

## RAE

- 1. TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO
- 2. TÍTULO:** Caracterización de las Propiedades Mecánicas A Compresión De Estructuras Tipo Sandwich Con Núcleo Celular Tipo Honeycomb Manufacturadas Bajo Técnica Por Deposición Fundida
- 3. AUTORES:** Andrés Sebastián Nieto Barreto y Sebastián Rodríguez Melo
- 4. LUGAR:** Bogotá, D.C
- 5. FECHA:** Octubre de 2019
- 6. PALABRAS CLAVE:** Manufactura Aditiva, Ácido Poliláctico (PLA), Termoplástico, Esfuerzo Máximo de Compresión, Modulo de Compresión, Norma ASTM C-365
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es caracterizar las propiedades mecánicas a compresión de especímenes fabricados por medio de la técnica de manufactura aditiva (FDM) conformando la estructura celular tipo honeycomb. Se implementaron los lineamientos de la norma ASTM C365 M para determinar las propiedades mecánicas a esfuerzos de compresión. Se fabricaron 14 especímenes de prueba los cuales se dividieron en dos grupos, el primer grupo (Lote A) esta conformado por honeycombs con un tamaño de celda igual a 3/8 de pulgada, el segundo grupo de especímenes (lote B) fue conformado por honeycombs con un tamaño de celda igual a 1/4 de pulgada. Todos los especímenes fueron fabricados en una impresora 3D con tecnología de fabricación FDM, el material de fabricación fue plástico PLA (Acido Poli láctico). Todos los especímenes fueron probados en una maquina universal de ensayos en la cual se pudieron determinar las gráficas respectivas para cada espécimen en función al esfuerzo y deformación unitaria porcentual. Con las pruebas destructivas desarrolladas se pudieron determinar las siguientes características mecánicas para el espécimen A y B, esfuerzo ultimo de compresión y modulo de compresión, ambos parámetros se derivan del objetivo que plantea la norma ASTM C365 M. Finalmente se desarrolló una comparación cuantitativa de los valores obtenido con valores de propiedades mecánicas de honeycombs comerciales fabricados en aluminio y aramida.
- 8. LÍNEAS DE INVESTIGACION:** Línea de Investigación de la USB: Materiales y Estructuras. Sub línea de Facultad de Ingeniería: Materiales Anisotrópicos.
- 9. METODOLOGÍA:** La metodología se desarrolla mediante un enfoque cualitativo y cuantitativo; presentando las características principales de los materiales y la interpretación de los resultados comparativos de estos respectivamente.
- 10. 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. La configuración estructural que presenta un mayor comportamiento mecánico uniforme en la zona elástica corresponde al tamaño de celda de 1/4" en comparación con la configuración de tamaño de celda de 3/8". La configuración estructural que presenta el mayor módulo de compresibilidad para el material PLA del fabricante Prusa Research fue la configuración de 1/4" como tamaño de celda proporcionando un valor promedio de 356,267 MPa. La configuración estructural que presenta el mayor esfuerzo máximo a compresión para PLA es la configuración de 1/4" , proporcionando un valor de 29,737 MPa. Finalmente, la densidad nominal que presentan tanto el lote A y como el lote B, corresponden a un valor mayor en comparación a los honeycomb de Aramida y Aluminio debido al proceso de manufactura empleado, los módulos de compresión correspondientes al lote A y lote B son relativamente bajos en comparación a los materiales tomados como referencia lo cual conlleva a que los esfuerzos de transición varían debido a la teoría de Gibson, es decir la densidad del núcleo tipo honeycomb juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico de los especímenes, los que presentan mayor esfuerzo de transición y esfuerzo ultimo son los que más pesan (mayor densidad) o los que menor cantidad de defectos críticos y mayores presentan.

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A  
COMPRESIÓN DE ESTRUCTURAS TIPO SANDWICH CON  
NÚCLEO CELULAR TIPO HONEYCOMB MANUFACTURADAS  
BAJO TÉCNICA POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

**Andrés Sebastián Nieto Barreto**

**Sebastián Rodríguez Melo**

**Universidad De San Buenaventura, Sede Bogotá**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Aeronáutica**

**Bogotá, Colombia**

**2019**

**CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS A  
COMPRESIÓN DE ESTRUCTURAS TIPO SANDWICH CON  
NÚCLEO CELULAR TIPO HONEYCOMB MANUFACTURADAS  
BAJO TÉCNICA POR DEPOSICIÓN FUNDIDA**

**Andrés Sebastián Nieto Barreto**

**Sebastián Rodríguez Melo**

**Director Proyecto de Grado: Daniel Agudelo Noreña**

**Universidad De San Buenaventura, Sede Bogotá**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Aeronáutica**

**Bogotá, Colombia**

**2019**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este trabajo a la ciencia y naturaleza, dedicárselo a ese empuje que alimenta los deseos de desarrollo e investigación la cual esta tan arraigada en la conciencia humana, a la curiosidad. También agradezco el tiempo de trabajo y conocimiento recibido del tutor Daniel Agudelo y el tiempo de trabajo en los ensayos destructivos a cargo del ingeniero Fabio Merchán. Finalmente, a mi familia por apoyarme en cada instante, muchas gracias a todos.

*“No se puede negar la existencia de algo palpado por más etéreo que sea.*

*No hace falta exhibir una prueba de decencia de aquello que están verdadero.*

*El único gesto es creer o no.”*

W.C.

Andrés Sebastián Nieto Barreto

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por brindarme la oportunidad de culminar una de mis anheladas metas, a cada uno de ustedes gracias por su apoyo constante. Dedico este proyecto de investigación a la bioingeniería, al impulso por la innovación, al trabajo de campo, la observación y los resultados que contribuyen a la ciencia y a la humanidad. También agradezco el tiempo de trabajo y conocimiento recibido del tutor Daniel Agudelo y el tiempo de trabajo en los ensayos destructivos a cargo del ingeniero Fabio Merchán.

*“Más vale ser atrevido, aunque se cometan muchos errores que ser estrecho de mente y demasiado prudente.”*

V.V.

Sebastián Rodríguez Melo

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 1 .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Planteamiento del Problema .....	13
1.3 Justificación .....	14
1.4 Objetivos de Investigación.....	15
1.4.1 Objetivo General.....	15
1.4.2 Objetivos Específicos.....	15
1.5 Alcances y Limitaciones del proyecto .....	15
1.5.1 Alcances.....	15
1.5.2 Limitaciones.....	16
Marco teórico – conceptual .....	17
1.6 Estructura celular tipo honeycomb .....	17
1.6.1 Estructura de celda.....	17
1.6.2 Caracterización de celda .....	18
1.6.3 Densidad relativa y nominal .....	19
1.6.4 Polímeros en estructuras celulares .....	20
1.6.5 Ácido poliláctico – PLA .....	21
1.6.6 Propiedades del honeycomb en el plano (in-plane honeycomb) .....	21
1.6.7 Propiedades del honeycomb en el plano (out-of-plane) .....	23
1.7 Manufactura de modelado por deposición fundida (FDM) .....	25
1.7.1 Impresora 3D .....	27
1.8 Normativa ASTM C365.....	28
1.8.1 Parámetros del espécimen de prueba .....	29
1.8.1.1 Aspectos geométricos requeridos .....	29
1.8.1.2 Identificación de especímenes .....	31
1.9 Control de producción y calidad .....	31
1.10 Equipos y herramientas necesarias para desarrollar una prueba válida.....	34
1.10.1 Calibrador y Micrómetro .....	34
1.10.2 Platos de carga .....	35
1.10.3 Máquina universal de ensayos .....	35
1.10.4 Plantillas de alineación de espécimen.....	37
1.10.5 Báscula.....	37

1.11	Parámetros para el desarrollo de prueba válida .....	37
1.11.1	Parámetros por especificar antes de la prueba .....	38
1.11.2	Parámetros generales .....	38
1.11.3	Parámetro que invalida una prueba.....	39
1.12	Tipos de fallas mecánicas en pruebas de compresión plana .....	39
1.12.1	Falla por colapso plástico de la celda .....	40
1.12.2	Falla por desprendimiento de filamentos .....	40
1.12.3	Falla por ausencia de filamento depositado en trayecto de extrusión.....	41
1.12.4	Deformación lineal elástica de un honeycomb .....	42
1.12.5	Pandeo elástico de celdas.....	43
Capítulo 2	.....	46
2	Desarrollo de Ingeniería.....	46
2.1	Pruebas de impresión con tamaños de celda variables .....	46
2.2	Diseño de especímenes de prueba.....	50
2.3	Reconocimiento de fallas que invalidan la prueba de un espécimen.....	51
2.4	Diseño del honeycomb y revestimientos .....	52
2.4.1	Especimen lote A.....	53
2.4.2	Especimen lote B .....	55
2.5	Generador de estructura honeycomb – OpenSCAD .....	56
2.6	Procesos de impresión de especímenes.....	57
2.6.1	Configuración de parámetros de impresión .....	57
2.6.2	Adecuación de la máquina de impresión .....	58
2.7	Protocolo de impresión .....	59
2.8	Impresión de especímenes .....	60
2.9	Tasa de enfriamiento del espécimen .....	62
2.10	Control de calidad de especímenes .....	63
2.11	Configuración de la máquina universal de ensayos .....	65
2.12	Pruebas mecánicas de compresión plana .....	67
2.13	Toma de resultados y reporte de prueba experimental .....	69
2.14	Cálculo de propiedades mecánicas del espécimen.....	69
2.15	Esfuerzo último de compresión .....	69
2.16	Esfuerzo al 2% de deflexión .....	70
2.17	Módulo de compresibilidad .....	71
2.18	Densidades de los especímenes de prueba.....	73

2.19 Estadística de propiedades mecánicas .....	73
Capítulo 3 .....	75
3 Procesamiento de gráficas.....	76
3.1 Análisis de resultados .....	79
3.1.1 Probetas lote A.....	79
3.1.2 Probetas lote B.....	84
3.2 Comparación de resultados de honeycomb lote A.....	88
3.3 Comparación de resultados de honeycomb lote B.....	90
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES .....	95
Referencias .....	97

### Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros de impresión y valores estándar usados en la investigación.....	13
Tabla 2. Caracterización geométrica de celda.....	19
Tabla 3. Propiedades del ácido poli láctico PLA.....	21
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la impresora 3D Creator Pro.....	28
Tabla 5. Área transversal recomendada para espécimen de prueba.....	30
Tabla 6. Especificaciones técnicas de la maquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU.....	36
Tabla 7. Configuraciones de pruebas impresión piloto.....	47
Tabla 8. Resultados de impresiones de prueba.....	49
Tabla 9. Propiedades de honeycomb diseñados.....	52
Tabla 10. Parámetros de impresión para software FlashPrint.....	58
Tabla 11. Parámetros de adquisición de datos.....	62
Tabla 12. Parámetros de configuración para Test Wizard.....	65
Tabla 13. Error relativo en comparación de métodos de análisis.....	79
Tabla 14. Propiedades mecánicas de especímenes tipo A.....	82
Tabla 15. Propiedades mecánicas de la muestra representativa de especímenes tipo A.....	82
Tabla 16. Esfuerzo máximo específico y carga específica para especímenes lote A.....	83
Tabla 17. Propiedades mecánicas de especímenes tipo B.....	86
Tabla 18. Propiedades mecánicas de la muestra representativa de especímenes tipo B.....	86
Tabla 19. Esfuerzo máximo específico y carga específica para especímenes lote B.....	88
Tabla 20. Comparación de propiedades mecánicas de honeycomb tamaño de celda 3/8'' ..	88
Tabla 21. Comparación de propiedades mecánicas de honeycomb tamaño de celda 1/4'' ..	90

## Lista de Figuras

Figura 1. Variación en el espesor de celda. ....	4
Figura 2. Propiedades de mecánicas y manufactura de núcleos tipo honeycomb. ....	4
Figura 3. Espécimen antes y después de la prueba a tracción. ....	5
Figura 4. Paneles tipo sándwich con distintas alternativas estructurales de núcleo celular. ..	6
Figura 5. Espécimen de paneles tipo sándwich antes y después de prueba destructiva. ....	7
Figura 6. Comportamiento mecánico a compresión sin precarga del Al 5052 a 350°F y 400°F. .....	8
Figura 7. Comportamiento mecánico prueba compresión tipo flatwise a las muestras con el proceso de envejecimiento.....	9
Figura 8. Caracterización de probetas de materiales PLA y ABS, ensayos destructivos. ....	10
Figura 9. Estructura tipo sándwich con núcleo en honeycomb y tipos de materiales empleados. ....	12
Figura 10. Prisma hexagonal. ....	18
Figura 11. Grafica de esfuerzo a compresión en función a la densidad del panel.....	19
Figura 12. Carga de compresión aplicado en el plano XY perpendicular a la orientación de celda.....	22
Figura 13. Gráfica de esfuerzo-deformación de un material elástico - plástico (Aluminio) en el plano (in-plane).....	23
Figura 14. Carga de compresión aplicada en dirección al eje Z siendo paralela a la orientación de celda. ....	24
Figura 15. Gráfica de esfuerzo-deformación de un material elásto-plástico (Aluminio) en el plano (out-of-plane).....	25
Figura 16. Proceso de FDM para construcción de celdas en honeycomb de 3/8".....	27
Figura 17. Impresora 3D Creator Pro. ....	28
Figura 18. Calibrador digital Vernier y Micrómetro. ....	34
Figura 19. Platos de carga inferior y superior. ....	35
Figura 20. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU. ....	37
Figura 21. a). Falla por carga excéntrica aplicada; b). Falla por deposición de filamento discontinuo.....	39
Figura 22. Deformación cortante de celda debido a falla por deposición de filamento seccionado. ....	41
Figura 23. Ausencia de deposición de filamento en el espécimen. ....	41
Figura 24. Deformación lineal elástica en las celdas tipo honeycomb. ....	42
Figura 25. Pandeo elástico de celda cuando es cargada a compresión. ....	43
Figura 26. Diagrama de proceso de manufactura y análisis de especímenes. ....	45
Figura 27. Vista de corte isométrico del espécimen A generado en CATIA V5. ....	54
Figura 28. Vistas y dimensiones del espécimen A. ....	54
Figura 29. Vista de corte isométrica del espécimen B- Generado en CATIA V5.....	55
Figura 30. Vistas y dimensiones del espécimen B. ....	56

Figura 31. Carrete de PLA plateado referencia FLM-PLA-175-SLV.....	59
Figura 32. Lote de impresión tipo A en PLA. ....	61
Figura 33. Lote de impresión tipo B en PLA .....	61
Figura 34. Tasa de enfriamiento del espécimen y plataforma de impresión. ....	63
Figura 35. Defecto menor y mayor de impresión en especímenes. ....	64
Figura 36. Plantillas para centrar espécimen A-B sobre plato de carga. ....	66
Figura 37. Disposición inicial de la prueba mecánica a compresión.....	67
Figura 38. Mordazas C365 Prueba mecánica en especímenes. ....	68
Figura 39. Ubicación del espécimen en la plantilla de la mordaza inferior. ....	68
Figura 40. Grafica representativa del efecto de asentamiento del espécimen. ....	71
Figura 41. Prueba y posicionamiento del espécimen en maquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU.Fuente: (Autores, 2019). ....	75
Figura 42. Gráfica de esfuerzo-deformación del espécimen B1 comparando ambos métodos de análisis. ....	77
Figura 43. Gráfica de esfuerzo-deformación del espécimen B2 comparando ambos métodos de análisis. ....	78
Figura 44. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de honeycombs tipo A. ....	81
Figura 45. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de especímenes tipo A seleccionados. ....	83
Figura 46. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de honeycomb tipo B.....	85
Figura 47. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de especímenes tipo B seleccionados. ....	87
Figura 48. HC comerciales Aluminio y Aramida.....	89
Figura 49. Comparación entre HC PLA y HC comerciales. ....	91

## **Lista de Anexos**

- Anexo 0. Propiedades mecánicas honeycomb comerciales.
- Anexo 1. Protocolo de Impresión a través de FDM.
- Anexo 2. Control de calidad.
- Anexo 3. Tasa de enfriamiento.
- Anexo 4. Datasheets especímenes A y B.
- Anexo 5. Guía para generar paneles tipo honeycomb en OpenSCAD.
- Anexo 6. Checklist para prueba de compresión.
- Anexo 7. Plantilla de alineación en mordazas de máquina universal de ensayos.
- Anexo 8. Registro de impresión.
- Anexo 9. Formato de reporte de prueba a compresión.
- Anexo 10. Generación de coordenadas para especímenes en WePlot Digitizer.
- Anexo 11. Densidades de especímenes.
- Anexo 12. Reporte análisis de falla (Fractografía).

