



**Editorial
IAI**

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Cuarta Edición

**Medellín - Antioquia
2019**

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

Desarrollo e Innovación en Ingeniería

Cuarta Edición

ISBN: 978-958-52333-0-0

© 2019 Editorial Instituto Antioqueño de Investigación



Desarrollo e innovación en ingeniería [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 4a. ed. --
Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2019.
p. 568 -- (Ingeniería y ciencia)

Archivo en formato pdf (15 Mb). -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-52333-0-0

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones
2. Investigación industrial I. Serna M., Edgar, ed. II. Serie

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1047651

Investigación Científica
ISBN: 978-958-52333-0-0

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
Serie: Ingeniería y Ciencia
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Cuarta Edición: agosto 2019
ISBN: 978-958-52333-0-0
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2019 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido y distribución de esta publicación está autorizado bajo [Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Edición general: Instituto Antioqueño de Investigación IAI
Diseño: IAI, Medellín, Antioquia.
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación
Instituto Antioqueño de Investigación IAI
<http://fundacioniai.org>
[contacto\(AT\)fundacioniai.org](mailto:contacto(AT)fundacioniai.org)

Presentación

Las diferentes disciplinas ingenieriles avanzan cada año en cuanto a desarrollos y descubrimientos que, con el soporte de la ciencia, le brindan mejores alternativas de vida a la sociedad. Aunque ya sea por mal uso o por intereses comerciales, esas alternativas no siempre logran su objetivo. En todo caso, en esta edición de *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* presentamos los resultados del trabajo de una serie de investigadores en áreas como las Ciencias Computacionales e Ingenierías como la Civil, Química, Electrónica, Mecánica, Ambiental e Industrial, y cuyo aporte engrandece al cuerpo de conocimiento de esta disciplina.

El lector podrá encontrar datos, referencias, información y procesos con los que esperamos pueda responder a sus inquietudes en relación con la ingeniería, además de proyectar su trabajo académico e investigativo. Esto es posible gracias a que el contenido de este libro se estructura de forma secuencial por área ingenieril, mostrando los procesos y métodos de investigación que hicieron posible los resultados y que sus autores plasman en cada uno de los capítulos.

Como libro resultado de investigación estamos seguros de que será de gran utilidad para el lector, por la versatilidad del contenido y porque los investigadores y académicos, que publican en esta cuarta edición, se esforzaron al máximo para cumplir con las exigencias de la revisión técnica y, posteriormente, con las observaciones de la revisión científica a la que se sometió el presente texto.

Consiste pues de una obra maravillosa y agradable en su lectura, en la que tanto los profesores como los investigadores y estudiantes encontrarán una fuente de información que, en la medida que analicen y entiendan su contenido, podrán convertir en conocimiento y sacar el mejor provecho del mismo. Los autores de los capítulos estarán atentos a responder sus inquietudes y a entablar, en la medida de lo posible, una relación de trabajo que conlleve a nuevas etapas de trabajo o a nuevas formas de validación de los resultados.

Esperamos entonces que el libro se ajuste a sus necesidades y que se distribuya entre la comunidad, ya que su publicación es libre y, como las ediciones anteriores, se puede descargar sin ninguna restricción desde el sitio de la Editorial Instituto Antioqueño de Investigación.

Contenido

	Pág.
Un modelo de gestión de conocimiento aplicable a las pequeñas y medianas fábricas de software Adriana Maulini, Luciano Straccia, Florencia Pollo C.	5
Revisión de enfoques y comparación de recursos para el análisis de sentimientos en español en Twitter Víctor Rojo, Paola Britos, Florencia Pollo C.	17
Predicción del tráfico de una red inalámbrica basada en redes neuronales artificiales mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt Ramiro Osorio D., Martha Y. Segura R., Mauricio A. Villalba	27
Estudio de perfiles de los tesisistas de las carreras de grado de Informática de la Universidad de Morón, Argentina Marisa Panizzi, Iris Sattolo, Javier Lafont, Nicolás Armilla	37
Hacking en servicios Web a través de redes WiFi abiertas Francisco C. Valle D., Carlos S. Herrera G., Cristian S. Pedraza C.	49
Análisis bibliométrico al desarrollo de software: Tendencias de investigación Francisco Clemente V., Paulo A. Gaona G., David A. Guerreiro P.	58
Estrategia para conectar las necesidades de la industria con los proyectos de aula de los ingenieros de sistemas: Alianza Globant-Universidad de Medellín Samayda Herrera, Liliana González P., Juan Guillermo F., Mario Luna del R.	74
Una aplicación móvil de Realidad Aumentada para la enseñanza de la gestión de almacenes en logística Juan D. Bernal P., Jorge Bacca, Julio M. Daza E.	85
Diseño de un algoritmo para solución de un problema de secuenciación de N tareas en M máquinas mediante la combinación de las reglas de despacho Earliest Due Date y Longest Processing Time en un ambiente de manufactura flexible Germán Cock S., Harold S. Cardona Z., Pedro D. Medina V.	96
Desarrollo de una herramienta computacional para el análisis de deformación debida a una carga perpendicular en estructuras tipo sándwich fabricadas en material compuesto Daniel Agudelo, Jorge E. Gaitán A., Daniela Sacristán M.	105
Caracterización de las propiedades mecánicas a compresión de estructuras tipo sándwich con núcleo celular manufacturadas bajo técnica de deposición fundida Daniel Agudelo, Fabio A. Merchán R., Sebastián Nieto, Sebastián Rodríguez	120
Una revisión técnico-ambiental de la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura residual en Colombia Juan C. Acevedo P., Luis C. Becerra O., Astrid Z. Acevedo R., Fausto R. Posso R.	132
Aplicación del método de balance de energía metal/molde para la determinación del calor latente de solidificación y la evolución de fracción sólida de una aleación Al-7.5%Si Carlos González R., Adrián M. Amaro V.	144
La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura Juan C. Acevedo P., Erika Arenas C., Zulamita Zapata B., Fausto R. Posso R.	153
Efectos de la radiación ultravioleta en la guadua Olga L. Vanegas A., Flor N. Díaz P., Luis Francisco P.	172
Aprovechamiento de condensados de aires acondicionados en climas cálidos para riego automatizado de jardines impulsado por energía solar José C. Galindo G., Carlos E. Arrieta G., Iván Mora U., Iván Maestre A.	177
Vigilancia tecnológica para orientar la enseñanza de la geometría en Ingeniería Civil con apoyo de TIC John J. García M., Sonia J. Moreno J.	195
Análisis del comportamiento a largo plazo de un puente viga cajón construido por voladizos sucesivos en Colombia a partir de deflexiones medidas en campo Luis F. Rincón P., Álvaro Viviescas J., Gustavo Chio C., Edison Osorio B., Carlos A. Riveros J.	203
Comportamiento sísmico de muros delgados de concreto reforzado en zona de amenaza sísmica alta Érica L. Arango P., William Valencia M., Álvaro Viviescas J., Oscar J. Begambre C., Gustavo A. Ospina I.	211
Principios metodológicos para el desarrollo de un plan tecnológico de renovación de balasto de una vía ferroviaria: Revisión sistemática de la literatura Jhoan A. Navarro T., Leonel F. Castañeda H., Silvana Montoya N.	219
Localización automática de vehículos de transporte escolar y monitoreo y control de ingreso y salida de estudiantes mediante la integración de tecnologías GPRS, GPS, Arduino y RFID Félix R. Gómez D., Edgar F. Rodríguez V., Guillermo F. Valencia P.	230
Metodologías para la construcción de un modelo prospectivo para la implementación de redes móviles 5G en Colombia Félix R. Gómez D., Guillermo F. Valencia P., Edgar F. Rodríguez V.	240
Sistema IoT para medición y monitoreo de variables medioambientales en la agricultura inteligente Arnold López S., Christian D. Bohórquez M., Ricardo C. Gómez V.	251

