

Estudio de Esfuerzo y Deformación de Piezas de Impresión 3D

Stress and Deformation Study of 3D Printing Parts

Investigación

Dr. Germán Alonso Ruiz-Domínguez, M.C. Rodolfo Ulises Rivera-Landaverde, M.C. Gilberto Orrantia-Daniel, M.C. María de Jesús Tellez-Moroyoqui, Ing. Ángel Adrián Valenzuela-Martínez.
Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Hermosillo, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico S/N, Col. El Sahuaro, C.P. 83170, Hermosillo, Sonora, México. Tel: 01 (662)2606500, Fax: 01 (662)2606500, german.ruizdominguez@gmail.com

Resumen

La manufactura aditiva ha permitido fabricar partes más rápido comparado con los procesos de manufactura tradicional. Lo anterior ha facultado que los equipos de introducción de nuevos productos de las organizaciones industriales utilicen estos procesos no tradicionales para agilizar los procesos de diseño y desarrollo de productos. Sin embargo, el comportamiento estructural y funcional de los prototipos impresos en 3D no ha sido completamente analizado como para sustituir de una forma segura una parte fabricada con procesos tradicionales por una parte fabricada con procesos de manufactura aditiva. Este artículo propone un estudio de las propiedades mecánicas de esfuerzo y deformación de partes fabricadas con FDM (Fused Deposition Modeling) con el fin de establecer reglas de fabricación de estas partes con este tipo de proceso particular y de esta manera ayudar a esa transición. El estudio se desarrolla de acuerdo a la siguiente metodología; primeramente, se procede a la impresión 3D de probetas de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-D698; enseguida, se realizan los ensayos de tensión efectuados en una máquina universal y registran los datos generados; luego, se desarrolla el análisis estadístico de los datos obtenidos y finalmente, se conduce una comparación contra los valores conocidos de las propiedades mecánicas del ABS (Acronitrilo-butadieno-estireno). Los resultados obtenidos permiten establecer la normalidad de datos de los ensayos de tensión y que los datos obtenidos son estadísticamente significativos para continuar los análisis. Se concluye que las piezas impresas en 3D se pueden utilizar como sustitutas a las fabricadas tradicionalmente con las condiciones indicadas como parámetros. Se sugiere un estudio en donde se analice exhaustivamente el comportamiento de las piezas impresas en 3D en condiciones extremas de usos industriales.

Palabras clave: Impresión 3D, ABS, Propiedades Mecánicas, Esfuerzo, Deformación.

Abstract

Additive manufacturing has allowed to manufacture parts in a faster way compared to a traditional manufacturing process. This has enabled to the new product introduction departments (NPI) of industrial organizations to use these non-traditional processes to streamline the design and product development process. However, the structural and functional behavior of 3D printed prototypes has not been completely analyzed as to replace in a safe way a part manufactured with traditional processes by a 3D printed part. This article propose a study of mechanical properties of stress and deformation of 3D printed parts manufactured with FDM (Fused Deposition Modeling) in order to establish rules of manufacture with this type of particular process and thus help this transition. The study is developed according to the following methodology; first, the 3D printed parts specimens were manufactured according to the provisions of the ASTM-D698 standard; then, the tension tests were carried out on a universal machine to generate data, the statistical analysis of data obtained is developed; and finally, a comparison is conducted against the known values of the mechanical properties of the ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene). The obtained results allow to establish the normal data of the tension tests and that the obtained data are statistically significant to continue the analyzes. We concluded that the 3D printed parts can be used as substitute to those traditionally manufactured with the conditions indicated as parameters. A study is suggested in which the behavior of 3D printed parts under extreme conditions of industrial use is analyzed exhaustively.

Keywords: 3D Printing, ABS, Mechanical Properties, Stress, Strain.