## Nomenclatura

Símbolo	Significado
ABS	Acronitrilo butadeino estireno.
ASTM	Sociedad Americana para pruebas y materiales.
CAD	Diseño asistido por computador.
FDM	Modelado por deposición fundida.
HC	HoneyComb.
PLA	Ácido poliláctico.
STL	Lenguaje de teselación estándar.
Pa	Pascal.
MPa	Megapascal.
GPa	Gigapascal.
Ksi	Kilo libra por pulgada cuadrada.
ISO	Organización internacional para la estandarización.
°C	Grado Celsius.
mm	Milímetro.
m	Metro.
s	Segundos.
Kg	Kilogramo.
°	Grado.
$\rho^*$	Densidad de material de composición honeycomb.
$\rho_s$	Densidad nominal.
$\sigma_i$	Esfuerzo.
A	Área transversal del espécimen.
t	Espesor del espécimen medido previo a la prueba.
$E_z^{fc}$	Módulo de compresibilidad del espécimen.
$\sigma_z^{fc0,02}$	Esfuerzo de compresión plana al 2% de deflexión.
Pmax	Carga última antes de la falla.
$F_z^{fcu}$	Máxima esfuerzo a compresión plana.
P. D	Porcentaje de defectos visuales.
N. D	Número de defectos.
E. I	Especímenes inspeccionados.
$\bar{x}$	Promedio simple.
su-1	Desviación estándar simple.
n	Número de especímenes.
CV	Coefficiente de variación.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente la implementación de nuevos procesos de producción y manufactura de componentes han tenido una gran aceptación, debido a la extensa variedad de materiales utilizados para el desarrollo de componentes en el sector aeroespacial. El enfoque en desarrollar e investigar nuevos métodos de manufactura para materiales termoplásticos, impulsa el desarrollo de esta investigación, la cual consiste en el proceso de fabricación, experimentación y análisis de ensayos mecánicos a compresión de núcleos para estructuras tipo sándwich. El núcleo está conformado por una estructura celular tipo honeycomb la cual es fabricada bajo el método de deposición fundida de material (FDM) con el polímero ácido poli láctico (PLA) como material base de producción. El diámetro de celda seleccionado para las dos configuraciones de especímenes fueron 3/8 y 1/4 de pulgada, estos tamaños fueron determinados a partir de varias pruebas de impresión las cuales difirieron en distintos tamaños de celda, llegando finalmente a los dos tamaños estipulados.

El auge de técnicas de modelado por deposición fundida, la gama extensa de materiales como termoplásticos a usar, las posibles contribuciones mecánicas; fomentan e incitan el estudio y comprensión de métodos de manufactura por deposición aditiva como pilar de estudio, tomando como referencia el termoplástico PLA, para el análisis de su comportamiento mecánico, además de ser este, un material popular entre los usuarios de la técnica por manufactura aditiva.

Las normas ASTM o por sus siglas en inglés "*American Society of Testing Materials*" establecen los parámetros con base a un estándar tanto de las características de investigación, como los procedimientos de desarrollo para el estudio del comportamiento mecánico de materiales. El desarrollo del trabajo está basado en el proceso de fabricación de especímenes de prueba, los cuales fueron sometidos a ensayos destructivos de compresión plana descritos por la norma ASTM

C365/C365M-16, la cual permite determinar las propiedades mecánicas a compresión plana de un núcleo para estructuras tipo sándwich conformadas por hexágonos o Honeycomb.

Las propiedades mecánicas que se determinarán para el ensayo de compresión sobre el material serán el esfuerzo de compresión plana al 2% de deformación, esfuerzo último de compresión y el módulo de compresión. Los ensayos se realizarán siguiendo la normativa de estandarización para pruebas ASTM C365/C365M – 16, la cual explica detalladamente los procesos que se deben seguir para efectuar pruebas experimentales exitosas, la aplicación de la norma ASTM C365 deriva un amplio rango de conceptos en relación con los materiales que son ensayados.

Por último, se obtienen comparaciones entre materiales que se utilizan en la industria con los valores resultantes de las experimentaciones realizadas, la geometría hexagonal que se estudia para los núcleos analizando diferentes parámetros que se relacionan directamente con los esfuerzos que pueda soportar el material como lo son el área transversal de la probeta, el tamaño, densidad y espesor de las celdas que conforman la geometría interna de tipo hexagonal o honeycomb como se conocer comercialmente.

## Capítulo 1

### 1.1 Antecedentes

En la siguiente sección se presentan los antecedentes de mayor relevancia para la investigación, de los cuales se toman parámetros iniciales como puntos de inicio para la determinación de procedimientos y análisis de resultados en el desarrollo de este proyecto.

#### **The manufacture of honeycomb cores using fused deposition modeling.**

En la investigación realizada por los autores David Pollard, C. Ward, G. Herrmann & J. Etches (2017), se hizo énfasis de la manufactura aditiva en el manejo y construcción de paneles tipo sándwich debido al uso en distintas industrias por sus propiedades mecánicas como su rigidez, resistencia estructural con respecto a su peso y propiedades de resistencia al impacto. Este documento investiga las propiedades de núcleos en estructuras celulares tipo honeycomb a través de la técnica de modelado por deposición fundida (FDM), la fuerza de unión entre las capas fabricadas a través de FDM se evaluó a través de pruebas de tracción o tensión, midiendo el efecto de la fabricación modificando velocidades, espesores de pared, además del caudal en la boquilla o extrusor. El estudio de manufactura se compara con un ejemplar de núcleo de aramida de grado aeroespacial presente en la industria *Nomex honeycomb core*, en comparación de la técnica de FDM la construcción de celdas tipo nido de abeja componen una falla más dúctil con un punto de fluencia mucho más bajo. Por último, el esfuerzo de tracción permaneció constante a través de las muestras dentro de cada uno de los polímeros de ABS y PLA utilizados (Pollard, Ward, Herrmann, & Etches, 2017).

Se pueden observar las diferentes configuraciones del tamaño de celda para los termoplásticos ABS y PLA (Figura 1), donde las variaciones de espesor de pared se dieron a través de la variación de la velocidad de flujo de material y en la velocidad del movimiento del extrusor o boquilla, analizando y detallando el comportamiento de la velocidad en el comportamiento mecánico

a una prueba de tracción de probetas fabricadas bajo la técnica FDM. Se manejaron tres tasas de flujo para el extrusor para ABS y para PLA dos tipos de flujo para un variado estudio de la deposición de estos tipos de termo plásticos.

**Table 1** Ultimate tensile stress (MPa) for wall thickness and flow rate variations of ABS samples

	Flow rate (mm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Wall thickness (mm)		
		1.5	2.0	2.5
	4.08	24.2 ± 1.3	26.1 ± 2.4	24.1 ± 2.4
	5.44	25.2 ± 3.8	26.3 ± 4.1	22.1 ± 2.1
	6.80	24.7 ± 3.9	25.9 ± 4.1	22.9 ± 1.8

**Table 2** Ultimate tensile stress (MPa) for wall thickness and flow rate variations of PLA samples. The sample group with a longer pause time is represented in italics

	Flow rate (mm <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Wall thickness (mm)		
		0.9	0.9	1.7
	4.73	21.2 ± 2.7	-	23.9 ± 2.1
	9.51	24.6 ± 1.1	25.6 ± 1.4	18.3 ± 4.3

*Figura 1. Variación en el espesor de celda.*

*Fuente: (Pollard, Ward, Herrmann, & Etches, 2017).*

Esta investigación, también examinó los efectos de la impresión 3D implementando un análisis comparativo entre diferentes núcleos de ABS y PLA utilizando varias trayectorias, variando el espesor de pared y el tiempo de impresión con un núcleo tipo honeycomb de aramida tipo Nomex. En esta comparación se seleccionó un prototipo o especificación de construcción del panel bajo la técnica FDM como un patrón de densidad de relleno parecido al Nomex, debido a la eficiencia de este tipo de configuración estructural donde el diseño de esta prueba se basó en la normativa ASTM D7336.46, además de especificar los parámetros y protocolos tanto de fabricación como los protocolos de pruebas (Figura 2) y (Figura 3).

**Table 3** Specimen wall thickness and build properties

Wall type	Thickness (mm)	Expected		
		Normalized thickness	normalized thickness	Build time (min)
1	0.56	1	1.00	41.0
2	0.79	1.42	1.33	47.8
3	1.11	1.98	2.00	69.8
PLA	0.85	1.35	1.33	47.9
Nomex	0.08	-	1.33	-

**Table 4** Force and stress of walls crush testing of different deposition patterns for FDM and Nomex honeycomb cores.

Wall type	Yield force (kN)	Yield stress (MPa)	Crush stress (MPa)	Specific yield stress (MPa/g)
1	9.1 ± 0.3	18.9 ± 1.1	21.6 ± 1.5	4.0 ± 0.2
2	20.1 ± 0.7	29.6 ± 2.8	35.2 ± 2.4	4.8 ± 0.4
3	33.2 ± 0.4	34.5 ± 1.0	40.0 ± 1.1	3.7 ± 0.1
PLA	32.8 ± 1.2	42.9 ± 2.6	51.1 ± 3.2	5.0 ± 0.2
Nomex	5.4 ± 0.1	36.6 ± 1.0	41.2 ± 0.7	19.1 ± 0.5

*Figura 2. Propiedades de mecánicas y manufactura de núcleos tipo honeycomb.*

*Fuente: (Pollard, Ward, Herrmann, & Etches, 2017).*



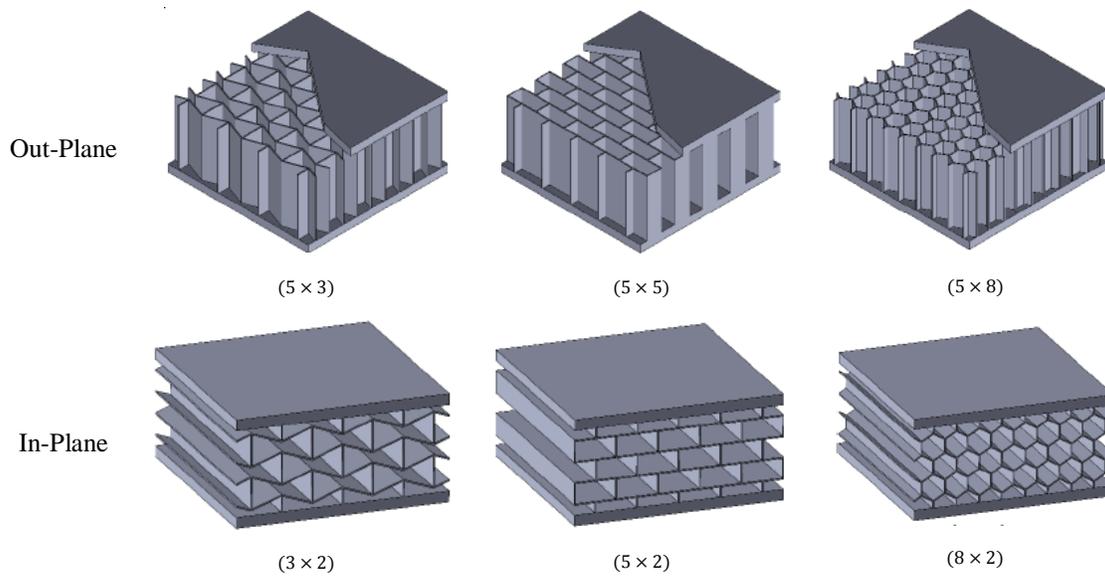
*Figura 3. Espécimen antes y después de la prueba a tracción.*

*Fuente: (Pollard, Ward, Herrmann, & Etches, 2017).*

### **3D printed architected polymeric sandwich panels: energy absorption and structural performance.**

Esta investigación fue realizada en el año 2018 por H. Yazdani Sarvestani, A.H. Akbarzadeh, H. Niknam, K. Hermenean, basando la investigación en el estudio de propiedades mecánicas de núcleos ligeros como alternativa avanzada para evaluar el rendimiento de paneles livianos impresos en 3D con núcleos celulares. Cambiando los parámetros geométricos de los núcleos se conduce a un análisis de estructuras de tipo hexagonal, rectangular y tipo augético (auxetic) (Figura 4). Analizando el impacto estructural de baja velocidad por medio de la deformación de filamentos. Para analizar el comportamiento elástico-plástico se aplica una simulación de elementos finitos con el uso de ANSYS para estructuras tipo panel-sándwich usando el modelado por deposición fundida para la fabricación de muestras de biopolímeros PLA este principio de rendimiento estructural a la arquitectura. (Yazdarni Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, & Hermenean, 2018).