Caracterización de las propiedades mecánicas a compresión de estructuras tipo sándwich con núcleo celular manufacturadas bajo técnica de deposición fundida

Daniel Agudelo¹

Fabio A. Merchán R.²

Sebastián Nieto³

Sebastián Rodríguez⁴

Universidad de San Buenaventura – Colombia

Actualmente existe una gran variedad de materiales y procesos de manufactura que suplen las necesidades de los diferentes sectores industriales a nivel mundial. Los procesos de investigación, innovación y desarrollo generan constantemente nuevos materiales y tecnologías aplicables a los procesos de diseño y manufactura. Como resultado, los sistemas de producción actuales se enfocan en fabricar una mayor cantidad de partes y componentes, consumiendo la menor cantidad de recursos, mientras se mantienen altos estándares de calidad. Estos requerimientos han desencadenado en el desarrollo de técnicas que reducen el desperdicio de materiales, conocidas como manufactura aditiva (MA), las cuales se caracterizan por adicionar material durante el proceso de producción, en lugar de retirar material de un bloque de materia prima. Este tipo de métodos ofrecen flexibilidad durante las etapas de diseño en términos de la geometría de los componentes a fabricar, la cual no es tradicionalmente ofrecida por las técnicas convencionales de fabricación. El desarrollo de estas nuevas técnicas ha motivado la presente investigación, la cual consiste en la fabricación de probetas de material termoplástico a través de técnicas de modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés), el desarrollo de ensayos mecánicos y el análisis de los resultados obtenidos. Los especímenes fabricados son del tipo sándwich con un núcleo formado por una estructura celular tipo honeycomb. Los resultados obtenidos demostraron que las estructuras fabricadas en material termoplástico con la técnica FDM, tienen una alta resistencia estructural a cargas de compresión, lo que permite que sean consideradas en múltiples aplicaciones industriales, gracias además a su bajo costo de manufactura y baja densidad.

1. INTRODUCCIÓN

En los procesos actuales de fabricación de componentes, las técnicas de manufactura aditiva han ganado terreno y han sido implementadas en grandes industrias aeronáuticas como la Airbus, donde su diseño A350 XWB contó con más de 1000 componentes fabricados bajo la técnica FDM [1] la cual es uno de los procedimientos más populares en la actualidad, ampliamente conocida como impresión 3D. Una de las ventajas de este método de producción es que permite la fabricación de partes con geometrías complejas sin requerir el uso de herramientas especializadas y la intervención humana [2]. Esta tecnología ha sido impulsada y utilizada desde el año 2009 cuando la patente del FDM desarrollada por Scott y Lisa Crump expiró en dicho año [3].

Desde ese momento, se ha implementado en múltiples industrias como salud y bienestar, equipamiento industrial, construcción, artículos electrónicos, automóviles, sector aeroespacial y energético [4]. El sector aeroespacial específicamente, implementa esta tecnología para la fabricación de partes y componentes capa por capa con base a un modelo 3D, evitando así el uso de manufactura sustractiva y formativa [5], los cuales son integrados en aeronaves de transporte de pasajeros, aeronaves militares, aplicaciones espaciales y sistemas de misiles. Este método ofrece ventajas como la posibilidad de producir geometrías complejas, la reducción de costos y la implementación de materiales de altas prestaciones a través de tiempos de manufactura cortos [6]. No obstante, este procedimiento nace a partir de la implementación de materiales poliméricos, gracias a sus características físicas y químicas que permiten moldear a bajo costo la materia prima utilizada. La combinación de esta tecnología usando materiales plásticos ha encontrado nicho en la creciente industria de las aeronaves no tripuladas, incrementando el espectro de aplicaciones en la industria aeroespacial [7] – [13].

En el país son pocos los estudios enfocados al estudio de las características y aplicaciones de esta reciente tecnología, por tal motivo, la presente investigación se enfocó en determinar las características mecánicas de estructuras fabricadas a través de técnicas de manufactura aditiva (deposición fundida) y que están sometidas a cargas de compresión. El material seleccionado es el Ácido Poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) debido a su popularidad entre los usuarios y a que es un material biodegradable, de bajo costo, buena rigidez y resistencia, buena precisión dimensional y larga vida útil [14] – [18]. Los ensayos mecánicos desarrollados se ajustaron a normativas estándar de materiales de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) orientados a la caracterización de probetas bajo la acción de cargas de compresión. La norma ASTM C365 deriva un amplio rango de conceptos en relación con materiales de núcleo utilizados en estructuras tipo sándwich como materiales porosos, espumas, estructura en forma de panel de abeja (honeycomb) en aluminio y aramida, entre otros [19]. Dos geometrías diferentes del tipo honeycomb fueron sometidas al ensayo y los resultados obtenidos se presentan en el presente documento, en términos del esfuerzo último de compresión plano y el módulo de compresión plano. Por último, se

¹ dagudelo@usbog.edu.co

² fmerchan@usbog.edu.co

³ asnieto@academia.usbbog.edu.co

⁴ srodriguezmelom@academia.usbbog.edu.co

realizó la comparación entre materiales que se utilizan en la industria como el Aluminio y Nomex para honeycomb, con valores derivados de experimentaciones realizadas por la compañía HEXCEL [20], se compararon los valores de esfuerzo último y módulo de compresión para dos tamaños de celda estipulados. Los resultados presentados son válidos para una referencia específica del material termoplástico suministrado por el proveedor Prusament y para geometrías que han sido fabricadas y probadas bajo las condiciones especificadas en este documento.

Sin embargo, las técnicas de MA conllevan nuevos desafíos durante las etapas de diseño llevando a los ingenieros a formular sus conceptos teniendo en cuenta las particularidades, beneficios y limitaciones de este nuevo enfoque de producción, enfocado en el desarrollo de técnicas que permiten implementar nuevos materiales en cadenas de producción [21] – [23].