Introducción

Los procesos de diseño de productos han evolucionado a lo largo del tiempo pasando de ser procesos de diseñadores individuales a procesos colaborativos donde los equipos de diseño y desarrollo de productos

incorporan personal de casi todos los departamentos de una organización [1]. Dichos equipos de desarrollo identifican los requerimientos de los clientes y los traducen en especificaciones técnicas que el producto final debe de cumplir. En diferentes etapas del diseño existen hitos en donde los equipos de diseño evalúan las alternativas que proponen para verificar si hasta esos momentos cumplen con los requerimientos planteados. Una manera de verificar que los productos cumplen con los requisitos es la elaboración de prototipos. Estos permiten analizar si las soluciones planteadas por el equipo de desarrollo atienden los requerimientos y cumplen las funciones principales del producto final. Sin embargo, la fabricación de prototipos tradicionales implica la utilización de cierta maquinaria y herramientas que son costosas si no están disponibles en el piso de producción, lo que implica la compra y/o fabricación de dicha maquinaria y herramienta, con el consecuente costo y además del largo tiempo de desarrollo de estos elementos.

La utilización de tecnología de manufactura avanzada ha permitido acortar los tiempos y costos de desarrollo. Un ejemplo de lo anterior, son las tecnologías de manufactura aditiva que permiten tener elementos iniciales de forma muy temprana en el desarrollo de productos mediante prototipados rápidos [2]. La impresión 3D es una de las tecnologías modernas de manufactura que ha facilitado significativamente la evaluación y validación de los diseños de los productos.

Sin embargo, se desconoce si las partes fabricadas mediante impresión 3D se comportan estructuralmente como lo hacen sus contrapartes fabricados mediante tecnologías convencionales. Lo anterior, hace que no se tenga la certeza de si un elemento fabricado con impresión 3D pueda trabajar funcionalmente y remplazar a una parte fabricada con procesos de manufactura tradicionales.

El propósito de este artículo es presentar una propuesta para el estudio de las propiedades mecánicas de las partes fabricadas mediante la tecnología de impresión 3D. A lo largo de las secciones presentadas se describirá el trabajo realizado, iniciando con los fundamentos teóricos, después vendrá la exposición de la metodología utilizada, para continuar con la presentación de los resultados alcanzados y se finalizará con las respectivas conclusiones.

Fundamentos teóricos

Este artículo utiliza la prueba de hipótesis para analizar el comportamiento estructural y mecánico de una población de las probetas de piezas fabricadas con manufactura aditiva. La estadística descriptiva “presenta la organización, el resumen y la presentación

de los datos” [3]. A menudo, los datos resultan de una muestra, por lo cual, las decisiones basadas en dicha muestra son sobre una población de la muestra en cuestión; lo cual se llama estadística inferencial.

La manufactura aditiva (MA) se define como el proceso mediante el cual se agrega material, capa sobre capa, para formar objetos, a partir de modelos virtuales creados con la ayuda de software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) [2]. Existen 6 tecnologías básicas de la MA [2]: la estereolitografía (STL, por sus siglas en inglés), el curado por sólido (SGC, por sus siglas en inglés), la manufactura por deposición por goteo (DDM, por sus siglas en inglés), la manufactura por laminado de objetos (LOM, por sus siglas en inglés), el sinterizado selectivo por láser (SLS, por sus siglas en inglés), la impresión 3D (3DP, por sus siglas en inglés) y el modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés). Esta última tecnología extruye un filamento termoplástico que se funde a través de una boquilla y se deposita en forma de hilo de acuerdo a la geometría del objeto, dicho proceso de extrusión se controla mediante una computadora [4]. Generalmente, la boquilla de suministro es capaz de moverse en el plano horizontal, mientras que donde se deposita el material puede moverse verticalmente, de modo que cada sección de la pieza se construye una sobre otra. Como los procesos de la MA son más nuevos que los procesos de tradicionales de fabricación, los resultados de dichos procesos MA no están bien estudiados en la literatura.

Lo establecido al final del párrafo anterior, implica que se debe analizar el comportamiento estructural y funcional de las partes fabricadas con las tecnologías de la MA y compararlas con lo ya establecido para el comportamiento de las piezas fabricadas con la manufactura tradicional. Existen diferentes pruebas para analizar el comportamiento estructural y determinar las propiedades mecánicas de una pieza de un cierto material. Específicamente para las piezas de plástico y materiales similares se encuentran el conjunto de normas ASTM D-638, D-695 y D-790. La primera de ellas es la que se utiliza para este artículo; ya que analiza el comportamiento de una probeta fabricada de plástico para estudiar las propiedades mecánicas de la pieza, cuando se aplica una fuerza de tensión sobre dicha probeta [5].