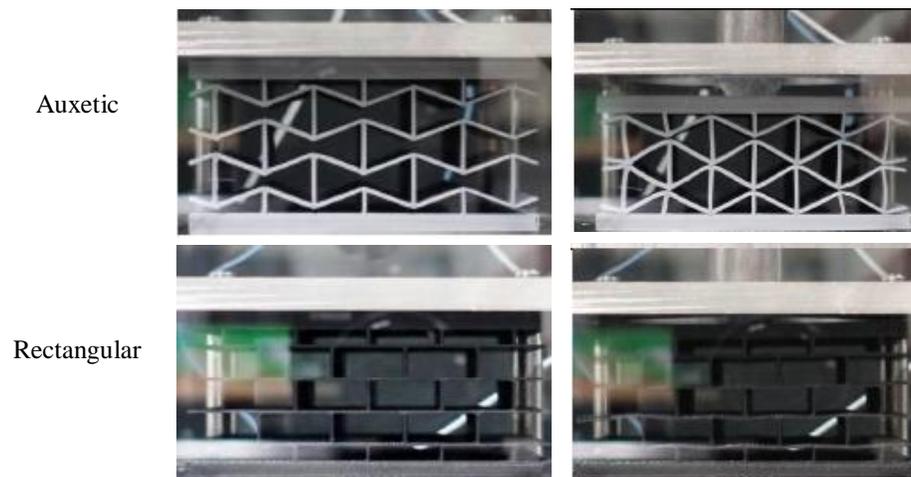
Type	Auxetic core	Rectangular core	Hexagonal core
Direction	$\theta = 70^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 120^\circ$
	$(N_h \times N_v)$	$(N_h \times N_v)$	$(N_h \times N_v)$



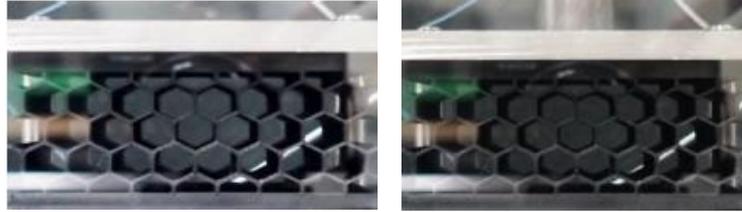
*Figura 4. Paneles tipo sándwich con distintas alternativas estructurales de núcleo celular.*

*Fuente: (Yazdarni Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, & Hermenean, 2018).*

Para poder caracterizar un termoplástico o biopolímero se debe hacer uso de una prueba universal de ensayos destructivos de tracción uniaxial y luego llevando a cabo pruebas de impacto a baja velocidad se investiga la absorción de energía en distintas configuraciones celulares en la estructura del panel.



Hexagonal



*Figura 5. Espécimen de paneles tipo sándwich antes y después de prueba destructiva.*

*Fuente: (Yazdarni Sarvestani, Akbarzadeh, Niknam, & Hermenean, 2018).*

Adicionalmente, se desarrolló un análisis micro-tomográfico de rayos X con la finalidad de estudiar las características microestructurales de los paneles antes y después del impacto. Por medio del análisis de los resultados demostraron que el sándwich con el panel tipo auxetic es la configuración apropiada para aplicaciones de absorción energética por su capacidad de alta distribución de alta energía de impacto y una fuerza mínima de respuesta transferida desde el panel impreso 3D.

### **Properties of 5052 Aluminum for use as honeycomb core in manned spaceflight**

En el documento se abarcan conceptos que destacan características y elementos del comportamiento en aluminio 5052 tipo de panal de abeja (HC), este material es usado en el núcleo de paneles tipo sándwich para estructuras livianas debido a sus propiedades mecánicas (Anexo 0). Las propiedades del núcleo generalmente no se consideran, ya que las cargas se transportan principalmente a través de las coberturas de caras compuestas. Sin embargo, hay casos en que el núcleo juega un papel más importante y su comportamiento mecánico debería resolverse con más detalle, particularmente si sus propiedades mecánicas presentan comportamientos propios de estas estructuras como se puede observar en la Figura 6.

Debido a las propiedades que presenta realizar un envejecimiento a estructuras tipo HC, el autor plantea dos procedimientos de envejecimiento para producir un análisis detallado del comportamiento mecánico, las secciones de lámina se envejecieron a temperaturas de 350°F y 400°F

para tiempos de 1, 3 y 8 horas. La temperatura de 350°F representa una temperatura de curado común para paneles sándwich. (Lerch, 2018).

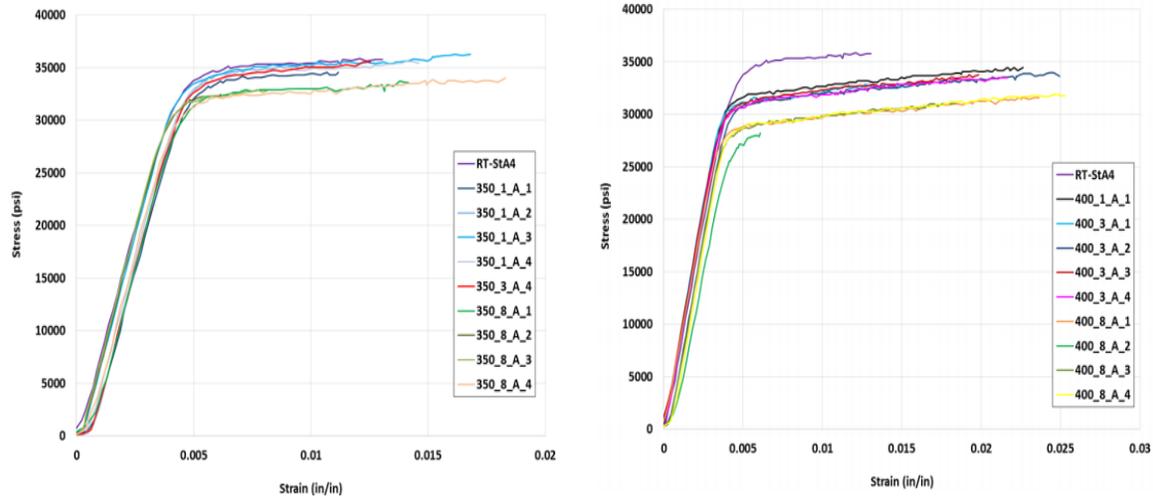
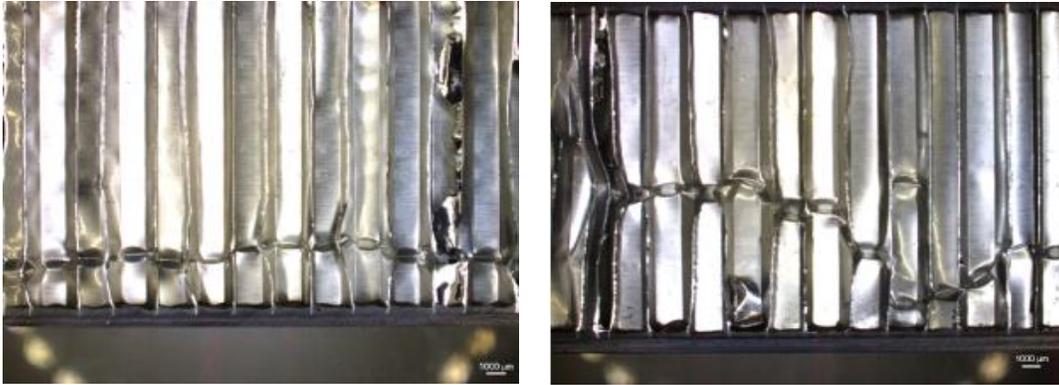


Figura 6. Comportamiento mecánico a compresión sin precarga del Al 5052 a 350°F y 400°F.

Fuente: (Lerch, 2018).

Como parte de un programa de calidad, el núcleo de HC debe especificarse correctamente cuando se solicite y se deben realizar verificaciones de calidad del material recibido para garantizar su exactitud. Para este fin, dicho informe presenta algunos datos simples, que se pueden utilizar para evaluar las propiedades de HC.

Para el estudio del comportamiento mecánico del aluminio 5052, el autor abarca el diseño y análisis de las estructuras de paneles tipo sándwich como una estructura homogénea con propiedades sofisticadas debido a estas propiedades no están fácilmente disponibles. El aluminio 5052 está endurecido por magnesio y, a menudo, el refuerzo del material contribuye a generar mayor resistencia estructural, entre las pruebas mecánicas destructivas como se observa en la Figura 7, no se genera diferencia aparente entre las muestras, sin embargo, la que fue tratada a una temperatura de 400 °F tolera un esfuerzo máximo ligeramente menor.



*Figura 7. Comportamiento mecánico prueba compresión tipo flatwise a las muestras con el proceso de envejecimiento.*

*Fuente: (Lerch, 2018).*

### **Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida**

Después de que en 2009 expirara la patente que la compañía americana “Stratasys” tenía sobre la tecnología de modelado de deposición fundida, FDM por sus siglas en inglés, el crecimiento que ha experimentado la impresión 3D ha resultado espectacular. La tecnología de impresión 3D a nivel industrial es muy eficaz para segmentos en los que el volumen de piezas no es muy elevado, como puede ser el de defensa o el aeroespacial. En el sector aeroespacial esto ha permitido reducir la relación “buy to fly” – relación de peso entre la materia prima y el producto acabado- en más de la mitad, los conductos de los motores del caza F18 son un ejemplo del uso de la impresión 3D para crear piezas con formas complejas que permitan un mejor y más suave flujo de aire. (Relaño Pastor, 2013).

En dicho documento se abarcan conceptos de precisión y fiabilidad en piezas resultantes a partir de proceso de modelado por deposición fundida, con la finalidad de lograr una estandarización y una certificación de creación de probetas hechas en termoplásticos, para esto se escoge la mejor configuración y se selecciona un protocolo de impresión acorde a las dimensiones de la pieza. Además, se genera una comparación entre las características mecánicas del ABS y el PLA, donde se

exponen las características de diseño e impresión y se realizan ensayos destructivos con la finalidad de analizar y conocer el comportamiento mecánico de estos materiales.



*Figura 8. Caracterización de probetas de materiales PLA y ABS, ensayos destructivos.*

*Fuente: (Relaño Pastor, 2013).*

A partir de ensayos destructivos de probetas se pudo observar en la anterior imagen la obtención de las propiedades térmicas y mecánicas de materiales PLA y ABS, temperaturas de la cama y extrusor adecuados para cada tipo de material termoplástico en sus distintas presentaciones comerciales (Relaño Pastor, 2013).

Las aplicaciones que se pueden generar mediante el proceso de fabricación (FDM) en la industria pueden generar altos impactos en materia de costos, eficiencia de producción y accesibilidad. Actualmente varias empresas internacionales han centrado sus esfuerzos en su trabajo de producción en cuanto los materiales compuestos. La evolución que ha significado la utilización de este tipo de materiales ha permitido grandes avances en el diseño de vehículos y estructuras que ofrezcan las mismas configuraciones mecánicas en comparación a las estructuras convencionales. Esto se debe a la alta tasa de rigidez-peso y esfuerzo-peso que ofrece el honeycomb como núcleo en materiales compuestos. (Relaño Pastor, 2013).

## **Mechanical properties of honeycomb sandwich panels of Aluminum and Glass fiber facings of different core thickness from ASTM standards**

La investigación fue realizada en el año 2006 por del autor Muhammad Kashif Khan, en la cual se desarrolló un conjunto de experimentaciones sobre el diseño y las propiedades de estructuras celulares tipo honeycomb, además del compartimiento mecánico entre paneles de aluminio y paneles de fibra de vidrio. Adicionalmente otro conjunto de pruebas se realizó para especificar las propiedades de construcciones tipo sándwich, usadas comúnmente en estructuras que requieran rigidez, resistencia y bajo peso.

La investigación enmarcó el uso de estas configuraciones estructurales en la industria aeroespacial, donde la configuración de los paneles deriva de una organización celular, y comúnmente se prefieren paneles hexagonales de baja densidad como material del núcleo, con base en el comportamiento y la distribución estructural. El autor define a los paneles tipo sándwich como la composición de un material de núcleo débil con caras rígidas y resistentes unidas al núcleo en el lado superior e inferior, el concepto básico de un panel tipo sándwich, parte de que las caras o el recubrimiento del núcleo proporcionan grandes prestaciones a una prueba de flexión e impacto, mientras que el núcleo soporta grandes magnitudes de carga cortante (Kashif Khan, 2006).

Este antecedente se relaciona con la investigación en curso, ya que propone un material de instrucción para la enseñanza de pruebas experimentales con estructuras celulares tipo Honeycomb, a través de protocolos, donde se aborda, paso a paso, los objetivos de aprendizaje y una descripción detallada de los procesos llevados a cabo. La experimentación con materiales tipo sándwich abunda un concepto de diseño estructural interesante y atractivo ya que, por medio de una selección adecuada de materiales y de su geometría, se pueden generar construcciones que contengan altas prestaciones de rigidez con un bajo peso. Dado que se requiere rigidez para evitar la inestabilidad estructural, las estructuras tipo HC son particularmente adecuadas para aplicaciones donde las condiciones de carga son propicias para el pandeo.

En la Figura 9, se observan dos tipos de materiales usados en la industria como aluminio AL 5052 y Aramida, los cuales tienen lugar como referencia para generar la comparación mecánica entre los especímenes fabricados bajo la técnica por deposición fundida descritos a lo largo del documento, además dicha investigación se basa en la selección de diferentes materiales como corrugados, madera, plásticos expandidos (Foam) y cierto tipo de lanas (Kashif Khan, 2006); además del material usado en las caras o el recubrimiento generalmente placas metálicas delgadas, placas perfiladas, materiales compuestos como plásticos reforzados de fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de aramida.

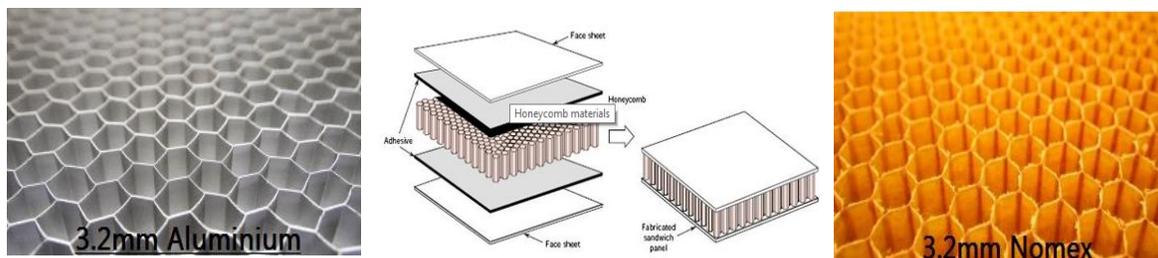


Figura 9. Estructura tipo sándwich con núcleo en honeycomb y tipos de materiales empleados.

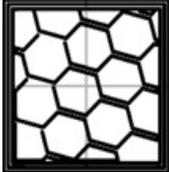
Fuente: (Kashif Khan, 2006).

### **Three-dimensional (3D) printing of polymer-metal hybrid materials by fused deposition modeling.**

Esta investigación fue realizada por los autores Susanna Fafenrot, Nils Grimmelsmann, Martin Wortmann y Andrea Ehrmann 2017, esta investigación se enfocó un énfasis en la manufactura de núcleos tipo nido de abeja producidos con la técnica de FDM, se determinó que tenían una magnitud de falla de compresión más alta que probetas de Nomex honeycomb, además estos resultados, combinados con mayor flexibilidad de las tecnologías de fabricación aditiva, podrían proporcionar un método de fabricación de núcleos de alta resistencia con geometrías complejas y una posible aplicación en la industria aeroespacial con materiales biodegradables.

En la Tabla 1, se observa las distintas configuraciones estructurales en el patrón del núcleo de los especímenes, además se especifican los parámetros y los valores numéricos de variables usados en el proceso de manufactura por deposición fundida (Fafenrot, Grimmelsmann, Wortmann, & Ehrmann, 2017).

Tabla 1. Parámetros de impresión y valores estándar usados en la investigación.

