuestas en la academia, producen mejores soluciones. Esta metodología reduce el tiempo utilizado en la búsqueda de soluciones, optimizando los procesos de producción y generando bases de datos útiles no sólo para un caso específico, sino en aplicaciones relacionadas con el mismo fenómeno mediante el uso de analogías físicas en donde los modelos matemáticos se aplican en distintos sectores.

Esta tendencia beneficia al sector industrial, a la academia y a los actores secundarios que hacen parte del ciclo de producción y consumo. Luego de la obtención de alternativas óptimas, la industria se beneficia con la implementación de herramientas modernas que mejoran la calidad de los procesos y disminuyen costos y tiempos de producción. Por otra parte, los centros de investigación logran un mayor entendimiento de los fenómenos físicos y adquieren información que desafía y modifica el conocimiento científico que se posee en la actualidad. A través de la publicación de artículos, educación a nivel técnico y universitario, y cooperaciones entre centros de investigación y compañías, la comunidad de plásticos accede a esta información complementando los hallazgos con nuevas propuestas o simplemente aplicando los conceptos en los procesos de producción. Finalmente los consumidores acceden a productos más económicos y que brindan un mejor desempeño con ciclos de vida prolongados.

Aunque la experimentación física siempre será necesaria para optimizar los procesos, una aproximación basada en ensayo y error sin recurrir a simulaciones es usualmente más costosa y requiere más tiempo, no siendo factible en la manufactura moderna. Ese es especialmente el caso en una economía globalizada caracterizada por ciclos de producto más cortos y una constante innovación.

REFERENCIAS

- [1] T. Osswald Y G. Menges, *Materials of Polymers for Engineers*, Munich: Hanser, 3ra edición, 2012.

- [2] A. Rios, «Simulation of mixing in single screw extrusion using the boundary integral method,» University of Wisconsin-Madison, Madison, PhD thesis, 1999.
- [3] A. C. Rios y T. Osswald, «Comparative study of rhomboidal mixing sections using the boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements, 24:89–94, 2000.».
- [4] S. Krawinkel, M. Bastian, T. Osswald y H. Potente, «Gleichdrall-doppelschneckenextruder stromungssimulation mit BEM,» *Plastics Special*, vol. 12, n° 30, 2000.
- [5] R. Khayat, A. Derdouri y L. Helbert, «A three-dimensional boundary-element approach to gas-assisted injection molding,» *J. Non-Newtonian Fluid Mech*, vol. 57, pp. 253-270, 1995.
- [6] I. López, O. Estrada y T. Osswald, «Modeling and Simulation of Polymer Processing using the Radial Functions Method,» *Wak Zeitschrift Kunststofftechnik*, vol. 3, n° 2, 2007.
- [7] I. López, «Modeling of Polymer Processing using the Radial Function Method (RFM),» University of Wisconsin Madison, Madison, PhD Thesis, 2009.
- [8] J. H.-O. T.A. Osswald, *Polymer processing: modeling and simulation*, München, Germany: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [9] D. Ramírez, O. Estrada, I. López y T. Osswald, «Simulation of the fountain flow effect by means of the radial functions method (RFM),» *SPE-ANTEC, Annual Technical Conference Proceedings*, 2010.
- [10] D. Houston y J. Holbery, «Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications,» *JOM*, vol. 58, pp. 80-86, 2006..
- [11] W. Chin, H. Liu y Y. Lee, «Effects of Fiber Length and Orientation Distribution on the Elastic Modulus of Short Fiber Reinforced Thermoplastics,» *Polymer Composites*, vol. 9, n° 1, p. 27–35., 1988.
- [12] F. Folgar y C. L. Tucker, «Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 3, n° 2, p. 98–119, April 1, 1984.
- [13] J. H. Phelps y C. L. Tucker, «An Anisotropic Rotary Diffusion Model for Fiber Orientation in Short- and Long-fiber Thermoplastics,» *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 156, n° 3, p. 165–176., February, 2009.
- [14] K. Kurth, D. Ramírez, I. López, N. Rudolph y T. A. Osswald, «Fiber Motion in Fountain Flow and its Relation to Fiber Free Regions at the Surface of Injection Molded Parts,» *SPE-ANTEC Annual Technical Conference Proceedings*, 2011.
- [15] D. Ramírez, L. López y T. A. Osswald, «Flow through a fiber filled polymer through a gate: A mechanistic approach,» de Unpublished article. Proposal for NSF, Natural Science Foundation 2013.
- [16] «A third industrial revolution,» *The Economist*, pp. 3-20, 21 April 2012.
- [17] A. technologies, «<http://blog.itc.mb.ca>,» 15 June 2012. [En línea]. [Último acceso: 5 July 2012].
- [18] B. Wendel, D. Rietzel, F. Kühnlein, R. Feulner, G. Hülder y E. Schmachtenberg, «Additive processing of Polymers,» *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 293, pp. 1-11, 2008.
- [19] J. Williams, A. Adewunmi, R. Scheka, C. Flanagan, P. Krebsbach, S. Feinberg, S. Hollister y S. Das, «Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering,» *Biomaterials*, vol. 26, pp. 4817-4827, 2005.
- [20] X. Li, D. Li, B. Lu, Y. Tang, L. Wang y Z. Wang, «Design and fabrication of CAP scaffolds by indirect solid free form fabrication,» *Rapid prototyping journal*, vol. 11, n° 5, pp. 312-318, 2005.
- [21] J. Winder y R. Bibb, « Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery,» *J Oral Maxillofac Surg.*, vol. 63, n° 7, pp. 1006-1015, July, 2005.
- [22] D. Silva, M. Gerhardt De Oliveira, E. Meurer, M. Meurer, J. Lopes Da Silva y A. Santa-Barbara, « Dimensional error in selective laser sintering and 3D printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction,» *Journal of cranio-maxillofacial surgery*, vol. 36, pp. 443-449, 2008.
- [23] E. Antonov, V. Bagratashvili, M. Whitaker, J. Barry, K. Shakesheff, A. Konovalov, V. Popov y S. Howdle, «Three dimensional bioactive and biodegradable scaffolds fabricated by surface-selective laser sintering,» *Adv. Mater.*, vol. 17, n° 3, 2005.

[24] J. Puentes, T. A. Osswald, S. Schick y J. Berg, «Steps in the Optimization of Pipe and Tubing Extrusion Dies,» Unpublished paper. Proposal for SPE-ANTEC Tech. Papers 2013 and Comsol Conference 2012, Boston.

[25] S. Moss y H. Zweifel, «Degradation and stabilization of high density polyethylene during multiple extrusions.,»

Polymer Degradation and Stability, vol. 25, n° 2-4, pp. 217-245, 1989.

[26] H. Hinsken, S. Moss, J. Pauquet y H. Zweifel, «Degradation of polyolefins during melt processing,» Polymer Degradation and Stability, vol. 34, n° 1-3, pp. 279-293, 1991.