Es común utilizar las técnicas de diseño de experimentos para caracterizar las propiedades mecánicas de partes fabricadas con Modelado por Deposición Fundida (FDM, por sus siglas en inglés) y hechas del material Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS, por sus siglas en inglés) [6]. Además, se ha empezado a analizar las características mecánicas de

los prototipos fabricados con FDM, y a partir de dichos trabajos, se han propuesto reglas de construcción para el diseño específico de piezas fabricadas con FDM [7]. En otro trabajo, se ha desarrollado un modelo de predicción de comportamiento mecánico de partes fabricadas con plástico, mediante tecnologías de impresión 3D, con el fin de identificar los parámetros óptimos de producción [8]. Se ha empezado a experimentar para examinar el efecto de agregar aditivos al material primario de extrusión en la propiedad mecánica de anisotropía en las partes impresas con FDM [9].

Finalmente, en nuestro país ya se experimenta con este tipo de tecnologías. Específicamente con la fabricación de boquillas agrícolas de riego por aspersión que entreguen gotas más pequeñas, esto con el fin de que las gotas de agua o fertilizante se aprovechen de mejor manera y no terminen en el suelo, sin aprovecharse [10]. Además, se ha analizado la porosidad de piezas obtenidas mediante moldeo de plástico a partir de moldes fabricados con FDM [11].

Materiales y métodos

La metodología utilizada en este trabajo se establece en las etapas generales, (ver figura 1) que se describen a continuación. Para la impresión de las probetas se utilizó una Impresora 3D Makerbot, modelo Replicator II™ de doble cabezal. Se utilizó un filamento de 1.75 mm de diámetro, en material ABS proporcionado por la misma compañía de acuerdo con el protocolo de pruebas propuesto por [5]. Esto resultó en probetas modeladas en un software CAD con geometría en milímetros que se muestra en la figura 2, de acuerdo con el espécimen de Tipo I de la norma ASTM-D638. En lo que respecta a la etapa de ensayos, se utilizó una máquina universal para realizar las pruebas de tensión, siendo el modelo CS Series marca Chatillon (ver figura 3). Debido a que la máquina universal que se utilizará para los ensayos de tensión reporta las cargas en Newtons, se utilizarán las ecuaciones (1) y (2) para determinar el esfuerzo aplicado a la probeta y el módulo de elasticidad de acuerdo a [12].

$$\sigma = F/A \tag{1}$$

$$E = \sigma/\epsilon \tag{2}$$

Una vez realizado lo anterior, para el análisis estadístico de los datos de las pruebas se utilizó una aplicación informática especializada en análisis estadístico como Minitab™. Finalmente, se comparan las inferencias resultantes del análisis estadístico anterior contra el estándar sobre las propiedades del Material ABS cuando se obtienen partes por el proceso tradicional de fabricación de moldeo por inyección. Lo anterior debido a que esta técnica de fabricación es el proceso más común de fabricación de partes de plástico.

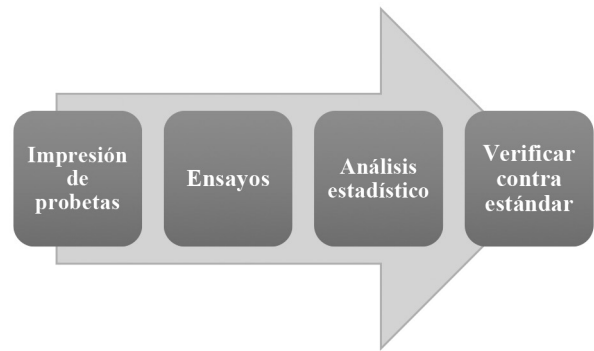


Figura 1. Etapas para el estudio.