2. MÉTODO

La investigación se enfoca en determinar las características mecánicas de probetas tipo sándwich fabricadas en PLA sometidas a ensayos destructivos a compresión, el desarrollo de dichos ensayos se basa en los procedimientos, recomendaciones e instrucciones que estipula la norma ASTM C365. Para tal fin, se diseñó un protocolo de manufactura, control de calidad y de ensayos destructivos para determinar las variables presentes durante el desarrollo de la investigación. Inicialmente, se determinó en el protocolo de manufactura un estándar en los valores de configuración para el proceso de impresión, el cual fue designado en CATIA arrojando dos configuraciones de especímenes. A continuación, se desarrollaron pruebas de impresión para encontrar los parámetros de impresión adecuados. La geometría de los especímenes se estableció mediante las restricciones estipuladas en la norma ASTM C365. Para este estudio se utilizó un método de prueba estabilizado para el núcleo, el cual consiste en el uso de superficies continuas adheridas en la parte inferior y superior del núcleo, esto con el fin de evitar aplastamiento local de algunas celdas del núcleo, adicional a ello debido a que normalmente en la industria aeroespacial las pruebas a compresión son realizadas con elementos de prueba estabilizados [19].

La cantidad de especímenes fabricados está acorde con los requerimientos establecidos por la norma de ensayos ASTM C365, teniendo en cuenta las variables propuestas y descritas a lo largo de esta misma [19]. Se desarrollaron probetas con dos tamaños de celda de estructuras celulares tipo honeycomb con el mismo espesor de pared, altura de celda, altura de capa y temperatura de extrusión. Para cada configuración geométrica se fabricó un mínimo de cinco probetas conforme a la especificación de normativa.

2.1 Características de celda

La geometría definida para una sola celda del honeycomb se considera como un prisma hexagonal como se muestra en la Figura 1, las características inherentes para una sola celda se incluyen en la Tabla 1. La relación de aspecto (A_r) es el cociente entre el valor de la altura (H) de la celda y el valor de longitud de vértice (L) [24].

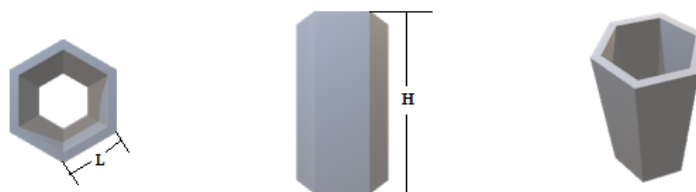


Figura 1. Prisma hexagonal

Tabla 1. Características de celda

Geometría	Caras	Aristas	Vértices	Volumen	Área Superficial
Prisma Hexagonal	8	18	12	$\frac{3\sqrt{3}}{2}L^3 A_r$	$3\sqrt{3}L^2(1 + 2A_r/\sqrt{3})$

2.2 Densidad relativa y nominal

La densidad relativa de una estructura celular es el parámetro que determina las prestaciones que puede ofrecer la estructura celular bajo la condición de trabajo requerido. La densidad relativa se define como el cociente de la densidad del material (ρ^*) el cual conforma el honeycomb, sobre la densidad del sólido o núcleo (ρ_s). A medida que aumenta la densidad relativa de la estructura celular, mayor será el esfuerzo a compresión máximo que podrá soportar, independientemente del tipo de material utilizado [24]. El cálculo de la densidad relativa para la celda de una estructura celular hexagonal prismática se da mediante la ecuación (1).

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{4}{3\sqrt{3}} \frac{t^2}{L^2} \left\{ 1 + \frac{3}{2A_r} \right\} \quad (1)$$

Por otro lado, el cálculo de la densidad nominal del panel se establece mediante el volumen de la estructura celular y su peso, el cual depende de la densidad del material PLA utilizado para fabricar los especímenes [24].

2.3 Propiedades del honeycomb en el plano (*out-of-plane*)

Cuando se consideran las propiedades de una estructura celular tipo honeycomb en el plano denominado como “*out of plane*”, es preciso resaltar que una carga uniaxial se aplica en la dirección al eje Z, como se visualiza en la Figura 2.

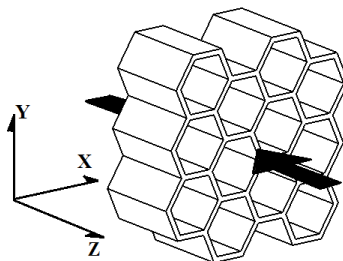


Figura 2. Carga de compresión aplicada en dirección al eje Z siendo paralela a la orientación de celda

Al aplicar dicha carga de compresión sobre el plano en cuestión, el comportamiento de las paredes de las celdas será análogo a la dirección de carga aplicada, para este caso, las paredes se comprimen por lo cual los valores de módulo de elasticidad y esfuerzos son mucho más grandes en comparación a estructuras celulares cargadas en el plano (*in plane*). Estas características permiten el diseño de estructuras tipo sándwich para diversas aplicaciones, algunas de ellas centradas en el campo aeroespacial, como por ejemplo superficies de control, palas de rotores y superficies sustentadoras [9], [11], [12].

2.4 Manufactura de modelado por deposición fundida (FDM)

Una máquina de control numérico que utiliza la técnica por deposición fundida debe poder controlar las características de la impresión, tales como temperatura de extrusión, temperatura de plataforma, posicionamiento de plataforma, densidad de relleno, velocidad de impresión, altura de capa, selección y configuración de patrón de material de soporte, entre otras. Todas estas particularidades son controladas por medio de un software de código compatible con la máquina. Para la presente investigación se utilizó uno de código abierto denominado *FlashPrint*, este software se encarga de convertir cualquier modelo 3D dado en formato STL en un formato *Gcode*, el cual se exporta hacia la impresora 3D.

La manufactura aditiva produce objetos en una sucesión de capas desde la cara inferior, hacia arriba. El termoplástico es fundido y depositado por un extrusor en capas sucesivas conservando la altura determinada por el diseñador. El tiempo de impresión está relacionado con la altura de capa, la velocidad de alimentación y densidad de relleno, además del tamaño y complejidad de las piezas a fabricar. El modelado por deposición fundida es una tecnología que permite realizar piezas con complejas geometrías, aunque existen algunas restricciones acerca de las características de impresión como el correcto espesor de filamento, desuniones entre capas de material depositado y residuos de carbono en el extrusor por elevadas temperaturas. En la Figura 3 se presenta el trabajo desarrollado por el extrusor durante la fabricación de los especímenes.