Parámetro	Espécimen 1	Espécimen 2	Espécimen 3
Diámetro del extrusor	0,25mm	0,4mm	1mm
Grado de relleno	20%	60%	100%
Orientación de relleno	45°	-	90°
Patrón geométrico	<i>Rectilinear</i>	<i>Honeycomb</i>	<i>Hilbert curve</i>
Bosquejo o patrón			
Temperatura del extrusor (°C)	200	210	220
Temperatura de cama (°C)	-	60	-

Fuente: (Fafenrot, Grimmelsmann, Wortmann, & Ehrmann, 2017).

## 1.2 Planteamiento del Problema

Durante el proceso de manufactura de componentes en la industria aeroespacial, el uso de nuevas tecnologías para el modelamiento de termoplásticos es de gran relevancia debido a la falta de conocimiento de las propiedades mecánicas de dichos materiales como el ácido poli láctico, impidiendo su utilización. De igual forma la falta de normativas y protocolos estandarizados para la fabricación de especímenes en este tipo de materiales a partir de la caracterización de dichas propiedades mecánicas. Además, se desconoce la influencia de la configuración estructural de estructuras impresas en las características mecánicas de partes fabricadas bajo esta técnica. Estos motivos han llevado a los investigadores a formular la siguiente pregunta: ¿Cuáles son las propiedades

mecánicas de estructuras celulares tipo honeycomb del material termoplástico PLA fabricado a través de la técnica de modelado por deposición fundida y caracterizadas a partir de pruebas destructivas a compresión?

### **1.3 Justificación**

La investigación presentada se enfoca en el proceso de manufactura, experimentación y el análisis de ensayos mecánicos de un núcleo para la implementación en materiales compuestos tipo sándwich; debido al amplio campo de desarrollo que se ha formado en torno a la introducción de los materiales compuestos en el mundo de la ingeniería y las nuevas técnicas de manufactura que han estado desarrollándose en los últimos años como lo es la técnica de fabricación por deposición de material fundido (impresión 3D), las cuales han permitido contar con métodos de diseño y fabricación de prototipos mucho más asequibles, rápidos generando una menor cantidad de desperdicios.

Estudios de propiedades mecánicas y procesos estandarizados de pruebas mecánicas de elementos fabricados bajo la técnica FDM, es un campo de investigación el cual no se ha desarrollado totalmente en el país debido a su reciente aparición e implementación en las cadenas de valor, es por esta razón que se identificó la necesidad de desarrollar un estudio tendiente a determinar las características mecánicas de estructuras tipo sándwich con el fin de vislumbrar futuras aplicaciones en sectores industriales de la economía nacional.

Las propiedades mecánicas que se determinarán para el ensayo de compresión sobre el material serán el esfuerzo de compresión plano, esfuerzo ultimo de compresión plano, esfuerzo al 2% de deformación y el módulo de compresión plano. Los ensayos se realizarán siguiendo la normativa de estandarización para pruebas ASTM C365/C365M – 16, la cual explica los procesos que se deben seguir para efectuar pruebas experimentales exitosas, la aplicación de la norma ASTM C365 deriva un amplio rango de conceptos en relación con los plásticos que son ensayados, los cuales serán explicados en el desarrollo del documento.

Por último, se realizarán comparaciones entre materiales que se utilizan en la industria con los valores resultantes de las experimentaciones realizadas, la geometría hexagonal que se va a estudiar para los núcleos será analizada bajo diferentes parámetros críticos que se relacionan directamente con los esfuerzos que pueda soportar el material como lo son el área transversal de la probeta, el tamaño y espesor de las celdas que conforman la geometría hexagonal.

## **1.4 Objetivos de Investigación**

### **Objetivo General**

Caracterizar el comportamiento mecánico de estructuras celulares manufacturadas bajo método de deposición fundida de PLA.

### **Objetivos Específicos**

1. Determinar protocolos de fabricación para diferentes geometrías de estructuras bajo manufactura aditiva.
2. Analizar y obtener las características mecánicas de diferentes estructuras celulares bajo ensayos de compresión.
3. Desarrollar un análisis comparativo entre estructuras celulares manufacturadas en PLA, Aluminio y Nomex.

## **1.5 Alcances y Limitaciones del proyecto**

### **Alcances**

- a) Se realizará un análisis de dos configuraciones celulares para la fabricación de probetas en material termoplástico.
- b) Se hará uso de un material termoplástico PLA (PRUSA Research, 2018) para el desarrollo de protocolos de manufactura.

- c) Se realizará una prueba mecánica destructiva tipo compresión plana para la caracterización de las propiedades mecánicas de probetas.
- d) Se seleccionarán y desarrollarán protocolos de control de manufactura y calidad para el análisis del comportamiento mecánico de probetas en termoplástico PLA.

### **Limitaciones**

- a) Las pruebas mecánicas destructivas se realizarán conforme la norma ASTM C365 descrita en el desarrollo del documento.
- b) Se hará uso únicamente del material PLA (PRUSA Research, 2018) como el termoplástico a caracterizar.
- c) No se hará uso de materiales compuestos para el estudio de las propiedades mecánicas de estructuras tipo sándwich.
- d) Los especímenes construidos en material termoplástico se realizarán bajo distintas configuraciones celulares descritas en el desarrollo de este documento.
- e) Se usará una configuración de impresión determinada para enfocar el estudio en las estructuras celulares y no en la configuración de la impresión 3D.
- f) Se realizarán únicamente pruebas mecánicas destructivas a compresión descritas en el desarrollo del documento.
- g) La metodología, los protocolos de procedimiento y los resultados experimentales de estructuras celulares manufacturados en deposición fundida expuestos en este documento serán reutilizables únicamente si se hace uso del mismo material, mismo tipo de maquinaria y de los procedimientos establecidos.
- h) No se realizarán análisis computacionales de elementos finitos para ninguna de los especímenes producidos en PLA para estructuras celulares.
- i) Se usará solo una referencia de material y un solo proveedor (PRUSA Research, 2018) para los materiales termoplásticos a utilizar.

j) Los ensayos mecánicos se enfocarán solo a pruebas de compresión plana sobre las diferentes configuraciones del núcleo manufacturadas.

### **Marco teórico – conceptual**

En esta sección del documento, se describirá la teoría que fundamenta la prueba experimental desarrollada en la presente investigación, incluyendo, los aspectos y requerimientos que exige la norma de ensayos mecánicos utilizada, así como, las propiedades relevantes de estructuras celulares.

#### **1.6 Estructura celular tipo honeycomb**

La palabra célula viene del Latín “Cella”, que significa pequeño compartimiento. En la naturaleza, la materia compuesta por pequeños espacios o poros se conoce como sólidos celulares. Este tipo de materia ha sido utilizada a lo largo de la historia de la humanidad, algunos ejemplos de sólidos celulares se pueden encontrar en la madera, el corcho, corales marinos, paneles de abeja y muchos más. (Gibson & Ashby, 1997)

El interés del ser humano por producir su propio material celular lo ha llevado a introducir la arquitectura del panel de abejas, el cual es conformado por un conjunto de celdas hexagonales interconectadas entre sí, dicha conformación o estructura celular ha demostrado ser un elemento estructural de gran valor para la industria aeroespacial debido a su capacidad de soportar grandes esfuerzos a compresión con relación al bajo peso del honeycomb.

Las características mecánicas inherentes del honeycomb se basan netamente en parámetros físicos de la geometría y su peso, se fundamentó el diseño del honeycomb en función a la geometría de celda, el tamaño de la celda, el espesor de pared de la celda y por último el material de composición. (HEXCEL, 1999)

##### **1.6.1 Estructura de celda**

Los honeycomb están conformados por celdas interconectadas entre sí por medio de sus caras y bordes, estas celdas generan un patrón bidimensional el cual genera la estructura celular del

honeycomb. Existen diversas geometrías de celda que conforman un honeycomb, el hexágono es la más utilizada en la industria, se compone de celdas con una conectividad de tres puntos en sus bordes, esto permite que sean más eficientes en comparación a celdas con formas rectangulares o triangulares, debido a que estas últimas utilizan más material para encerrar el mismo volumen de celda (Gibson & Ashby, 1997). Adicionalmente, se han investigado otras formas de celda como lo son las geometrías quirales, estas han demostrado tener un comportamiento tipo auxético (*auxetic*) al momento de aplicar una carga que genere deflexión del panel, esto produce una curva poco usual de mejores prestaciones mecánicas en comparación con la geometría hexagonal la cual genera una curva anti clástica al ser deformado el honeycomb, por lo cual es más beneficioso en términos de caracterización de un honeycomb (Miller, Smith, Scarpa, & Evans, 2009). Sin embargo, se determinó la aplicación de una geometría hexagonal para el honeycomb a fabricar debido a la comparación mecánica que se desarrolló con estructuras celulares que se comercializan actualmente en la industria, ver Anexo 0.

### 1.6.2 Caracterización de celda

La geometría definida para una sola celda del honeycomb se considera como un prisma hexagonal, las características inherentes para una sola celda se registraron en la Tabla 2.

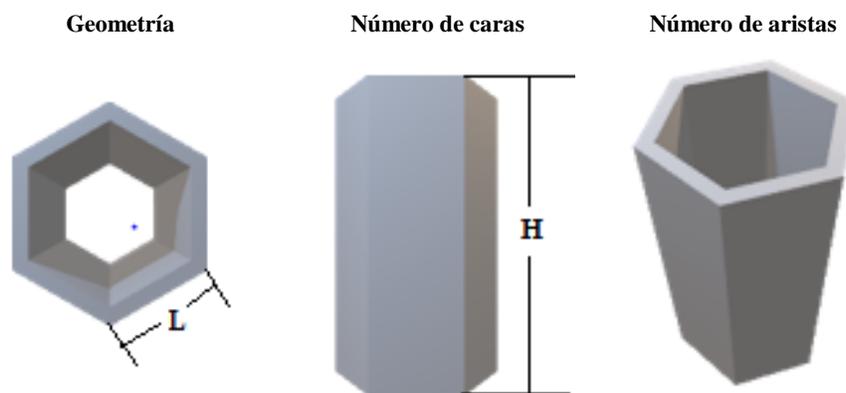


Figura 10. Prisma hexagonal.

Fuente: (Autores, 2018).

Tabla 2. Caracterización geométrica de celda.

Geometría	Número de caras	Número de aristas	Número de vértices	Volumen de celda	Área superficial
Prisma hexagonal	8	18	12	$\frac{3\sqrt{3}}{2}L^3A_r$	$3\sqrt{3}L^2(1 + 2A_r/\sqrt{3})$

Fuente: (Gibson & Ashby, 1997).

La relación de aspecto ( $A_r$ ) en una estructura celular, es el cociente entre el valor de la altura (H) de la celda y el valor de longitud de vértice (L). (Gibson & Ashby, 1997).

### 1.6.3 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 ( $\rho^*$ ) el cual conforma el honeycomb, sobre la densidad del sólido o núcleo ( $\rho_s$ ). En la Figura 11 se puede ver que el esfuerzo a compresión varía exponencialmente en función al cambio de la densidad del honeycomb, esta comparación se realizó para diferentes paneles variando el material de fabricación como se puede ver en la figura a continuación (HEXCEL, 1999).

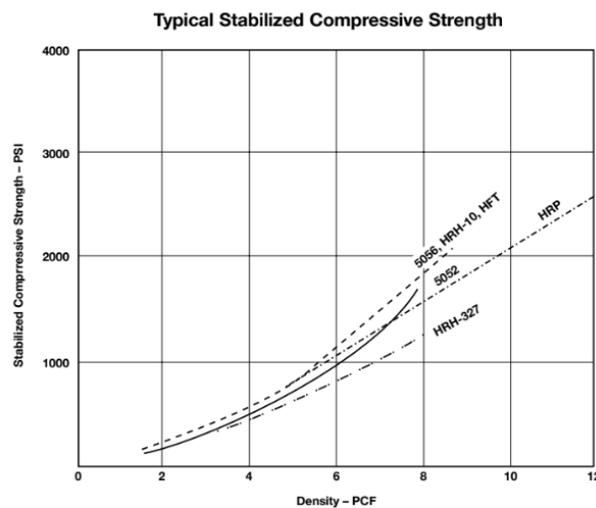


Figura 11. Grafica de esfuerzo a compresión en función a la densidad del panel.

Fuente: (HEXCEL, 1999).

Mediante la Ecuación que se presenta, se puede calcular la densidad relativa para la celda de una estructura celular hexagonal prismática.

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

Por otro lado, el cálculo de la densidad nominal del panel se establece mediante la obtención del volumen del honeycomb y su peso, el cual depende de la densidad del PLA utilizado para manufacturar los especímenes.

#### **1.6.4 Polímeros en estructuras celulares**

Las propiedades de las estructuras celulares dependen de la densidad relativa, geometría y tamaño de la celda. De manera similar, las propiedades del material el cual conforma el honeycomb tienen un papel importante en las características finales de este tipo de estructuras. La implementación de polímeros termoplásticos basado en una estructura tipo honeycomb es un campo de investigación donde no se ha profundizado totalmente, debido a que la mayoría de los paneles celulares están conformados por aleaciones de aluminio, aramidas y epóxicos termoestables (Gibson & Ashby, 1997). Por otro lado, la expansión progresiva de métodos de manufactura como el FDM (Sanchez R & Cortés R., 2006), ha permitido un proceso de producción versus experimentación mucho más accesible, por lo cual, el proceso de caracterización de materiales y estructuras para la ingeniería se desenvuelve de una manera más rápida y fácil. La estructura interna del PLA tiende a ser amorfa y semi cristalina en estado sólido, la densidad de los termoplásticos como el poliestireno (PS), polietileno (PE) y metacrilato (PMMA) se acercan al valor de  $1 \text{ mg}/\text{m}^3$  (NatureWorks, 2017). Los termoplásticos presentan una característica la cual permite que sean fácilmente manejables en el proceso de FDM, el punto de fundición se presenta en un rango definido el cual la estructura interna del termoplástico se comporta como un sólido viscoelástico hasta llegar a una condición de viscosidad líquida donde puede ser moldeado el material (Gibson & Ashby, 1997).

### 1.6.5 Ácido poliláctico – PLA

Las características físicas y mecánicas del biopolímero utilizado para la fabricación de los especímenes del lote A y B de prueba se pueden consultar en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades del ácido poli láctico PLA.

Propiedad	Valor	Método ASTM
Densidad	1,24 g/cc	D1505
Esfuerzo tensión	60 MPa	D882
Módulo de tensión	6 MPa	D882
Temperatura de fusión	145 – 160°C	D3418
Temperatura de transición vítrea	55 – 60°C	D3418
Dureza	80 (ShoreD)	Durómetro

Fuente: (NatureWorks, 2017).

### 1.6.6 Propiedades del honeycomb en el plano (in-plane honeycomb)

Las propiedades mecánicas de un honeycomb están en función a como este sea orientado con respecto a las cargas aplicadas, la orientación se define según como sean ubicadas las celdas en la conformación del material tipo sándwich. Cuando se habla del término (*in-plane*) en un honeycomb, se hace referencia a que las cargas que se aplican están en dirección de los ejes coordenados X o Y cómo se puede ver en la Figura 12. Las cargas aplicadas en las direcciones descritas generan efectos diferentes en relación con sus propiedades mecánicas y la forma en cómo se deforma en honeycomb en comparación con un panel que sea orientado en el plano (*out-of-plane*) el cual se explicará posteriormente en esta sección del documento.