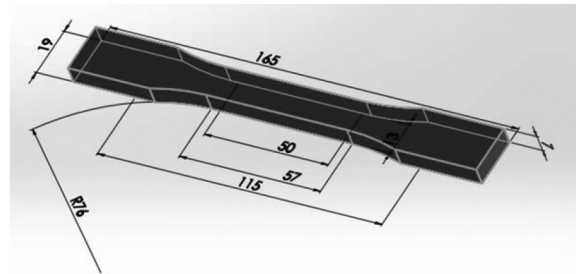


Figura 2. Probeta para estudio de tensión.

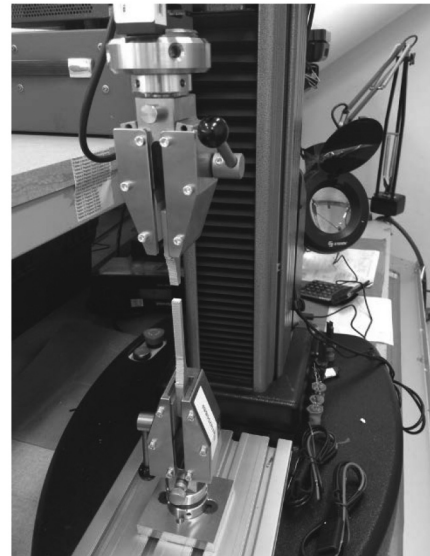


Figura 3. Equipo para estudio de tensión.

Resultados y discusión

La etapa de impresión de probetas tuvo como base la geometría Tipo I establecida en [5]. Además, los parámetros de impresión en la impresora 3D Makerbot Replicator II™ son los siguientes: el material utilizado es un filamento de 1.75 mm de diámetro de ABS de color azul. Dicho material lo suministró el fabricante de la impresora, con lo cual se evitan los problemas de calidad de la materia prima. El espesor de cada capa de material extruido es de 0.25 mm y el espacio entre las capas es de 0 mm. La temperatura a la cual se

calienta la boquilla, que es la temperatura a la cual se funde el material el ABS para extruirse, es de 225 °C. El tipo de relleno es completo, lo cual quiere decir que no hay espacios al interior de la pieza impresa 3D. Se planteó este parámetro de esta manera, ya que, si una parte se obtiene mediante un proceso de fabricación tradicional, se supone que el interior de dicha pieza no presenta huecos en su estructura molecular, dicha característica es la que se desea analizar de manera más detallada. Finalmente, el patrón de relleno es del tipo offset, es decir, el contorno de llenado de material es paralelo al contorno exterior de la pieza final. La tabla 1 muestra un resumen de estos parámetros.

Tabla 1. Parámetros de impresión 3D.

Descripción	Parámetros
Material:	ABS
Filamento	Ø1.75 mm
Color:	Azul
Proveedor:	Makerbot
Relleno:	Completo
Patrón de relleno:	Offset
Espacio entre capas:	0 mm
Espesor de capa:	0.25 mm
Temperatura de boquilla:	225 °C

La etapa de ensayos también se basa en lo establecido en [5]. El procedimiento general es el siguiente: se mide el ancho y el espesor de cada probeta. Se coloca la probeta en las mordazas de la máquina universal, ajustando estas últimas de tal manera que no se presenten deslizamientos del espécimen. Colocar en posición el sensor de extensión. Aplicar la fuerza de carga de tensión sobre la probeta. Registrar las mediciones de carga y esfuerzo de la probeta. La figura 3 muestra una probeta ya rota en la máquina universal. El resultado de las mediciones de la carga y la tensión se muestra en la figura 4, donde el eje de las ordenadas muestra el tiempo de desarrollo de la prueba en cuestión y el eje de las abscisas muestra la carga de la tensión ejercida sobre la probeta. Se utilizó la ecuación (1) para determinar el esfuerzo en MegaPascuales realizado sobre las probetas, así como la ecuación (2) para estimar la deformación.

La tabla 2 presenta una muestra de relación de la deformación de la probeta debido a la carga o esfuerzo de tensión aplicada al espécimen en cuestión. La norma ASTM D-638-14 [5] establece que se requieren al menos 5 especímenes para realizar el ensayo sobre las probetas para determinar la propiedad mecánica de tensión de un material plástico. En total, fueron 45 probetas a las cuales se les realizó el ensayo de tensión, 40 adicionales de lo que indica la norma antes mencionada. El número de muestras adicionales

permite tener más certidumbre respecto a las conclusiones que se obtengan del estudio.