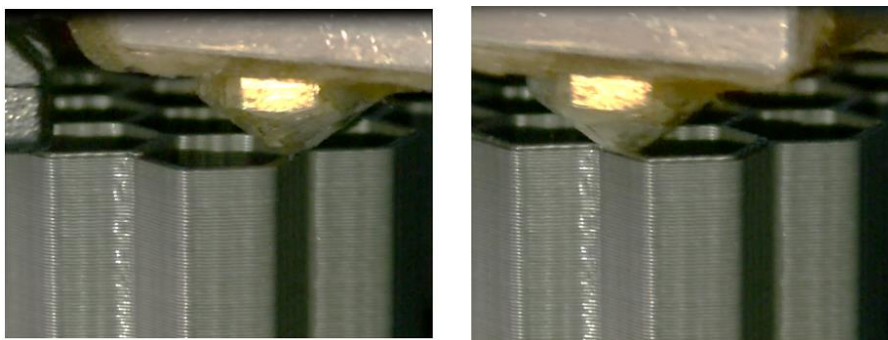


Figura 3. Proceso de FDM para construcción de celdas en honeycomb

2.5 Normativa ASTM C365

La norma ASTM C365 / C365 M-16 establece los parámetros y procedimientos para someter núcleos utilizados en estructuras tipo sándwich a una carga uniaxial de compresión, con el fin de poder determinar las propiedades mecánicas del núcleo. A partir de la prueba se pudo determinar el módulo de compresión y el esfuerzo de compresión

último para cada una de las probetas. Para poder efectuar el desarrollo satisfactorio de la prueba, la norma sugiere utilizar por lo menos cinco especímenes por cada configuración geométrica. Además, según el documento de estandarización para pruebas a núcleos de estructuras tipo sándwich establecido como un documento “*Military Standard*” MIL-STD-401B [25], el número de especímenes seleccionado depende de las condiciones que requiera el ente experimentador bajo el diseño experimental estipulado, en el cual para este caso se establece en el numeral 8.1 de la norma ASTM C365. Se estableció fabricar siete especímenes por cada configuración específica, en caso de presentarse errores en la impresión, la cual está en función al tamaño de celda seleccionado.

Un parámetro esencial para la adquisición de datos precisos en las pruebas experimentales es establecer la geometría final del espécimen. La norma limita ciertas características como el número de celdas que debe tener el honeycomb por espécimen, el tamaño de celda y el área transversal total de prueba que está en función al tamaño de celda seleccionado. En la Tabla 2, se establecen las áreas mínimas que recomienda la norma para los tamaños de celda más comunes utilizados en la industria. Por consiguiente, dichas áreas están establecidas para poder probar un número mínimo de celdas por espécimen las cuales son 60 celdas [19].

Tabla 2. Área transversal recomendada para espécimen de prueba [19]

Celda Mínimo (mm)	Celda Máximo (mm)	Área Transversal Mínima (mm ²)
.....	3.0	625
3.0	6.0	2500
6.0	9.0	5625

Por otra parte, la norma requiere que los revestimientos (*facing*) de la probeta deben ser paralelos entre sí y deben formar un contacto superficial uniforme sobre toda la dimensión del núcleo, de modo que sean perpendiculares a los lados perimetrales del núcleo.

2.6 Diseño de especímenes de prueba

El diseño de los especímenes se realizó por medio de dos softwares de diseño asistido. Inicialmente se utilizó el software de código abierto OpenSCAD para generar la geometría del núcleo de honeycomb. Luego, con la ayuda de CATIA se completó el diseño de la probeta agregando los revestimientos superior e inferior y se establecieron las dimensiones de las probetas para dar cumplimiento a las exigencias de la norma de ensayos implementada. A partir de pruebas piloto de fabricación, se determinó que las dimensiones de las celdas de la estructura interna de las probetas serían de 3/8 y 1/4 de pulgada, ya que la máquina de impresión 3D puede fabricar adecuadamente dichas estructuras, debido a sus limitaciones respecto al diámetro de la boquilla del extrusor. En la Tabla 3 se describen los aspectos geométricos de cada núcleo utilizado para el desarrollo del proyecto.

Tabla 3. Propiedades geométricas de núcleos fabricados

ID Especimen	Tamaño Celda (mm)	Área Transversal Especimen (mm ²)	Celdas
A	9,525	6453,584	120
B	6,35	5766,377	270

El diseño del espécimen A parte del tamaño de celda de 9,525 milímetros o 3/8 de pulgada. En la Figura 4 se presenta una vista isométrica del espécimen A. La altura del núcleo debe ser mayor a 2 mm y menor a 20 cm [25]. Para este caso se utilizó las características geométricas disponibles comercialmente, con el fin de comparar los resultados obtenidos con materiales tipo sándwich utilizados en la industria [20]. Acorde al numeral 8,4 de la norma ASTM implementada, la máxima desviación bidireccional permitida en la altura del núcleo es del 0,05%. Acorde al numeral 8,3 de la misma referencia, la tolerancia bidireccional permitida a lo largo y ancho del espécimen es del 1% [19]. El proceso de control de calidad implementado después de la fabricación del lote de probetas permitió corroborar que todas las geometrías cumplieran con los requisitos de la norma.

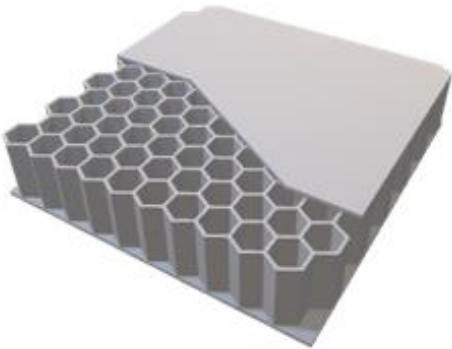


Figura 4. Vista de corte isométrica del espécimen A generada en CATIA V5

El diseño del espécimen B parte del tamaño de celda de 6,35 milímetros o 1/4 de pulgada. Se utilizaron los mismos atributos geométricos aplicados al lote A. Al finalizar la fabricación de los especímenes, el proceso de control de calidad permitió determinar que las dimensiones de las probetas se encontraban en el rango de tolerancia permitido por la norma de ensayo utilizada. En la Figura 5 se presenta una vista isométrica para el espécimen B.

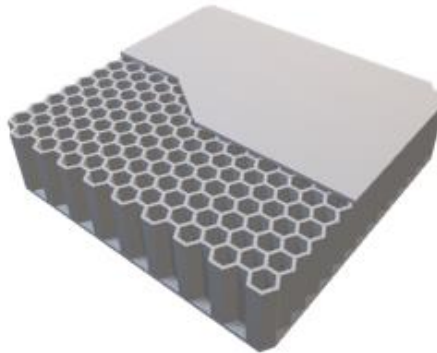


Figura 5. Vista de corte isométrica del espécimen B Generado en CATIA V5

2.7 Proceso de fabricación de especímenes

A continuación, se presentan los valores más importantes establecidos de las variables de impresión de las probetas, con el fin de obtener un proceso de impresión estandarizado para cada lote. La altura de capa se estableció como 0,18 mm; la temperatura del extrusor se mantuvo constante a un valor de 218°C; la temperatura de la plataforma fue de 50°C; la velocidad de alimentación del extrusor se configuró a 60 mm/s; la velocidad de desplazamiento del extrusor fue de 80 mm/s. Para la fabricación de los revestimientos inferior y superior se estableció un total de 3 capas de material. Para ninguna de las probetas se utilizó material de soporte. Se imprimieron 14 especímenes en total para las dos configuraciones establecidas. En la Figura 6 se muestra el lote de impresión correspondiente a la configuración tipo A. En la Figura 7 se muestra el lote de impresión para los especímenes tipo B. Los especímenes impresos fueron almacenados en un contenedor para evitar el contacto directo con los rayos del sol y cubiertos con gel de sílice para evitar la acumulación de humedad dentro del contenedor.