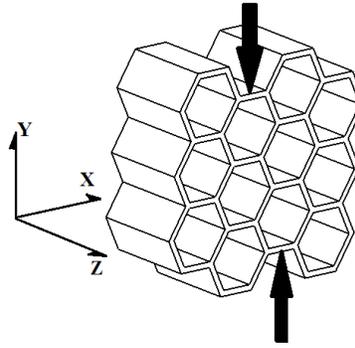


Figura 12. Carga de compresión aplicado en el plano XY perpendicular a la orientación de celda.

Fuente: (Autores, 2018).

Al aplicar una carga de compresión sobre un panel de honeycomb en este plano, inicialmente las paredes de las celdas se doblan o flectan generando un comportamiento lineal elástico en la zona hookiana de la gráfica esfuerzo-deformación del honeycomb. Al sobre pasar el límite elástico del material de composición del honeycomb, la celda colapsa debido a la fluencia del material.

Por último, la celdas terminan de colapsar cuando las paredes que conforman la geometría de la celda se juntan y el conjunto de todas las celdas se empiezan a acumular generando un efecto conocido como densificación de celdas en el honeycomb, este fenómeno incrementa la rigidez del elemento rápidamente y se evidencia como una curva exponencial en la gráfica de esfuerzo-deformación después de pasar por una zona conocida como (*Plateau*) en la cual el esfuerzo permanece relativamente constante en función a un aumento de deformación del honeycomb (Gibson & Ashby, 1997).. En la Figura 13 se presenta la gráfica de esfuerzo-deformación para un material metálico.

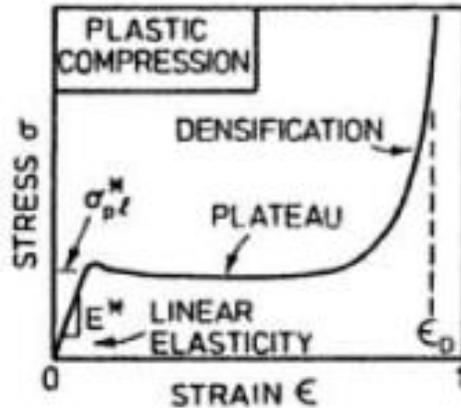


Figura 13. Gráfica de esfuerzo-deformación de un material elástico - plástico (Aluminio) en el plano (*in-plane*).

Fuente: (Gibson & Ashby, 1997).

Al aumentar la densidad relativa del honeycomb, las paredes de las celdas por ende tendrán un espesor mucho mayor por lo cual la resistencia a colapsar del sistema de celdas será mucho mayor. Cuando se tiene un honeycomb con sus propiedades geométricas iguales para cada celda, las cuales son para un hexágono sus 6 lados iguales en longitud, el espesor de las paredes constante y un ángulo interno de  $120^\circ$  para cada pared de la celda; pueden considerarse las propiedades en el plano "*in-plane*" como isotrópicas (Gibson & Ashby, 1997).

### 1.6.7 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 es aplicada en la dirección al eje Z como se puede ver en la Figura 14.

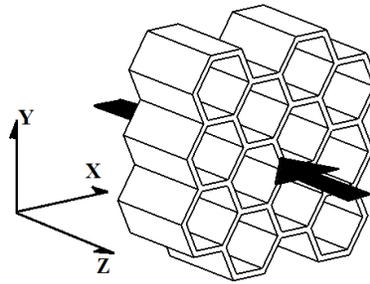


Figura 14. Carga de compresión aplicada en dirección al eje Z siendo paralela a la orientación de celda.

Fuente: (Autores, 2018).

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 honeycomb cargados 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 en elementos como conformación estructural interna de alerones para aeronaves y palas de helicópteros (Relaño Pastor, 2013). El comportamiento mecánico del honeycomb presenta en la gráfica de esfuerzo-deformación, una zona lineal elástica del elemento en función al material de composición, dicho comportamiento se interfiere cuando las celdas del honeycomb se empiezan a pandear o doblar debido a la carga, en esta fase, la gráfica de esfuerzo-deformación presenta una zona (*Plateau*) parecida al comportamiento de un honeycomb cargado en el plano (*in-plane*); pero el esfuerzo se manifiesta como una oscilación que tiende a ser constante en un rango definido de esfuerzo el cual está en función al material de composición del honeycomb, esto se debe a que las celdas que se están deformando y aplastando en conjunto forman un asentamiento del panel no constante por lo cual se presenta oscilaciones del esfuerzo en dicha zona de la gráfica. Por último, se llega a la falla total de la estructura celular donde las paredes de las celdas se desgarran o aplastan formando un fenómeno de densificación el cual aumenta la rigidez de la estructura exponencialmente

hasta alcanzar la carga última de trabajo. En la Figura 15 se muestra el comportamiento típico de un honeycomb compuesto por un material metálico.

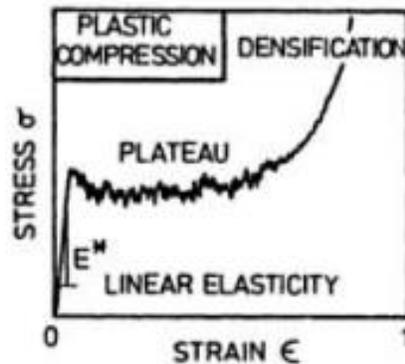


Figura 15. Gráfica de esfuerzo-deformación de un material elásto-plástico (Aluminio) en el plano (out-of-plane).

Fuente: (Gibson & Ashby, 1997).

### 1.7 Manufactura de modelado por deposición fundida (FDM)

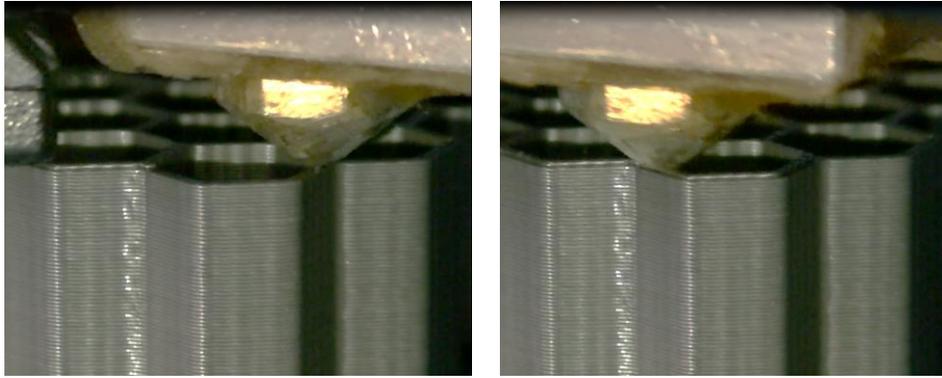
Esta es una de las técnicas de manufactura aditiva comúnmente basadas en la extrusión de un material en un estado semi líquido, los materiales más empleados en estos procesos son PLA, ABS, PPSU y metales en nuevas implementaciones tecnológicas. Este también se conoce como un proceso de fabricación usado para el modelamiento de piezas 3D en una producción a escala, este proceso utiliza la deposición de termoplásticos o metálicos, por capas para la conformación de cualquier tipo de pieza. El material se almacena por lo general en carretes, para ser introducidos en la boquilla del extrusor, el cual puede desplazarse en tres ejes de forma electrónica generalmente por motores cartesianos. Las piezas construidas bajo este principio se solidifican por medio de finos hilos después de la deposición instantánea del extrusor, algunas impresoras del mercado contienen uno o más extrusores.

Los componentes del FDM son, una cámara de precalentamiento donde el material termoplástico es llevado a una temperatura por debajo de la temperatura de fusión, posteriormente se lleva el material a un extrusor ubicado en un cabezal móvil que deposita material de forma controlada

en cada capa siguiendo una trayectoria preestablecida. Las dimensiones de este tienen consecuencias tanto para el control de flujo como la altura de capa, los movimientos de esta máquina comprenden los ejes X, Y y Z, así mismo se controla la velocidad de extrusión o inyección del material. Por lo tanto, este tipo de técnicas de manufactura aditiva reducen costos, tiempo de fabricación, y simplifican la manufactura de piezas complejas (Relaño Pastor, 2013).

Una máquina tipo impresora 3D crea objetos por medio de la técnica por deposición fundida utilizando un proceso de control de características de 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 controladas por medio de un software, uno de los denominados software de control es el “FlashPrint”. Este software se encarga de convertir cualquier modelo 3D dado en formato STL en un formato “Gcode”, el cual se exporta a una memoria SD con el propósito de generar una compatibilidad con el lenguaje de programación de la impresora 3D. Por último, corresponde insertar la memoria en la ranura de la impresora para codificar temperaturas, velocidades, precalentamiento y seleccionar el archivo correspondiente desde el panel de control para una correcta impresión de un modelo en específico.

La fabricación aditiva produce objetos en una sucesión de capas de la parte inferior, hacia arriba. Esto produce la solidificación entre capas, contrario a los procesos tradicionales de fabricación, el termoplástico es fundido y depositado por un extrusor que deposita el material en capas del grosor requerido una a una. 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 diversas piezas, 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 por elevadas temperaturas en el extrusor, ver Figura 16.



*Figura 16. Proceso de FDM para construcción de celdas en honeycomb de 3/8".*

*Fuente: (Autores, 2018).*

### **1.7.1 Impresora 3D**

La máquina utilizada para la fabricación de los especímenes fue una impresora 3D de la marca comercial FlashForge, modelo Creator Pro. Esta máquina cuenta con dos extrusores y el rango de materiales de trabajo se extiende desde PLA y ABS hasta materiales flexibles y derivados de fibras naturales como madera, la impresora cuenta con un marco rígido fabricado en aluminio lo cual permite una resolución de impresión mucho más precisa debido a la absorción de vibraciones y al control de temperatura durante el proceso de fabricación. Además, la plataforma de impresión está fabricada en aluminio de grado aeroespacial con un espesor de 6,3 milímetros asegurando una temperatura uniforme sobre toda la superficie, el extrusor de impresión funciona mediante motores cartesianos que permiten movimientos horizontales en un plano paralelo a la superficie de impresión y la plataforma de impresión tiene un movimiento vertical el cual permite la conformación de piezas en tres dimensiones (FlashForge Corporation, 2016). Las especificaciones técnicas de la máquina se muestran en la Tabla 4.



Figura 17. Impresora 3D Creator Pro.

Fuente: (FlashForge Corporation., 2016).

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la impresora 3D Creator Pro.

<b>Especificación</b>	<b>Característica</b>
Tecnología de impresión	FDM
Volumen de construcción	227 x 148 x 150 milímetros
Diámetro de filamento aceptable	1,75 milímetros
Diámetro de extrusor	0,4 milímetros
Peso neto	21 kilogramos
Materiales impresión compatibles	PLA, ABS, PVA, HIPS
Velocidad de impresión	40 a 100 mm/s
Marco de impresora	Panel PVC + Powder Coated Steel
Resolución de impresión	100~500 micrones
Firmware	Sailfish
Software	FlashPrint
Entrada AC	100-240 V, -2amps, 50-60 Hz, 350 Watts
Tipo de archivo	STL, OBJ

Fuente: (FlashForge Corporation., 2016).

## 1.8 Normativa ASTM C365

La norma ASTM C365 / C365 M-16 indica los procedimientos estandarizados para someter núcleos utilizados en estructuras tipo sándwich a una carga uniaxial de compresión “out- plane”, con el fin de poder determinar las propiedades mecánicas del núcleo. El módulo de compresión y el esfuerzo de compresión último serán las características por determinar y calcular mediante este

estudio experimental. Para poder efectuar el desarrollo satisfactorio y válido de la prueba, es necesario cumplir con los parámetros que exige la norma ASTM C365 los cuales se describen a continuación.

### **1.8.1 Parámetros del espécimen de prueba**

El diseño de la geometría de los especímenes sometidos a pruebas está basado en los siguientes parámetros que exige la normativa ASTM C365.

#### **1.8.1.1 Aspectos geométricos requeridos**

Inicialmente, la norma sugiere probar por lo menos cinco especímenes por cada condición de prueba específica, según el documento de estandarización para pruebas a núcleos de estructuras tipo sándwich establecido como un documento “Military Standard” MIL-STD-401B (Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, 1956), 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.

Un parámetro central para la adquisición de datos precisos en las pruebas experimentales es establecer la geometría final del espécimen. La norma limita ciertas características como lo son 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 5, 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 (ASTM International, 2016) , ver Tabla 5.

Tabla 5. Área transversal recomendada para espécimen de prueba.

Tamaño celda mínimo (mm)	Tamaño celda máximo (mm)	Área transversal mínima (mm <sup>2</sup> )
.....	3.0	625
3.0	6.0	2500
6.0	9.0	5625

Fuente: (ASTM International, 2016).

Por otra parte, la norma requiere que el proceso de fabricación de la probeta y sus respectivos revestimientos (*facing*) cumplan con las siguientes características, los revestimientos 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. El proceso de manufactura (FDM) permite obtener resoluciones de capa del orden de 0,1 milímetros, en consecuencia, los especímenes serán idénticos a la geometría de diseño que se estableció en el software de diseño utilizado, teniendo ligeros desfases los cuales se controlaron bajo la implementación del control de producción y calidad diseñado.

Es necesario resaltar que la norma establece dos clases de pruebas sobre un núcleo el cual tiene el fin de ser parte de una estructura tipo sándwich. Las pruebas de compresión estabilizada (*Stabilized Compression Test*) y prueba de compresión simple (*Bare Compression Test*). El primer método de prueba exige que al núcleo se le adhiera en la superficie inferior y superior, un revestimiento que tenga la misma área del núcleo y que tenga un espesor como mínimo del 0.05 % del espesor nominal del núcleo a probar.

Este proceso se realiza debido a que la prueba de compresión es altamente sensible a inestabilidades geométricas sobre las superficies transversales del núcleo, lo cual genera un fenómeno en el diagrama de esfuerzo-deformación el cual presenta un crecimiento no lineal del comportamiento elástico del núcleo debido al asentamiento de la superficie con las superficies de contacto de la máquina de prueba, es por esto, que es de vital importancia asegurar superficies planas y totalmente

perpendiculares a las celda del núcleo. Por último, el segundo método de prueba somete el núcleo a ser probado sin el uso de revestimientos siendo así más sencilla de ejecutar la prueba, sin embargo, las estructuras celulares utilizadas en la industria aeroespacial requieren ser probadas bajo el método de compresión estabilizada (ASTM International, 2016).

### **1.8.1.2 Identificación de especímenes**

Se recomienda el uso de un sistema de referencia para cada espécimen, el uso de un sistema alfanumérico simple de dos dígitos para la identificación de los especímenes fabricados. Se marcó cada espécimen con una etiqueta de producción informando la fecha de fabricación, el tamaño de celda y el código alfanumérico designado para dicha geometría visibles en el Anexo 2.