Figura 4. Ejemplo de tensión aplicada a una probeta.

Tabla 2. Variables registradas en ensayo de tensión.

Pro-beta	Esfuer. (MPa)	Def. (%)	Pro-beta	Esfuer. (MPa)	Def. (%)
1	37.9286	5.45	24	41.0440	4.85
2	38.7637	5.33	25	40.7692	4.85
3	38.0495	4.42	26	40.3956	4.85
4	38.8242	5.45	27	39.8462	4.24
5	38.4670	5.45	28	39.8516	4.24
6	38.5659	5.82	29	39.3681	5.45
7	37.1044	5.58	30	41.4286	4.85
8	38.9121	5.21	31	41.0659	5.45
9	38.2912	5.45	32	40.5604	4.24
10	39.0000	4.85	33	41.4176	5.45
11	39.8516	4.85	34	41.1758	4.55
12	40.5824	4.85	35	39.3187	4.85
13	39.5220	4.55	36	37.5275	4.24
14	39.8626	4.85	37	40.4011	4.24
15	40.4615	4.85	38	38.4615	5.15
16	40.3022	4.85	39	38.3187	5.45
17	40.5055	4.85	40	40.8297	5.45
18	39.5714	4.24	41	39.9560	4.55
19	40.3956	4.85	42	39.1044	4.24
20	39.2418	4.55	43	40.6154	4.24
21	39.0879	4.24	44	37.9176	4.85
22	37.5220	4.85	45	38.5714	5.45
23	39.3242	5.45			

La etapa de análisis estadístico implicó el uso del software Minitab™. Primeramente, se utilizó la ecuación (1), para convertir a Megapascuales las unidades. La estadística básica para n = 45 probetas de las dos variables son las siguientes: media $\bar{X}_{ESF} = 39.51$ MPa y desviación estándar $S_{ESF} = 1.139$ MPa para la variable esfuerzo y media $\bar{X}_{DEF} = 4.9024\%$ y desviación estándar $S_{DEF} = 0.4693\%$ para la variable deformación, respectivamente. Enseguida, se analizaron los datos recolectados para identificar si las variables mencionadas de esfuerzo y deformación se comportaban de acuerdo a una distribución normal de probabilidad, bajo un intervalo de confianza de 95% y nivel de error del 5%. Las figuras 5 y 7 muestran este ajuste de manera gráfica, mientras que las figuras

6 y 8 apoyan la afirmación de normalidad de los datos. En lo que respecta a la variable esfuerzo puede concluirse que se ajusta a una distribución normal con la prueba Anderson-Darling. Sin embargo, se puede identificar que la variable deformación no se ajusta a la normalidad mediante esta prueba Anderson-Darling. Por lo que se analizaron los datos de dicha variable mediante la prueba de Ryan-Joiner, la cual es una prueba alternativa en el mismo software y se concluyó que sí se ajustan a la distribución normal. Además, esta afirmación se confirma con la gráfica de caja de la figura 6, donde se observa que la mayor cantidad de datos está alrededor de la media. Con estas dos pruebas se pueden tomar por ciertas las inferencias que se hagan de las dos poblaciones.