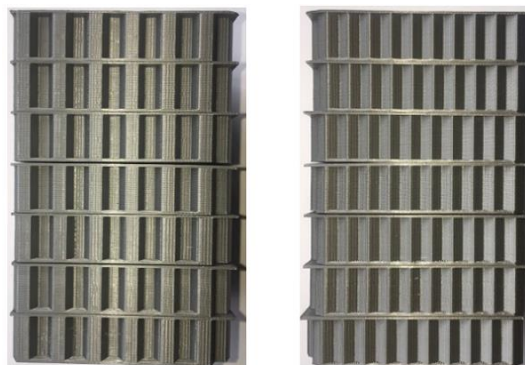


Figura 6. Lote de impresión A en PLA

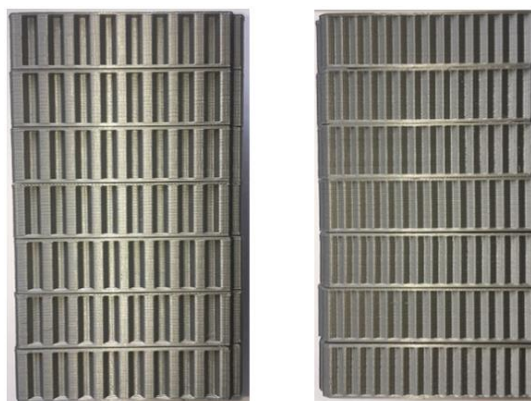


Figura 7. Lote de impresión B en PLA

Fue preciso establecer un periodo de enfriamiento de la plataforma de impresión antes de retirar cada espécimen, debido al comportamiento del material por los cambios de temperatura. De hacerlo de forma prematura, la estructura interna de la probeta tendería a contraerse debido al choque térmico y las dimensiones geométricas variarían,

afectando las propiedades mecánicas del espécimen fabricado. Para sobreponerse a esta dificultad, se desarrolló un análisis de la tasa de enfriamiento de la zona de impresión a través de un sensor FLIR T300. Los resultados obtenidos a través de 48 fotografías tomadas durante 27 minutos después de concluir la impresión, se presentan en la Figura 8. Para cada fotografía se registraron 4 áreas de referencia las cuales miden la temperatura en los extremos de la plataforma. El procesamiento de las imágenes se realizó mediante el software FLIR Tools. Los parámetros para la adquisición de las fotografías térmicas y configuración de la cámara fueron los siguientes:

- Emisividad: 0,86
- Temperatura de reflexión: 50 °C
- Distancia: 1 metro
- Temperatura Atmosférica: 17 °C
- Temperatura óptica externa: 20 °C
- Transición óptica externa: 1
- Humedad Relativa: 68 %
- Tipo de Lente: FOL 10 mm

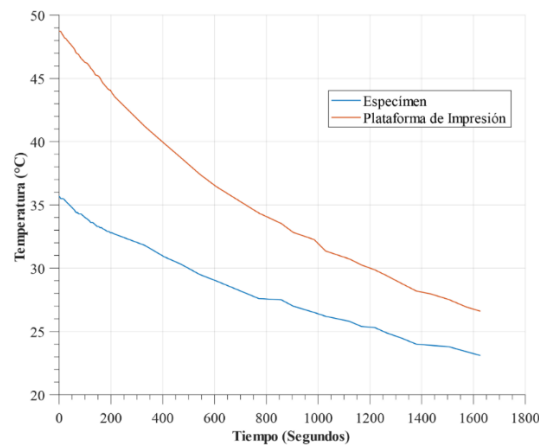


Figura 8. Tasa de enfriamiento del espécimen y plataforma de impresión

2.8 Control de calidad de los especímenes

El control de calidad se divide en dos fases. Para la primera fase se realizó una inspección visual de cada espécimen, este proceso incluyó el control y vigilancia del proceso de impresión, para prevenir que se presentaran fallas durante la deposición del material PLA para la conformación del espécimen. Con el fin de ilustrar errores presentes en el proceso de fabricación, en la Figura 9(a) se muestra un defecto menor en la deposición del material en el revestimiento superior durante pruebas piloto de impresión, lo que llevo a evaluar parámetros como el número de capas y su espesor, porcentaje de relleno y el multiplicador de extrusión. Del mismo modo, en la Figura 9(b) se ilustra un defecto mayor encontrado durante pruebas de impresión referente a la separación de los filamentos de capas adyacentes, evaluando así parámetro como la altura de las capas y temperatura de impresión.

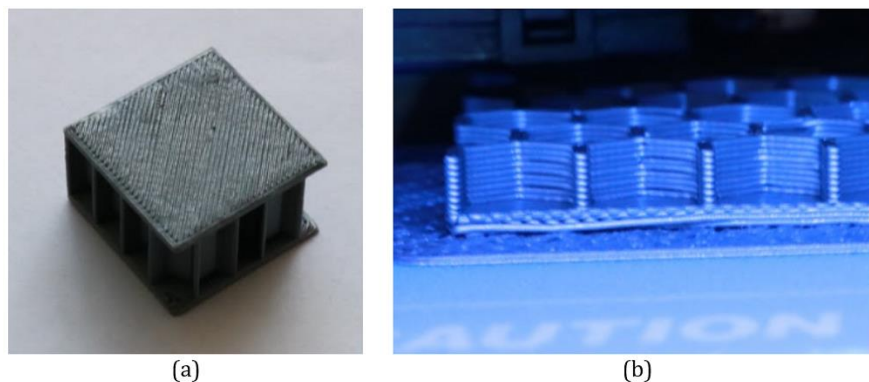


Figura 9. Defecto menor y mayor durante pruebas de impresión

A seguir, se llevó a cabo la inspección visual de cada espécimen para determinar los posibles defectos de impresión generados. Las probetas que presentaran desviaciones superiores de sus características geométricas (largo, ancho y alto), mayores a las tolerancias establecidas por la norma, debían descartarse [26]. Adicionalmente, la presencia de defectos mayores como la separación de las capas de filamentos desencadenaría en el descarte de la muestra. Sin embargo, ninguno de los especímenes violó estos requisitos, logrando así superar el proceso de control de calidad llevado a cabo.

2.9 Pruebas a compresión

Las pruebas a compresión se desarrollaron utilizando la máquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU. Las condiciones de la prueba se configuraron teniendo en cuenta los requerimientos de la norma ASTM C365. La velocidad de desplazamiento del cabezal de compresión fue de 2 mm/min. La Figura 10 muestra la secuencia de la prueba antes, durante y después de comprimir el espécimen.