## **1.9 Control de producción y calidad**

Se estableció un plan de inspección y evaluación de defectos para los especímenes fabricados. El control de calidad se dividió en dos secciones las cuales constan de un control inicial de impresión en el cual se registraron datos inherentes del proceso de impresión de los especímenes, como lo son las dimensiones finales, tiempo de impresión, cantidad de material utilizado, temperaturas de extrusión y cama, tiempo de fabricación y la fecha en que se realizó. La segunda sección del control de calidad se estableció en realizar una inspección visual para evaluar los defectos presentes en cada uno de los especímenes, esta inspección se fundamentó en la clasificación de los defectos totales observados a lo largo del proceso de fabricación. Para realizar la clasificación de dichos defectos, se establecieron tres categorías que difieren entre si según el nivel de imperfección, basados en el método de muestreo que plantea el documento “Military Standard” MIL-STD-105D y los criterios de validación requeridos en la norma ASTM C365 (Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, 1963).

Los tres tipos de defectos que se describen en el documento MIL-STD-105 establecen la existencia de defectos críticos, defectos mayores y defectos menores. El criterio porcentual de defectos se estableció basándose en el planteamiento de un Nivel Aceptable de Calidad (NAC) propuesto por el equipo de trabajo, por ende, el NAC es conformado por criterios de aceptación del espécimen habiendo realizado una inspección por atributos, los cuales están en función de un porcentaje de defectos visuales establecidos en la clasificación de defectos críticos, mayores y menores, en donde el valor porcentual de defectos identificados mediante una inspección visual del espécimen deba estar por debajo de dicho valor total de defectos establecidos porcentualmente para el NAC. El porcentaje de defectos visuales establecido o el porcentaje de aceptación en inspección visual, se deduce de la Ecuación que se presenta a continuación (Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, 1963).

$$P. D. V = \frac{N. D \times 100}{E. I}$$

Donde

P. D. V = Porcentaje de defectos visuales.

N. D. = Número de defectos.

E. I. = Especímenes inspeccionados.

Por otro lado, la norma ASTM C365 establece que los especímenes que sean probados y fallen por solo un borde o esquina, serán considerados como inválidos y no se incluirán cálculos para el elemento en cuestión. La invalidez de un espécimen según la norma ASTM C365, se determina cuando un espécimen se deforma en una sección localizada debido a aplicación de una carga excéntrica localizada generada por defectos evidentes en el método de producción, deformaciones evidentes que puedan producir inequidad geométrica en alguna zona del espécimen o por la ubicación no centrada del espécimen en la máquina de ensayos (ASTM International, 2016). Dicho comportamiento puede ser generado cuando un espécimen presente algún defecto crítico.

Los defectos mayores son defectos diferentes a los defectos críticos y son considerados por que probablemente resulten en una falla en el espécimen cuando sea probado, dichos defectos permiten que el espécimen sea probado ya que no presentan aspectos físicos sobredimensionados los cuales terminen como resultado en la invalidez absoluta de la prueba según los parámetros descritos anteriormente para el comportamiento del espécimen. Por último, los defectos menores son defectos los cuales no tienen mayor afectación sobre las características finales de espécimen las cuales conlleven a una prueba de compresión invalida, por lo tanto, son defectos meramente estéticos o que no tienen mayor magnitud en relación con los otros tipos de defectos establecidos anteriormente, los defectos menores se consideran cuando están presentes en los revestimientos del espécimen. A continuación, se describen los diferentes defectos de fabricación.

#### Defecto Crítico

- i. Pandeo de la pieza (No uniformidad paralela con una superficie plana)
- ii. Discontinuidad progresiva de filamento depositado en el núcleo.
- iii. Deposición de filamento incorrecto debido a desajuste en la plataforma o cabezal de impresión.
- iv. Calcinación de material en cualquier parte del espécimen (Zonas Fundidas)
- v. Acumulación de material en cualquier parte del espécimen (Bultos de material)
- vi. Encrespamiento o *creep* en las esquinas del espécimen.

#### Defecto Mayor

- vii. Deposición seccionada de filamento sobre el núcleo debido a codificación del Gcode.
- viii. Burbujas de aire entre deposición de filamentos.
- ix. Deposición de filamento separada.
- x. Sobre posición en deposición del filamento.

### Defecto Menor

- xi. Efecto de *puenting* en revestimientos.
- xii. Presencia de hebras en el núcleo y/o revestimiento.
- xiii. Discontinuidad de filamento en revestimiento.
- xiv. Deposición ondulada de filamento en el revestimiento.

## **1.10 Equipos y herramientas necesarias para desarrollar una prueba válida**

La norma ASTM C365 estipula el uso de ciertas herramientas y equipos para poder desarrollar satisfactoriamente las pruebas a compresión descritas en el dicho documento, la precisión de las herramientas y sus tolerancias deben ser consideradas para cumplir los intervalos de confianza geométricos aceptables para la medición de las dimensiones que se requieren para los especímenes, estas dimensiones son el largo, ancho y alto de cada probeta (ASTM International, 2016).

### **1.10.1 Calibrador y Micrómetro**

Se requiere el uso de una herramienta de medición que permita obtener valores dimensionales con un rango de tolerancia del uno por ciento en función a las medidas nominales del espesor, longitud y ancho del espécimen. Se recomienda el uso de un calibrador o micrómetro con mordazas planas, cuando sus dos revestimientos tengan una superficie lisa como se observa en la Figura 18.



*Figura 18. Calibrador digital Vernier y Micrómetro.*

*Fuente: (Autores, 2018) (CDL metrología, 2018).*

### 1.10.2 Platos de carga

La máquina universal de ensayos debe transmitir la carga mediante un plato fijo y un plato movable que tenga un asiento de junta esférica. Los platos deben estar alineados concéntricamente para no aplicar una carga excéntrica sobre el espécimen. La superficie del plato debe ser totalmente lisa y constituida de un material firme y resistente como se aprecia en la Figura 19.



*Figura 19. Platos de carga inferior y superior.*

*Fuente: (Autores, 2018).*

### 1.10.3 Máquina universal de ensayos

La máquina de pruebas destructivas debe cumplir los estándares descritos en la práctica ASTM E4 (Práctica para verificación de fuerza en máquinas de prueba) los cuales establecen que la máquina debe tener un cabezal fijo y un cabezal móvil, el mecanismo del plato de carga móvil debe permitir un control específico en la velocidad de desplazamiento al igual que debe indicar la fuerza aplicada con una precisión dentro del uno por ciento del valor indicado como se observa en la

Tabla 6. Por último, la máquina debe indicar y monitorear el desplazamiento de carrera del plato de carga móvil con una precisión del uno por ciento del valor real. Debido a estas especificaciones, se decidió hacer uso de la máquina universal de ensayos Tinius Olsen modelo H300KU, las características técnicas se especifican en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la maquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU.

ESPECIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS
Marco de carga	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Designación: Serie U</li> <li>- Capacidad: 300 kN</li> <li>- Estilo: Montaje de suelo</li> <li>- Max. Desplazamiento de cabezal: 1200 mm</li> <li>- Max. Diámetro espécimen: 650 mm</li> <li>- Construcción: Acero sólido, rigidez de 200 kN/mm</li> </ul>
Control del sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 602 control de mano remoto</li> </ul>
Medición de fuerza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de 2% a 100% con precisión de 0,5% de fuerza aplicada.</li> <li>- Celda de carga: Shear Web Type</li> <li>- Conforme a normativas EN10002, ASTM E4, DIN 51221, ISO 75001</li> <li>- Resolución de celda de carga: 1 part 130000 for +/- FS</li> <li>- Max Limite carga = 1,09x FS Carga (N)</li> </ul>
Medición de extensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precisión óptica codificada o extensómetro externo opcional</li> <li>- Rango de medida individual de 0 a 1200 mm</li> <li>- Resolución 0,0001 mm</li> <li>- Precisión 0,01 mm/300 mm</li> </ul>
Control de velocidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rango de velocidad: Prueba 0,01 mm/min a 500mm/min; Velocidad de retroceso 0,01 mm/min a 700 mm/min</li> <li>- Programación de velocidad en pasos de 0,01 mm/min</li> <li>- Precisión de velocidad <math>\pm 0,5\%</math> de la velocidad total</li> <li>- Sistema de conducción: Brushless Servo Motor</li> </ul>
Opciones de Hardware	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tinius Olsen rango de extensómetros contacto y no contacto</li> <li>- Tinius Olsen rango de transductores de desplazamiento</li> </ul>
Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto: 2465 mm</li> <li>- Ancho: 1135 mm</li> <li>- Profundidad: 700 mm</li> </ul>
Peso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1165 kilogramos</li> </ul>
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trifásico 415<math>\pm</math>10% VAC</li> </ul>
Ambiente de operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura 0°C a 38°C</li> <li>- Humedad 10% a 90% Non-Condensing Wet Bulb Method</li> </ul>
Fabricante	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tinius Olsen Ltd, Salfords, Redhill, Inglaterra</li> </ul>

Fuente: (Tinius Olsen Ltd., 2018).



*Figura 20. Máquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU.*

*Fuente: (Tinius Olsen Ltd., 2018).*

#### **1.10.4 Plantillas de alineación de espécimen**

Para asegurar que los especímenes se instalen correctamente sobre el plato de carga inferior de la maquina universal de ensayos, se diseñaron dos plantillas de centrado para cada tipo de espécimen fabricado (especimen A y espécimen B). En el Anexo 7 se encuentran las dos plantillas con instrucciones de instalación.

#### **1.10.5 Báscula**

El uso de una báscula es necesario para poder medir la cantidad de masa que tiene cada uno de los especímenes impresos bajo el método de FDM. Con el valor de masa conocido es posible conocer la densidad relativa y nominal de cada espécimen los cuales son dos parámetros físicos de gran relevancia e influyen en la capacidad final de carga de un honeycomb.

#### **1.11 Parámetros para el desarrollo de prueba válida**

Se describen los aspectos relevantes exigidos en la norma utilizada para poder obtener resultados validos de las pruebas a compresión estipuladas.

### **1.11.1 Parámetros por especificar antes de la prueba**

Se debe intervenir el método de muestras utilizado haciendo referencia a propiedades del material, la geometría del espécimen, condiciones ambientales de la prueba y datos de reporte requeridos previas al desarrollo de la prueba con el fin de identificar los equipos y herramientas necesarias para obtener resultados precisos.

### **1.11.2 Parámetros generales**

Se debe reportar las dimensiones de la geometría final de cada espécimen a probar asegurando la precisión de las medidas en un 1 % de tolerancia. Así como especificar la densidad de diseño, nominal y relativa del honeycomb como se describe en la sección de densidad relativa de este capítulo.

La medición de los especímenes debe concentrarse en las siguientes características: largo, ancho y alto. La precisión de las mediciones tomadas debe estar dentro del 1% de la dimensión total medida. El largo y ancho del espécimen debe tener una precisión de  $\pm 0,25$  milímetros mientras que el espesor o altura debe tener una precisión de  $\pm 0,013$  milímetros (ASTM International, 2016). Por ende, dichos valores dimensionales se estipularon como las tolerancias que deben tener cada uno de los aspectos geométricos a medir en un espécimen fabricado.

Los especímenes deben ser almacenados en un recinto con baja humedad y fuera del alcance de la luz solar directa. Si se desarrollaran las pruebas a compresión en ambientes atmosféricos de alta temperatura y humedad, es necesario reacondicionar el laboratorio de prueba con un control de regulación del ambiente el cual mantenga un rango de temperatura deseado, situación que no se presentó debido a las características climáticas de la ciudad de Bogotá.

La velocidad de desplazamiento axial de los platos de carga durante la prueba debe seleccionarse en un valor en el cual la falla del espécimen ocurra entre los 3 a 6 minutos de desde que se haya iniciado la prueba. La norma ASTM C365 sugiere una velocidad de 0,5 mm/min. Por otra parte, se debe diseñar un método en el cual se asegure la instalación adecuada del espécimen sobre el

plato de carga inferior, se sugiere realizar una marcación en el centro del plato de carga con la silueta del espécimen, este procedimiento asegurara una aplicación de la carga uniforme sobre todo el elemento para no generar carga excéntrica sobre este.

Por último, se requiere la aplicación de una precarga sobre el espécimen instalado con un valor designado por la norma ASTM C365 de 45 Newtons, la carga final aplicada sobre el espécimen debe ser llevada hasta que ocurra el fallo de la estructura del honeycomb o hasta que la maquina indique una deformación igual al 2 % del espesor inicial del honeycomb (ASTM International, 2016).

### 1.11.3 Parámetro que invalida una prueba

Para tomar una prueba a compresión como invalida se debe considerar el único parámetro que exige la norma cuando se observa el modo en como comporta el espécimen al ser probado. Solo es aceptada la falla del espécimen cuando se presenta una compresión uniforme sobre este.



Figura 21. a). Falla por carga excéntrica aplicada; b). Falla por deposición de filamento discontinuo.

Fuente: (Autores, 2018)

## 1.12 Tipos de fallas mecánicas en pruebas de compresión plana

Los núcleos celulares sometidos a esfuerzos de compresión pueden presentar varios tipos de falla los cuales se identificaron mediante ensayos iniciales desarrollados por el grupo de trabajo y la

experiencia en el campo de otras investigaciones realizadas. Según (Sood, Ohdar, & Mahapatra, 2011), las principales características de falla entre los filamentos depositados de material son fundamentadas en el fenómeno del desprendimiento de la unión interna entre cada capa de filamento, por otro lado, al aplicar una carga de compresión llegando a la capacidad máxima la cual puede soportar el elemento fabricado por FDM, las tensiones internas en el honeycomb generan sobre los filamentos un fenómeno de pandeo entre estos los cuales son posibles evidenciar mediante la presencia de sobre posición o doblamiento de una sección o de toda la celda que conforme el núcleo.

### **1.12.1 Falla por colapso plástico de la celda**

Al sobrepasar el límite en el comportamiento elástico del PLA debido a una carga de compresión aplicada, las celdas tenderán a doblarse y deformarse plásticamente generando fracturas frágiles dentro de las capas de material depositado por el proceso de FDM, al llegar a este punto es posible reconocer dicho fenómeno por la evidencia de microfracturas del plástico (Gibson & Ashby, 1997). Dicho colapso genera una especie de bisagra o doblez de la celda en donde se acumula o abulta el material de conformación del panel celular.

### **1.12.2 Falla por desprendimiento de filamentos**

Cuando un elemento fabricado por FDM es sometido a una prueba de compresión, se evidencia el desprendimiento sucesivo de filamentos depositados en las zonas laterales del espécimen. Al presentar un proceso de desprendimiento progresivo de los filamentos, estos pierden rápidamente la capacidad de soportar la carga en la dirección del filamento, sin embargo, se presentarán cambios de distribuciones de esfuerzos internos en el honeycomb mediante las celdas con fibras de plástico unidas y desunidas, esto genera que el comportamiento de esfuerzo-deformación del elemento sea afectado hasta presentar deformación plásticas o colapso de la celda como se explica en la sub capítulo anterior (Sood, Ohdar, & Mahapatra, 2011).