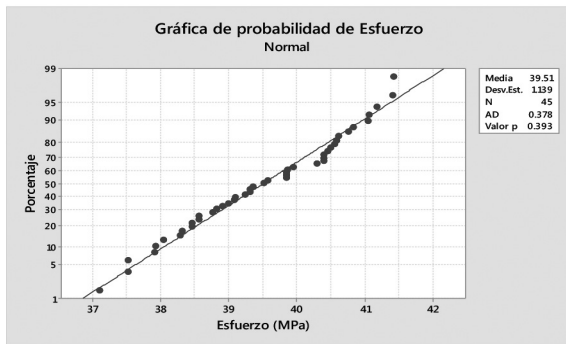


Figura 5. Prueba de normalidad del esfuerzo

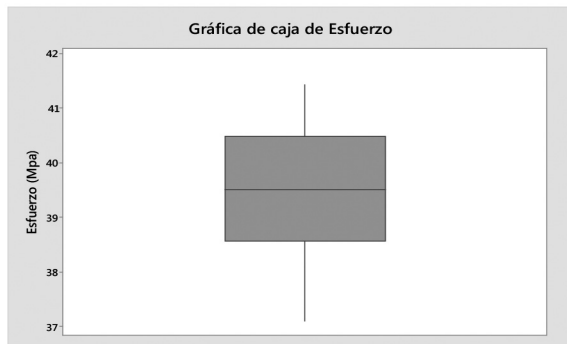


Figura 6. Gráfica de caja del esfuerzo.

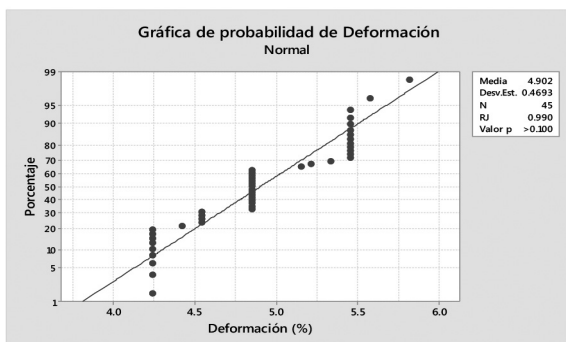


Figura 7. Prueba de normalidad de la deformación.

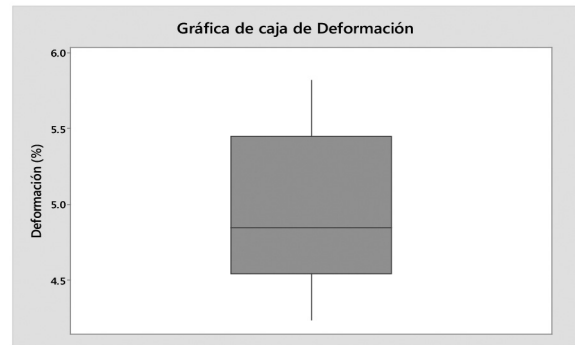


Figura 8. Gráfica de caja de la deformación.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a comparar el comportamiento de las probetas respecto al estándar establecido en [13]. En lo que concierne al esfuerzo último de tensión para el polímero ABS, se señala en dicha referencia que está dentro del rango de 29.6474 a 49.9870 MPa. Se realizó una prueba de hipótesis con una prueba t de una muestra bajo un intervalo de confianza de 95% para analizar el valor $\bar{X}_{ESF} = 39.5130$ MPa, siendo la hipótesis el valor nominal igual a 39.8172 MPa, derivado del citado rango. De lo anterior, resultó que el intervalo de confianza de 95% va de 39.1710 a 39.8550 MPa. El valor p calculado en la prueba es igual a 0.080 y el nivel de significancia es de 0.05, por lo tanto, no existe suficiente evidencia estadística para concluir que la media de este estudio difiere de la media nominal propuesta por la citada referencia. Por lo que atañe a la deformación, la mencionada referencia señala que la deformación al momento de la ruptura está entre un 2.9 y 100%, lo cual arroja una media nominal de 51.45%. En este trabajo la deformación promedio es $\bar{X}_{DEF} = 4.9024\%$ con un valor mínimo de 4.24% y un valor máximo de 5.81%, valores muy por debajo con relación a la deformación nominal, lo que hace que no sea necesario desarrollar un análisis estadístico para esta variable mediante una prueba de hipótesis.

Este estudio sobre las propiedades mecánicas del esfuerzo y la deformación de piezas de ABS fabricadas con FDM, aporta evidencia contundente sobre el comportamiento mecánico de dicho material cuando producen mediante impresión 3D. El número mayor de probetas (45) utilizadas respecto al menos las cinco que requiere la norma ASTM-D698 [5], permite tener mayor confianza estadística de los resultados en este estudio respecto a los 25 especímenes realizados por [8] y a los 32 muestras fabricadas por [7]. Además, la forma de los especímenes de este trabajo es de acuerdo a lo establecido por el Tipo I de la norma antes mencionada, a diferencia de [7], que modificó la forma geométrica y utilizó una forma cúbica. En lo que concierne al esfuerzo, los valores obtenidos

este estudio están dentro de los rangos indicados por [13] y similares a los reportados por [8]; contrario a lo logrado por [6] y [7], donde los valores son menores. Finalmente, la deformación encontrada en este trabajo también se encuentra dentro de los límites establecidos por [13] y similares a los reportados por [6], [7] y [8].