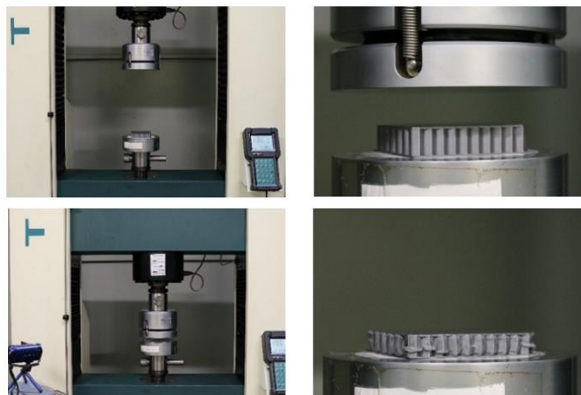


Figura 10. Prueba y posicionamiento del espécimen en maquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU

2.10 Cálculo de propiedades mecánicas del espécimen

La norma ASTM C365 exige determinar el esfuerzo último de compresión plana, el esfuerzo de compresión al 2% de la deformación total del espécimen y el módulo de compresibilidad del espécimen. La magnitud de estos valores se toma mediante la información proporcionada por la maquina universal de ensayos y por las ecuaciones planteadas en la norma ASTM C365 en el numeral 13 y descritas a continuación [19].

- **Esfuerzo último de compresión plana.** El esfuerzo último de compresión plana se calcula mediante la relación entre la carga última o máxima carga soportada por el espécimen antes de alcanzar la falla y el área transversal del espécimen. El valor de la carga máxima se determina mediante la gráfica de esfuerzo-deformación en la cual se puede evidenciar el momento en que el espécimen falla plásticamente o las celdas colapsan plásticamente. El área transversal del espécimen se tomó de las mediciones geométricas realizadas para cada espécimen en el control de calidad estipulado. Aplicando la ecuación (2) se determina el esfuerzo último del espécimen a analizar.

$$F_z^{fcu} = P_{max}/A \quad (2)$$

Donde:

F_z^{fcu} = Máxima esfuerzo a compresión plana [MPa].

P_{max} = Carga ultima previa a la falla [N].

A = Área transversal del espécimen [mm²].

- **Esfuerzo al 2% de la deformación.** La norma ASTM C365 exige determinar el esfuerzo que soporta el espécimen cuando se haya alcanzado un valor igual al 2% de la deformación en función del valor de la altura inicial del espécimen. En los reportes de la prueba de cada espécimen se registran los valores de carga al 2 % de deformación para cada espécimen probado mediante el análisis de la gráfica de esfuerzo-deformación. El esfuerzo es calculado con la Ecuación (3).

$$\sigma_z^{fc0,02} = P_{0,02}/A \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_z^{fc0,02}$ = Esfuerzo de compresión plana al 2% de deflexión [MPa].

$P_{0,02}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,02}$ [N].

A = Área transversal del espécimen [mm²].

- **Módulo de compresibilidad.** La norma ASTM C365 requiere calcular el módulo de compresibilidad del espécimen a través de una expresión que permite conocer el *Chord Modulus* o módulo secante del comportamiento elástico de la probeta, esta ecuación se basa en la diferencia de dos puntos de esfuerzo aplicado en la zona elástica del espécimen representados en la gráfica de esfuerzo-deformación, inicialmente la norma ASTM C365 estipula los dos valores de deformación unitaria en un rango de 0.3 y 0.1 %, estos valores han sido seleccionados para representar el comportamiento inicial de la gráfica de esfuerzo-deformación teniendo en cuenta la corrección realizada por efectos de asentamiento o ajuste de holgura del espécimen al momento de aplicar la carga de

compresión. Este comportamiento se conoce como *toe compensation* [19] y se define como la corrección realizada a la gráfica donde se estipula un punto de deformación porcentual cero al instante donde el comportamiento elástico del material tienda a comportarse linealmente. Para materiales que presenten un comportamiento no lineal en la zona elástica, es necesario realizar una corrección en la zona del comportamiento elástico para calcular el módulo. En la Ecuación (4) se muestra la expresión utilizada para calcular el módulo de compresibilidad.

$$E_z^{fc} = \left((P_{0,07} - P_{0,04})t \right) / \left((\delta_{0,07} - \delta_{0,04})A \right) \quad (4)$$

Donde:

E_z^{fc} = Módulo de compresibilidad del espécimen [MPa].

t = Espesor del espécimen medido previo a la prueba [mm].

$P_{0,07}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,07}$, [N].

$P_{0,04}$ = Carga aplicada correspondiente al $\delta_{0,04}$, [N].

$\delta_{0,07}$ = Valor de deflexión registrada tal que δ/t es cercano al 7 %.

$\delta_{0,04}$ = Valor de deflexión registrada tal que δ/t es cercano al 4 %.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas destructivas a compresión en estructuras celulares tipo honeycomb para las dos configuraciones geométricas utilizadas. En las gráficas de esfuerzo-deformación de los lotes de probetas A y B, se evidencia el comportamiento elástico y plástico de los especímenes, obtenidas después de someterlos a carga de compresión en la máquina universal de ensayos.

3.1 Propiedades mecánicas de los especímenes del lote A

Siete especímenes fueron sometidos a pruebas de compresión plana o tipo *flatwise*. La norma ASTM C365 requiere al menos 5 pruebas válidas para obtener resultados confiables respecto a las características mecánicas de la configuración sometida a prueba. En la Figura 11 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación con la deformación unitaria porcentual de todos los especímenes probados. Como se puede observar, el comportamiento elástico de los especímenes A1 hasta el A6 tienden a tener el mismo valor para el módulo de compresión. Sin embargo, el espécimen A7 presentó una deformación no uniforme, concentrándose en una esquina del espécimen y por ende la estructura del honeycomb falló bajo una condición de carga menor que el resto de los especímenes, dicho comportamiento pudo deberse a factores de impresión como la velocidad de impresión, temperatura del extrusor, entre otras, adicional a ello una falla a compresión no uniforme del núcleo de honeycomb es un modo de falla no aceptable, por ende se considera un espécimen invalido [19].

Adicionalmente, se puede apreciar que el esfuerzo último alcanzado por el espécimen A4 tiene un valor menor en comparación con los especímenes A1, A2, A3, A5 y A6. Se puede evidenciar que se presenta en el rango porcentual de deformación entre el 10 al 18 %, la zona plana de esfuerzo mecánico en la cual el valor de esfuerzo tiende a permanecer constante, por encima de la temperatura de transición vítrea el termoplástico se deforma de manera plástica [27], esto debido al calentamiento que sufre el material durante la deposición. Durante el proceso de control de calidad aplicado antes de la prueba, el espécimen A4 presentó un defecto crítico que posiblemente ocasionó que el valor de esfuerzo último soportado por el espécimen A4 estuviera fuera de la tendencia y por ello fuera descartado de igual forma que el espécimen A7.

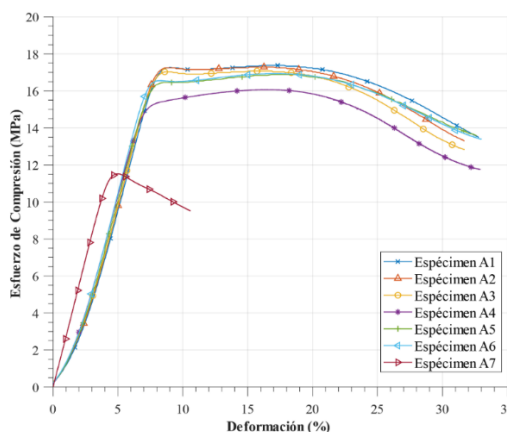


Figura 11. Esfuerzo de compresión vs deformación lote A

En la Figura 12 se muestra el comportamiento mecánico de los especímenes del lote A seleccionados como las muestras representativas de los ensayos mecánicos efectuados.