*Figura 22. Deformación cortante de celda debido a falla por deposición de filamento seccionado.*

*Fuente: (Autores, 2018).*

### **1.12.3 Falla por ausencia de filamento depositado en trayecto de extrusión**

En el proceso de FDM puede llegar a presentarse el caso donde el filamento no es depositado a lo largo del trayecto de extrusión. Este problema de fabricación puede ocurrir debido a factores restringidos al funcionamiento de la máquina, la adecuación de la máquina y obstrucciones en la alimentación del extrusor. Las secciones de espacio vacío donde no fue depositado material son consideradas como un concentrador de esfuerzos, al aplicar una carga de compresión sobre un elemento que presente este defecto, seguramente la falla y deformación inicial se manifestara en dicha sección.



*Figura 23. Ausencia de deposición de filamento en el espécimen.*

*Fuente: (Autores, 2018).*

### 1.12.4 Deformación lineal elástica de un honeycomb

El uso de paneles de honeycomb cargados en la dirección paralela al sentido de las celdas (eje Z) es comúnmente enfocado para la construcción de estructuras tipo sándwich, siendo el honeycomb el núcleo el cual soporta esfuerzos normales y cortantes como se puede ver en la Figura 24.

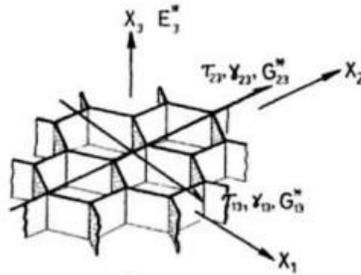


Figura 24. Deformación lineal elástica en las celdas tipo honeycomb.

Fuente: (Gibson & Ashby, 1997).

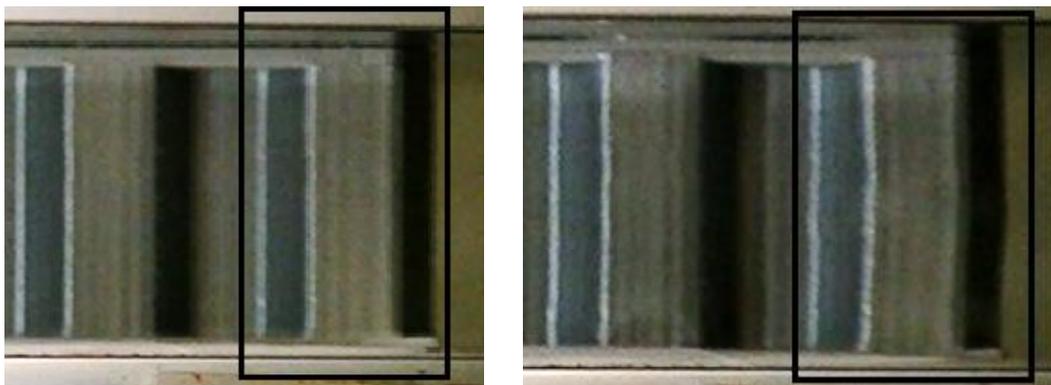
Los honeycomb que son cargados en esta dirección, suelen tener características mecánicas más elevadas en comparación a honeycomb cargados en la dirección de los ejes X o Y (*in-plane*), por lo cual son elementos mucho más rígidos. El módulo de elasticidad suele ser mucho mayor, por lo cual se presenta una zona de deformación elástica de las celdas mucho mayor, lo que se traduce en un mayor módulo de resiliencia del elemento. Igualmente, el esfuerzo último el cual soporta el honeycomb será mayor que el mismo valor de esfuerzo aplicado a un honeycomb en el plano (*in-plane*). Las distribuciones de esfuerzos cortantes que se presentan en un honeycomb cargado con una fuerza de compresión se comportan en función al punto de interconexión de tres paredes de celda para geometrías hexagonales. Cada celda experimentara deformaciones no uniformes debido a las restricciones de interconectividad de las paredes mencionadas anteriormente. La energía de deformación elástica se almacena en la deformación cortante de las paredes de celda, por otro lado, el módulo de elasticidad está relacionado con el espesor de la pared de celda y el tamaño de celda

siendo así factores geométricos que influyen linealmente en la densidad relativa y nominal del honeycomb (Gibson & Ashby, 1997).

### 1.12.5 Pandeo elástico de celdas

Las celdas de un honeycomb al ser comprimidas empiezan a generar en sus paredes de conformación, pandeos los cuales generan deformaciones cortantes de las paredes. Los honeycomb al ser fabricados bajo el método de FDM, en su estructura interna compuesta por una sucesión de capas de filamentos apilados, tenderán a generar una ondulación y desplazamiento entre ellos cuando se aplica la carga de compresión, el esfuerzo cortante presentado esta en función de la unión interna de filamentos que han sido fundido cada uno en el proceso de extrusión del PLA, es por esto, por lo que el honeycomb tiende a comportarse linealmente en la gráfica de esfuerzo-deformación del material de composición.

Por otro lado, las celdas de conformación del honeycomb tenderán a comportarse como se describe en teorías de mecánica para columnas las cuales al ser cargadas de tal manera que compriman el elemento, se genera un efecto de pandeo en dichas celdas las cuales absorberán energía de deformación hasta llegar a un punto de falla debido a las fuerzas de unión de los filamentos como se explicó anteriormente.



*Figura 25. Pandeo elástico de celda cuando es cargada a compresión.*

*Fuente: (Autores, 2018).*

## **Metodología**

Las características principales de esta investigación tienen un enfoque cualitativo con respecto al comportamiento mecánico y la caracterización del material por medio de ensayos destructivos, además se tiene un enfoque cuantitativo conforme al estudio e interpretación de resultados, gráficas y tablas comparativas, entre dos tamaños de celda de estructuras celulares tipo honeycomb, partiendo de las variables y limitaciones establecidas en la investigación. El desarrollo de la investigación parte de un seguimiento en el proceso realizado en los equipos proporcionados por la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá por parte de la elaboración de los autores del proyecto.

Durante la elaboración del presente proyecto se desarrolla un estudio que se enfoca en determinar las características mecánicas de los materiales a través de ensayos destructivos a compresión, acompañado de un protocolo de manufactura y de pruebas para determinar la cantidad de variables a manejar y definiendo la metodología de fabricación de los especímenes que se van a someter a una prueba de compresión. Inicialmente, se va a determinar la mejor configuración de impresión para estructuras celulares tipo honeycomb para el material termoplástico PLA que presente las mejores prestaciones mecánicas y así continuar con el desarrollo de la configuración de material tipo sándwich compuesto por un núcleo y una cara superior e inferior. El desarrollo de los protocolos de manufactura y prueba se representaron a través de procedimientos establecidos con base en la fabricación de los especímenes, otro aspecto relevante fue evaluar el proceso de manufactura por medio de un control de calidad diseñado para los elementos elaborados por medio de la tecnología FDM aplicables a este trabajo.

La cantidad de probetas elaboradas se realiza conforme y mediante a la normatividad teniendo en cuenta las variables propuestas y descritas a lo largo de esta norma (ASTM International, 2016) se desarrollarán dos tamaños de celda de estructuras celulares tipo honeycomb con un mismo espesor de capa. Para cada variación de celda se elabora un mínimo de cinco probetas conforme a la

especificación de normatividad y máximo de siete conforme al propósito que se establece por parte de los autores para los respectivos protocolos de manufactura y calidad.

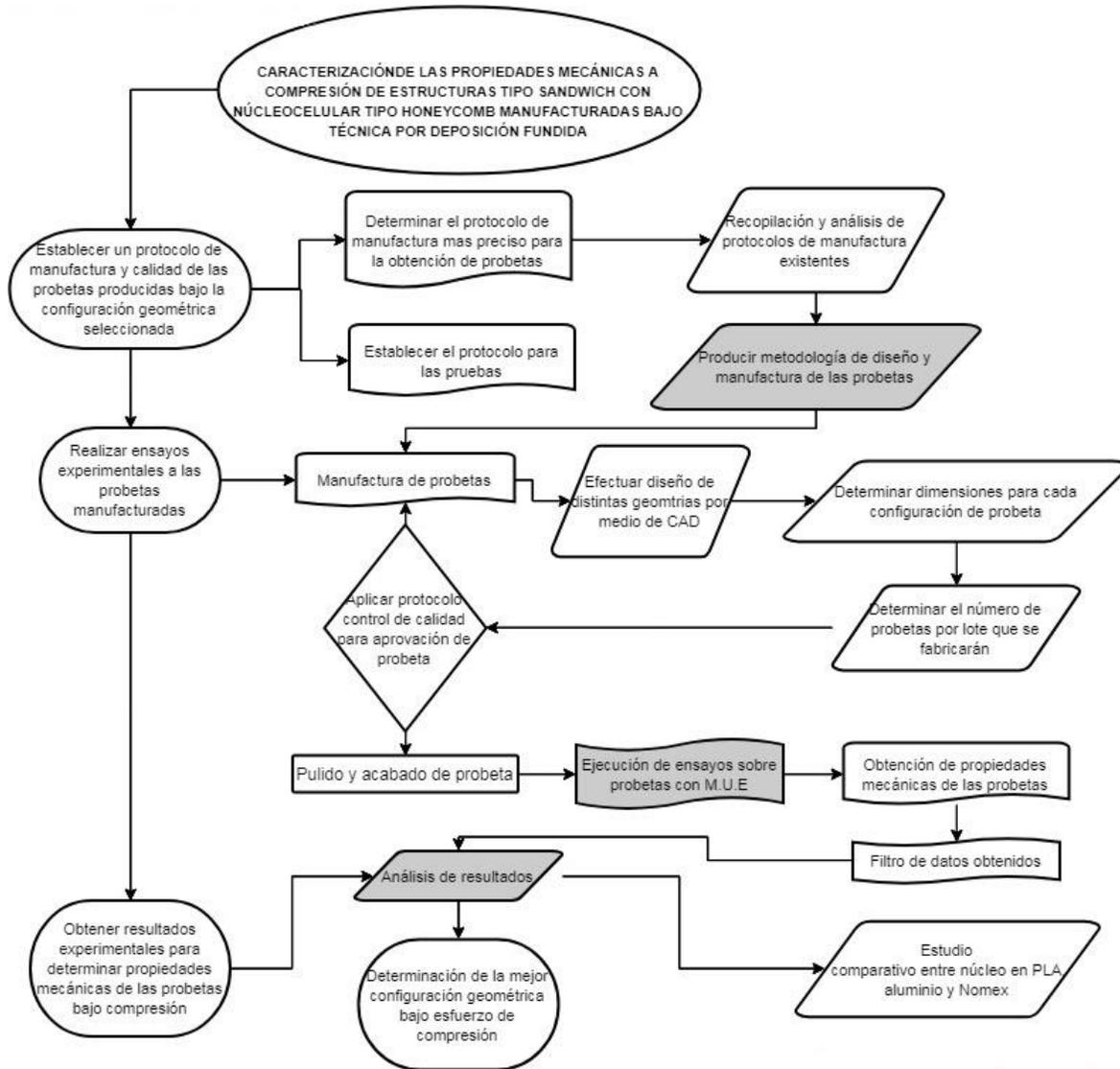


Figura 26. Diagrama de proceso de manufactura y análisis de especímenes.

Fuente: (Autores, 2018)

## Capítulo 2

### 2 Desarrollo de Ingeniería

En esta sección del documento se presentan los aspectos que se contemplaron para desarrollar el proyecto planteado, guiando los temas principales en el diseño de los especímenes, la fabricación y las pruebas mecánicas a compresión.

#### 2.1 Pruebas de impresión con tamaños de celda variables

El diseño de los especímenes se estableció mediante los requerimientos geométricos exigidos por la norma ASTM y por el tamaño de celda seleccionado del honeycomb, para determinar la geometría final de los especímenes a someter en la prueba de compresión, fue necesario desarrollar un análisis de los tamaños de celda más comunes producidos por diferentes fabricantes de honeycomb, esta información se agrupó en el Anexo 0. En la Tabla 7 se registraron los datos de honeycombs con diferentes tamaños de celda y parámetros de impresión propuestos para poder identificar las geometrías que la impresora puede fabricar en función a la resolución de impresión.

En primer lugar, se realizó el experimento de una prueba piloto para seleccionar el diseño geométrico de la estructura celular del núcleo, teniendo en cuenta 5 variaciones de tamaños de radio de celda basados en las recomendaciones de la Tabla 1 del Anexo 0, donde se postulan los tamaños mínimos y máximos de la celda para describir el proceso de configuración estructural de estas, este protocolo tiene como finalidad aportar y facilitar la obtención de parámetros tanto geométricos como de impresión y lograr una correcta producción de las probetas. Con los tamaños de celda determinados, se generaron los archivos pertinentes para cada configuración geométrica del honeycomb, dichos elementos se modelaron bajo el uso del software de código abierto OpenSCAD, el cual mediante lenguaje de programación permite generar sólidos variando el tamaño de celda, el espesor de pared de celda y el número de columnas y filas deseadas, posteriormente se generaron los archivos (.stl) los cuales se importaron al software FlashPrint, este programa permite codificar

archivos (.stl) en forma de “Gcode” con el cual la impresora 3D funciona y pueda fabricar la pieza deseada, el formato de trabajo para la impresora se denomina como (.x3g).

Tabla 7. Configuraciones de pruebas impresión piloto.

Parámetros OpenSCAD					Parámetros FlashPrint					
ID. Probetas	Altura Celda (mm)	Radio Celda (mm)	Espesor Pared Celda (mm)	Altura Capa (mm)	Relleno de Objeto (%)	Numero de capas perimetrales	Tasa de Extrusión (mm/s)	Velocidad de Cabezal Impresión (mm/s)	Temperatura Extrusor (C°)	Temperatura Cama (C°)
A	4	1,5875	0,4	0,27	100	1	40	60	220	70
B	4	1,5875	0,8	0,27	100	1	20	30	220	70
C	4	1,984375	0,4	0,27	100	1	20	30	220	70
C1	4	1,984375	0,4	0,15	100	1	20	30	218	60
C2	4	1,984375	0,4	0,10	100	1	20	30	218	50
D	4	1,984375	0,8	0,27	100	1	20	30	220	70
D1	4	1,984375	0,8	0,15	100	1	20	30	220	50
E	4	2,38125	0,4	0,27	100	1	20	30	220	70
E1	4	2,38125	0,4	0,24	100	1	20	30	220	60
E2	4	2,38125	0,4	0,20	100	1	20	30	220	50
E3	4	2,38125	0,4	0,18	100	1	20	30	220	50
E4	4	2,38125	0,4	0,15	100	1	20	30	220	50
E5	4	2,38125	0,4	0,15	100	0	20	30	220	50
F	4	2,38125	0,8	0,27	100	1	20	30	220	50
F1	4	2,38125	0,8	0,15	100	1	20	30	218	50
F2	4	2,38125	0,8	0,10	100	1	20	30	218	50
G	4	3,175	0,4	0,27	100	1	20	30	220	50
G1	4	3,175	0,4	0,15	100	1	20	30	218	50
G2	4	3,175	0,4	0,10	100	0	10	20	218	50
H	4	3,175	0,8	0,27	100	1	20	30	220	50
H1	4	3,175	0,8	0,15	100	1	20	30	218	50
H2	4	3,175	0,8	0,10	100	0	10	20	218	50
I	4	4,7625	0,4	0,27	100	1	20	30	220	70
I1	4	4,7625	0,4	0,14	100	1	20	30	218	50
I2	4	4,7625	0,4	0,05	100	1	20	30	218	50
J	4	4,7625	0,8	0,27	100	1	20	30	220	50
J1	4	4,7625	0,8	0,15	100	1	20	30	218	50

Fuente: (Autores, 2018).