Conclusiones

Las propiedades mecánicas sirven para analizar el comportamiento de una pieza cuando se somete a ciertas condiciones de funcionamiento. En el caso presentado aquí, se puede concluir que lo obtenido mediante los ensayos mecánicos realizados a los especímenes de ABS impresos en 3D mediante técnicas de FDM en este trabajo respecto a las variables esfuerzo y deformación, es similar a los valores nominales señalados en [13], y se encuentra dentro de los rangos y valores estándares de trabajo de acuerdo a las especificaciones de las propiedades mecánicas para el ABS. Por lo tanto, las piezas impresas mediante impresión 3D con FDM con las características y condiciones estipuladas en este estudio, pueden servir como sustitutos a las piezas fabricadas con procesos tradicionales de manufactura. Algunas posibles aplicaciones relacionadas sobre el uso de piezas impresas en 3D mediante técnicas de FDM pueden ser, las siguientes: boquillas de aspersores para riego, propelas de motores marinos, soportes para bastidores de estructuras de paneles de invernaderos, soportes para pantallas y monitores en cajeros automáticos, repuestos para drones, repuestos para equipo de laboratorio, entre otras.

Como trabajo posterior, se analizará el comportamiento estructural de probetas de material ABS fabricadas con el proceso de impresión 3D cuando se aplican fuerzas de compresión, de impacto y de flexión o cuando haya temperaturas extremas sobre dichas probetas.

Referencias

- [1] Ulrich, K. T. y Eppinger, S. D., (2013), *Diseño y Desarrollo de Productos*, México, D.F.: McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- [2] Gibson, I., Rosen, D. y Stucker, B., (2010), *Additive Manufacturing Technologies*, New York, NY: Springer Verlag.
- [3] Montgomery, D. y Runger, G., (2010), *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*, México, D.F.: Limusa Wiley, 2013.
- [4] Filippi, S. y Cristofolini, I., (2010), Using Rapid Prototyping Data to Enhance a KnowledgeBased Framework for Product Redesign, *Journal Scientific Research*, pp. 2-12.
- [5] ASTM, (2014), ASTM D368-14, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International.
- [6] Montero, M., Roundy, S., Odell, D., Ahn, S.-H. y Wright, P. K., (2001), Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments, *Rapid Prototyping and Manufacturing Conference*, Cincinnati, OH.
- [7] Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. y Wright, P. K., (2002), Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS, *Rapid Prototyping*, vol. 8, n° 4, pp. 248-257.
- [8] Crococo, D., De Agostinis, M. y Olmi, G., (2013), Experimental characterization of analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30, *Computational Materials Science*, vol. 79, pp. 506-518.
- [9] Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B. y Roberson, D. A., (2015), Characterizing the effect of additives of ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing, *Additive Manufacturing*, vol. 6, pp. 16-29.
- [10] Ramirez-Cecaldi, M. R., (2018), Fabricación de boquilla agrícola con manufactura aditiva, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, vol. 6, n° 31, pp. 1-16.
- [11] Almanza-Arjona, Y., Ruiz-Huerta, L., Castro-Espinosa, H., Caballero-Ruiz, A., Gómez-García, C. y Hernández-Contreras, A., (2018), Caracterización de porosidad en piezas fabricadas mediante moldeo por compresión, de *XXIV Congreso Internacional de la SOMIM*, Campeche, Camp.
- [12] Hibbeler, R.C., (2017), *Mecánica de Materiales*, Tlanepantla, Edo de México: Pearson.
- [13] Harper, C. C., (2000), *Modern Plastics Handbook*, New York, NY: McGraw-Hill.

Recibido: 13 de diciembre de 2018

Aceptado: 5 de marzo de 2019