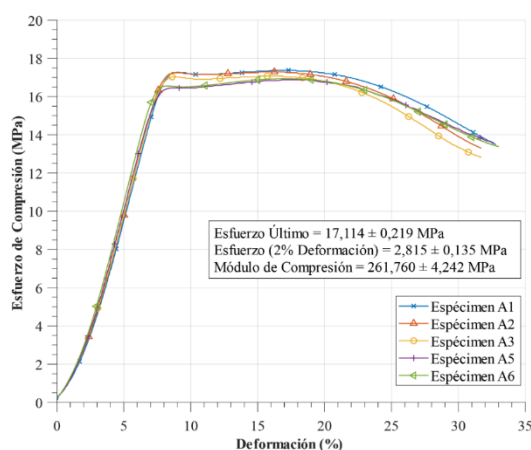


Figura 12. Esfuerzo de compresión vs deformación de probetas seleccionadas del lote A

En la Tabla 4 se registra el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación del esfuerzo último de compresión, del esfuerzo al 2 % de deformación y del módulo de compresión de los siete especímenes probados. El módulo de compresión de las probetas se calculó como la pendiente de la región elástica obtenida en las gráficas, en un intervalo entre el 4% y 7% de deformación unitaria, ya que en este intervalo se presentó un comportamiento lineal de la función.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los especímenes seleccionados del lote A

Especímen	F_z^{fcu} (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	E_z^{fc} (MPa)
Promedio Simple	17,114	2,8415	261,760
Desviación Estándar	0,219	0,136	4,242
Coeficiente de Variación (%)	1,280	4,780	1,620

3.2 Especímenes del lote B

Siete especímenes fueron sometidos a prueba. En la Figura 13 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación con la deformación unitaria de todos los especímenes probados. Se puede observar que el compartimiento elástico tiende a ser constante para todos los especímenes. Por otro lado, se puede evidenciar que el comportamiento plástico de los especímenes tiende a ser constante cuando se comienza a alcanzar el esfuerzo máximo, hay que resaltar que en dicha zona se presentan pequeñas variaciones del esfuerzo donde tiende a comportarse en alguna secciones de la curva como una oscilación o a permanecer constante y luego saltar a un valor mayor de esfuerzo, este comportamiento concuerda con la teoría en la cual se infiere que los honeycombs cargados a compresión en el plano *out-of-plane* cuando sobrepasan su límite elástico, las columnas o celdas comienzan a colapsar gradualmente generando efectos de asentamiento dentro del honeycomb, por lo cual, se generan cambios repentinos del esfuerzo hasta llegar al valor máximo. Por último, se puede apreciar que el fenómeno de densificación de las celdas no se presenta, esto puede explicarse debido a que las columnas o celdas están conformadas por sucesiones de capas de material las cuales en algún punto tenderán a colapsar o doblarse entre sí y como consecuencia el desprendimiento de dichos filamentos no permitirá que el material tienda a acumularse en bucles y aumente de manera repentina el esfuerzo como ocurre en estructuras celulares fabricados en materiales como aluminio [24].

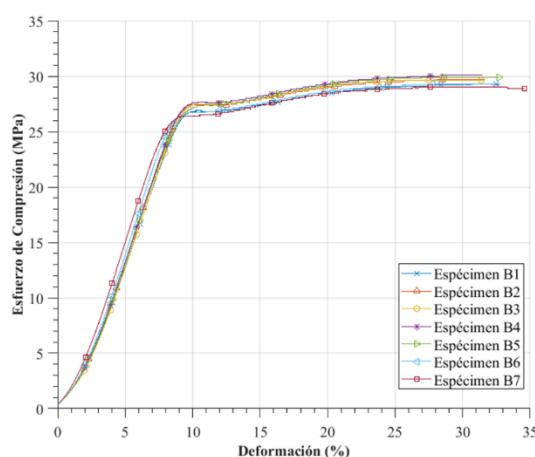


Figura 13. Esfuerzo de compresión vs deformación lote B

De igual forma, se descartaron los especímenes que no estuvieron dentro de la tolerancia estipulada por la desviación estándar del total de valores obtenidos para las tres características mecánicas de las probetas probadas. Se

4.2 Comparación de propiedades de especímenes del lote B

Igual que con el lote anterior, se compararon las características mecánicas de las probetas del lote B con las propiedades de estructuras fabricadas y probadas por la empresa Hexcel y que tienen un tamaño de celda igual a 1/4 de pulgada y los resultados se muestran en la Tabla 7. Se pudo apreciar que el módulo de compresión de las estructuras constituidas de aluminio es mayor en comparación con el módulo de estructuras fabricadas en termoplástico PLA. Sin embargo, el esfuerzo último es mayor para las probetas fabricadas en PLA. Sin importar el material ni la referencia comercial de la distribución de 1/4 de pulgada, se aprecia que en general logra desarrollar un mayor módulo de compresión y soportar un esfuerzo último mayor, esto debido a una mayor densidad de celdas en la composición estructural.

Tabla 7. Comparación de propiedades mecánicas de estructuras celulares del lote B

Propiedad	PLA	CR III 5052	CR III 5056	HRH-10
Densidad Nominal (gr/cm^3)	1,434	0,096	0,083	0,064
Modulo (MPa)	356,267	1620,269	1585,795	193,053
Esfuerzo último (MPa)	29,737	7,584	5,654	3,309

5. CONCLUSIONES

A partir de las pruebas de impresión desarrolladas a lo largo de la investigación, se determinó que la temperatura que presenta un mejor proceso de extrusión para el material PLA del fabricante Prusament es de 218 °C. Adicionalmente, en las cuales se pudo identificar que el filamento logra una mejor adherencia a la cama de impresión al mantenerla a una temperatura de 50°C , proporcionando así, adherencia uniforme en las primeras capas de extrusión y evitando así el fenómeno de alabeo de las primeras capas.

El desarrollo de la investigación permitió evidenciar un gran potencial de los métodos de manufactura aditiva en la industria aeroespacial, ya sea para la fabricación de partes y componentes en metales o en material termoplástico de geometrías complejas y bajo costo de producción. Dentro de los parámetros más influyentes en las propiedades estudiadas de estructuras celulares tipo honeycomb se encontró el tamaño de la celda, temperatura del extrusor, temperatura de la superficie de impresión, altura entre capas, velocidad de alimentación del extrusor y la velocidad de desplazamiento del extrusor. Esta tecnología aplicada a los materiales termoplásticos ofrece ventajas como bajo costo de producción, programación de fabricación por demanda, la manufactura de piezas con geometrías complejas y se demostró que posee una alta resistencia a las cargas de compresión.

La fabricación de elementos para la industria aeroespacial utilizando material termoplástico PLA, vislumbra aplicaciones en partes y componentes que no requieren un certificado tipo para ser incluidos en aeronaves, debido a que este tipo de material actualmente no posee un certificado que lo habilite para tal fin. Por tal motivo, la creciente industria de las aeronaves no tripuladas, que no se encuentra limitadas por estos aspectos técnicos y legales, tiene un gran potencial en el desarrollo de nuevos prototipos basados en esta técnica de fabricación, impactando positivamente los tiempos de desarrollo y costos de manufactura.

La manufactura aditiva a diferencia de la sustractiva y la formativa, permite la disminución de desperdicios de material, debido a que se utilizan cantidades exactas de material, acorde a parámetros de impresión seleccionados. Por otra parte, al requerir la fabricación de partes de grandes dimensiones, implica un aumento significativo en el tiempo de impresión, impactando de forma negativa los costos de producción.

Se pudo identificar que la deposición incorrecta de filamento en una sucesión continua de capas en el conformado del Honeycomb, conlleva a generar concentradores de esfuerzo por los cuales las celdas colapsan.

La configuración estructural que presenta el mayor valor de esfuerzo último de compresión corresponde al tamaño de celda de 1/4 de pulgada en comparación con la configuración de tamaño de celda de 3/8 de pulgada debido a que se tiene una mayor densidad nominal en la estructura celular, esto se traduce en un mayor volumen de material para la misma área que soporta una carga de compresión aplicada. Adicionalmente, la configuración estructural que presenta el mayor módulo de Young para el material PLA del fabricante Prusament es la estructura con tamaños de celda de 1/4 de pulgada, por encima del valor registrado por la configuración de 3/8 de pulgada.

REFERENCIAS

- [1] Euronews, «How 3D printing is driving efficiency in aviation,» *Euronews*, p. 1, 11 06 2015.
- [2] A. Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,» *Journal of Advance Research*, vol. 3, n° 1, pp. 81-90, 2 Junio 2011.
- [3] S. Crump, «Apparatus and method for creating three-dimensional objects». Estados Unidos Patente US5121329A, 1898.
- [4] AM-motion, «A strategic approach to increasing Europe's value proposition for additive manufacturing technologies and capabilities,» European Commission, Spain, 2016.

- [5] ASTM international, «ASTM52900 Standard Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology,» ASTM, Barr Harbor Drive, PO, 2015.
- [6] J. C. Najmon, S. Raeisi y A. Tovar, «Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry,» de *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 7-31.
- [7] N. Ahmed y J. Page, «Manufacture of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Advanced Project,» *Applied Mechanics and Materials*, Vols. %1 de %2397-400, pp. 970-980, 2013.
- [8] G. Goh, S. Argawala, V. Dikshit, S. Sing y W. Yeong, «Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential,» *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 140-151, 2016.
- [9] M. Kujawa, «Assessment of 3D printing as a manufacturing technology for drones wings,» de *Interdyscyplinarność badań naukowych 2017*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2017, pp. 66-71.
- [10] S. Ravundrababu, Y. Govdeli, Z. Wong y K. Erdal, «Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 34, pp. 659-666, 2018.
- [11] M. Seung Ki, T. Yu En, H. Jihong y Y. Yong-Jin, «Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures,» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, n° 3, p. 223-228, 2014.
- [12] D. Walker, D. Liu y A. Jennings, «Wing Design Utilizing Topology Optimization and Additive Manufacturing,» de *Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, San Diego, California, USA, 2016.
- [13] J. Stefan y S. Werner, «Application of Sustainable Design in Additive Manufacturing of an Unmanned Aerial Vehicle,» de *International Conference on Sustainable Design and Manufacturing*, Heraklion, Greece, 2016.
- [14] K. Jaya Christiyani, U. Chandrasekhar y K. Venkateswarlu, «Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer,» *Jou. of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, n° 3, p. 363-367, 2018.
- [15] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee y K. Lee, «Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA,» *Materials & Design*, vol. 123, pp. 154-164, 2017.
- [16] Simplify3D, «Materials guide,» Simplify3D, 2019. [En línea]. Available: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/>. [Último acceso: 10 Mayo 2019].
- [17] H. Yazdarni Sarvestani, A. H. Akbarzadeh, H. Niknam y K. Hermenean, «3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance,» *Composite structures*, vol. 200, pp. 886-909, 5 Abril 2018.
- [18] A. Kumar Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,» *Materials & Design*, vol. 31, n° 1, pp. 287-295, 2010.
- [19] ASTM International, «ASTM C365 / C365M-16 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores,» ASTM, Barr Harbor Drive, PO, 2016.
- [20] Hexcel, «HexWeb Honeycomb Attributes and Properties,» Hexcel, Stamford, Connecticut, 2016.
- [21] M. Kamal y G. Rizza, «Design for metal additive manufacturing for aerospace applications,» de *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Elsevier, 2019, pp. 67-86.
- [22] S. Fafenrot, N. Grimmelsmann, M. Wortmann y A. Ehrmann, «Three-Dimensional (3D) Printing of Polymer-Metal Hybrid Materials by Fused Deposition Modeling,» *Materials*, vol. 10, p. 1199, 19 Octubre 2017.
- [23] C. Lee, S. Kim, H. Kim y S. Ahn, «Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts,» *Journal of Materials Processing Technology*, Vols. %1 de %2187-188, pp. 627-630, 2007.
- [24] L. J. Gibson y M. F. Ashby, *Cellular Solids Structures and Properties*, Segunda ed., vol. I, Cambridge University Press, 1997.
- [25] Departamento de defensa de Estados Unidos de America, «MIL-STD-401B, Military Standards: Sandwich constructions and core materials, general test methods,» Washington D.C., 1956.
- [26] Departamento de defensa de Estados Unidos de America, «MIL-STD-105E, Military standard: Sampling procedures and tables for inspection by attributes,» Washington D.C., 1963.
- [27] W. Smith y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, México D.F: McGraw Hill, 2014.
- [28] N. Sawal, A. B. Mohd Nazri y H. Md Akil, «Effect of cell size material on the mechanical properties of honeycomb core structure,» *International Journal of Science and Research*, pp. 80-84, 2015.
- [29] S. Xu, J. Beynon, D. Ruan y G. Lu, «Experimental study of the out-of-plane dynamic compression of hexagonal honeycombs,» *Composites structures* 94, vol. 94, n° 8, pp. 2326-2336, 2012.
- [30] D. Pollard, C. Ward, G. Herrmann y J. Etches, «The manufacture of honeycomb cores using Fused Deposition Modeling,» *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 3, n° 1, pp. 21-31, 26 Abril 2017.

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA (Cuarta Edición)

El contenido de este texto se encuentra conformado por una serie de capítulos en los que sus autores presentan el resultado de sus procesos de investigación en diferentes disciplinas ingenieriles. El libro acopia el trabajo de ingenieros, profesores e investigadores motivados en investigar temáticas de ingeniería, pero, sobre todo, con el espíritu de aportar al cuerpo de conocimiento y al desarrollo de esta área de conocimiento. Esperamos que los lectores encuentren la información y los datos necesarios para su formación, al mismo tiempo que para motivarlos a darles continuidad o validar los resultados que les ofrece el contenido.

ISBN: 978-958-52333-0-0