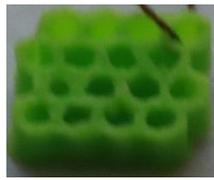
Concluidas las pruebas piloto de impresión mostradas en la Tabla 7, se pudieron identificar los valores finales para la impresión de los especímenes, se determinó que las impresiones que realizo la máquina para los tamaños de celda propuestos identificados con los índices A, B, C, D, E y F no permitieron una buena conformación de las celdas debido a la resolución de la impresora, por ende, se manifestaron defectos en la impresión como discontinuidades del filamento, sobre posición de

filamento y fundición localizada de material en ciertos puntos de la geometría por lo cual no se formaban celdas uniformes, se determinó que los tamaños de celda los cuales presentaron resultados satisfactorios fueron las impresiones con la notación H y J, debido a que dichos tamaño de celda fueron lo suficientemente grandes para que la impresora pudiera conformar hexágonos definidos.

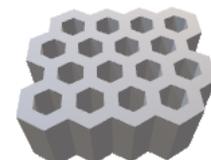
La configuración de parámetros de impresión se relaciona entre sí, es decir que la orientación y el tipo de geometría de la estructura, modifica de manera directa la cantidad de capas y el acabado superficial dada por la velocidad de impresión, ya que es indispensable garantizar que las piezas impresas se fabriquen exactamente como fueron diseñadas y que en estas no se presenten defectos en el material depositado, los cuales pueden provocar o desencadenar fallos causados por la obstrucción en la boquilla, una mala deposición del material o una configuración errónea de los parámetros de impresión, los cuales pueden reducir en gran medida la resistencia estructural y provocar posibles fallas prematuras en las probetas. Se presentan discontinuidades pertenecientes a la cantidad de capas del espécimen y al tiempo de conformación de cada una de ellas por medio de la deposición controlada con posibles defectos visuales provocados por pequeños cambios de temperatura y la solidificación del filamento entre las capas correspondientes.

Adicionalmente, el uso de un espesor de pared de 0,4 milímetros manifestó de igual forma para todas las impresiones de prueba discontinuidades en la deposición del filamento como se pueden observar en las configuraciones designadas con el índice G e I, se seleccionó inicialmente ese espesor de pared debido a que el diámetro de la boquilla del extrusor tiene 0,4 milímetros, finalmente se optó por utilizar un espesor de pared de 0,8 milímetros el cual genera un doble recorrido el extrusor para cada celda del honeycomb, por lo cual permitió la conformación uniforme y sólida de todas las celdas. En la Tabla 8 se pueden ver los resultados de las impresiones realizadas.

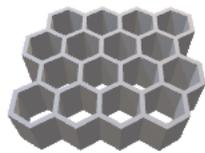
Tabla 8. Resultados de impresiones de prueba.



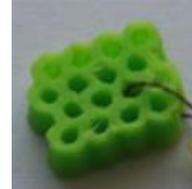
Tamaño de Celda: 1/8"  
Espesor Pared Celda: 0,4 mm



Tamaño de Celda: 1/8"  
Espesor Pared Celda: 0,8 mm



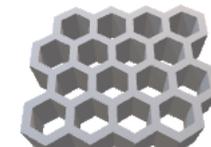
Tamaño de Celda: 5/32"  
Espesor Pared Celda: 0,4 mm



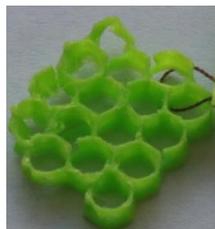
Tamaño de Celda: 5/32"  
Espesor Pared Celda: 0,8 mm



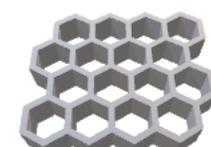
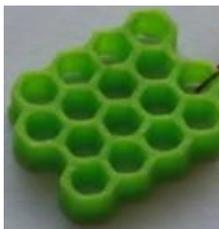
Tamaño de Celda: 3/16"  
Espesor Pared Celda: 0,4 mm



Tamaño de Celda: 3/16"  
Espesor Pared Celda: 0,8 mm



Tamaño de Celda: 1/4"  
Espesor Pared Celda: 0,4 mm



Tamaño de Celda: 1/4"  
Espesor Pared Celda: 0,8 mm



Tamaño de Celda: 3/8"  
Espesor Pared Celda: 0,4 mm



Tamaño de Celda: 3/8"  
Espesor Pared Celda: 0,8 mm

Fuente: (Autores, 2018).

## 2.2 Diseño de especímenes de prueba

El diseño de los especímenes se realizó por medio de dos programas de diseño asistido, inicialmente se utilizó el software de código abierto OpenSCAD para generar el honeycomb es necesario resaltar la importancia de que este programa, ya que es utilizado por miles de usuarios en línea los cuales desarrollan diferentes formas y métodos para generar productos de impresión 3D más rápidos y accesibles, es por esto que se utilizó un código generador de honeycomb desarrollado por la comunidad (Villamil, 2014). Del mismo modo, para cumplir con los requerimientos que exige la norma ASTM C365 para los especímenes, se utilizó el software CATIA V5 para poder generar los dos tipos de geometría de los honeycomb diseñados. El término de “estabilización de espécimen” se define como el uso de revestimientos sobre las áreas transversales del espécimen. Este proceso es requerido ya que en la industria aeroespacial es una práctica acostumbrada determinar el módulo de compresión solo cuando el espécimen se encuentra estabilizado.

De acuerdo con las especificaciones dadas por la norma e investigaciones anteriores en el número de especímenes (Pollard, Ward, Herrmann, & Etches, 2017), se estableció la fabricación siete especímenes por cada condición de prueba específica, la cual está en función al tamaño de celda seleccionado para probar. Adicionalmente, mediante la experiencia adquirida en el proceso de fabricación de los especímenes, se pudieron identificar y clasificar los defectos que se pueden apreciar visualmente y como paso final, se presentan las tres clasificaciones de defectos detectados en la impresión de los especímenes, se identificó cada defecto con un respectivo número con el cual se podrá identificar el defecto en el plan de control de calidad ejecutado para cada espécimen el cual se establece en el Anexo 2.

### **2.3 Reconocimiento de fallas que invalidan la prueba de un espécimen**

Al identificar un comportamiento de deformación no uniforme sobre todo el espécimen o falla del espécimen confinada a un borde o esquina de este como se pueden ver en la Figura 21, se consideró como una prueba inválida, adicionalmente, en la Figura 22 se muestra la manifestación de bordes en las paredes de una celda, cuando es sometido a un ensayo de compresión. El trabajo realizado por la carga de compresión en las paredes de la celda es disipado en dichas crestas (hinges).

En la Figura 22 se puede apreciar que la falla por colapso plástico de celda de la estructura se presentó con mayor concentración en un vértice de la celda perimetral del honeycomb, dicha celda estaba conformada por un proceso de extrusión seccionado por lo cual genera un concentrador de esfuerzos que conlleva a la deformación cortante direccionada en la ubicación de dicha desconexión de filamento dada principalmente porque a lo largo de la trayectoria de extrusión el filamento no es depositado de manera correcta ya sea por el valor en el espesor de pared de celda o una errónea calibración de la máquina de impresión 3D. Este defecto de manufactura en el cual se puede observar la discontinuidad de filamento depositado en la trayectoria de extrusión para la conformación del honeycomb puede observarse en la Figura 23. Posiblemente este defecto de como resultado una forma inválida de falla como lo estipula la norma ASTM C365, generando una deformación concentrada en la zona donde exista ausencia de material extruido como se puede observar nuevamente en la Figura 22, en dicha imagen se muestra una falla inválida en una prueba piloto desarrollada sobre el espécimen A7 el cual tuvo una falla de impresión por ausencia de deposición de PLA, debido a que en un principio los parámetros de impresión no eran los correctos para generar una adecuada continuidad del filamento.

## 2.4 Diseño del honeycomb y revestimientos

Inicialmente se determinó el área transversal de los dos tipos de espécimen y la información es presentada en la Tabla 5. Se optó por acercar dicha área al valor mínimo para poder optimizar el tiempo de impresión de cada espécimen, por otro lado, el número de celdas generado para cada tipo de espécimen fue el factor final para el conformado de los especímenes. En la Tabla 9 se describen los aspectos básicos de cada honeycomb para el desarrollo del proyecto. Adicionalmente, en el Anexo 4 se muestra los parámetros geométricos y los parámetros de impresión de cada uno de los especímenes manufacturados por deposición fundida tanto del lote A y como del lote B.

*Tabla 9. Propiedades de honeycomb diseñados.*

<b>ID espécimen</b>	<b>Tamaño celda (mm)</b>	<b>Área transversal espécimen (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Número de celdas</b>
A	9,525	6453,584	120
B	6,35	5766,377	270

*Fuente: (Autores, 2018).*

La altura o espesor del honeycomb se determinó por medio del documento MIL-STD-401B (Departamento de Defensa de Estados Unidos de América, 1956) en el cual se establece una altura entre 12 y 20 milímetros para especímenes que sean utilizados en pruebas de compresión, por consiguiente, según pruebas a compresión realizadas sobre diferentes tipos de honeycomb producidos por la empresa Hexcel (HEXCEL, 1999) en la cual establecieron una altura para sus especímenes en un valor de 15,875 milímetros. Por esta razón, se seleccionó esta medida para los especímenes a fabricar.

Por último, el valor dimensional para el espesor de los revestimientos se estableció en el valor de 1 milímetro, cumpliendo con el requerimiento de la norma ASTM C365 el cual exige un espesor mínimo del 0,05 % del espesor nominal del honeycomb. Los revestimientos superior e inferior difieren en su valor total de área debido a que se diseñaron con pequeñas variaciones en la geometría

ya que la impresora no es capaz de generar superficies planas en las esquinas superiores del espécimen debido a que el extrusor no tiene una superficie de soporte para depositar el filamento uniformemente, es decir que es necesario generar una estructura de soporte para la deposición de material en los espacios sobrantes de los revestimientos, los cuales no son viables debido a la cantidad de material necesario y la extensión de tiempo de impresión , así como la configuración de dicho soporte y una variación en el patrón en cada una de las capa depositadas, por lo cual el efecto de puenteo del filamento generaría ondulaciones en dichas secciones del espécimen impreso, es por ello que los revestimientos toman la forma del honeycomb en dichas secciones del espécimen.

#### **2.4.1 Espécimen lote A**

El diseño del espécimen A parte del tamaño de celda de 9,525 milímetros (3/8 de pulgada). Se identificó bajo las pruebas experimentales y los ensayos con pequeñas variaciones en la geometría del especímenes validos e inválidos, que al utilizar en el perímetro del honeycomb celdas abiertas, el comportamiento mecánico del panel disminuye en aproximadamente un 25 % con respecto a un honeycomb conformado por celdas cerradas en su periferia. En la Figura 27 se muestra una vista isométrica para el espécimen A. Finalmente, en la Figura 28 se muestran las vistas del espécimen y la celda de conformación del honeycomb con sus respectivas medidas de diseño.

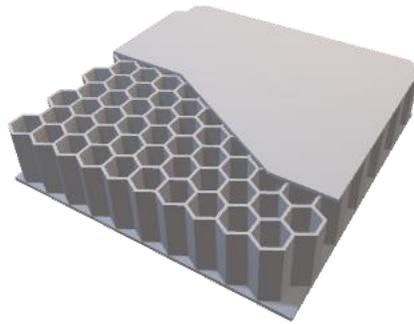


Figura 27. Vista de corte isométrico del espécimen A generado en CATIA V5.

Fuente: (Autores, 2018)

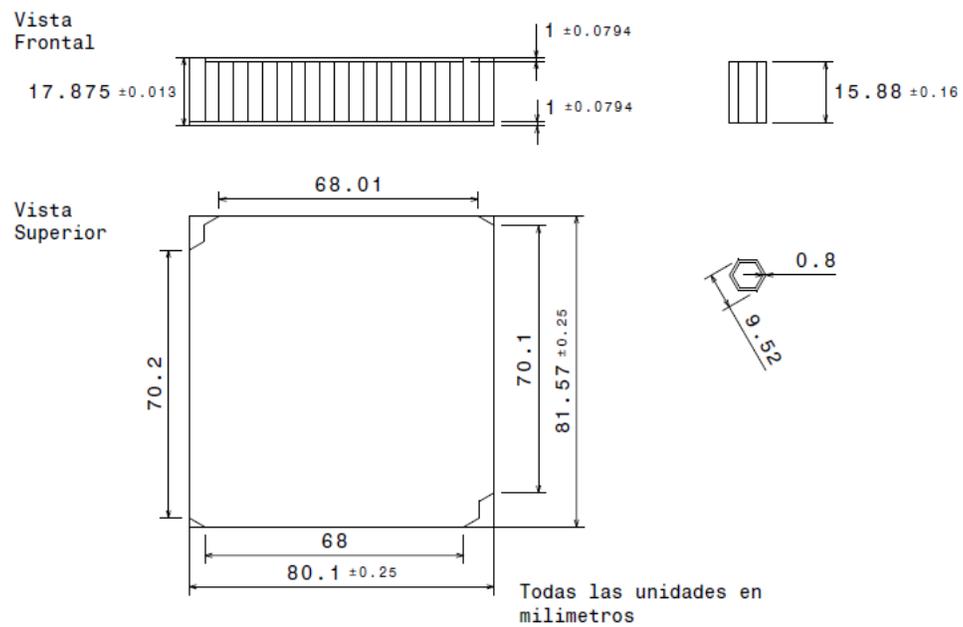
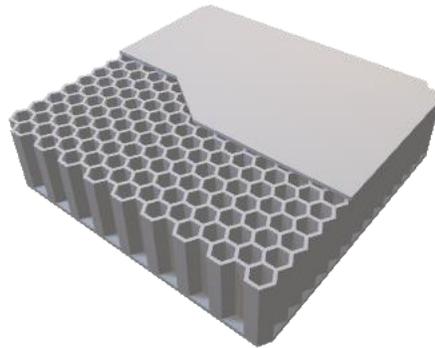


Figura 28. Vistas y dimensiones del espécimen A.

Fuente: (Autores, 2018).

### 2.4.2 Espécimen lote B

El diseño del espécimen B parte del tamaño de celda de 6,35 milímetros (1/4 de pulgada), se utilizó la misma altura de 15,875 milímetros para el honeycomb y el mismo parámetro para los revestimientos los cuales se definieron con un valor de 1 milímetro de espesor, se presentó el mismo fenómeno de *puenting* sobre la conformación de las esquinas de los revestimientos, por lo tanto, se definieron dichas secciones en igual geometría a la del honeycomb. En la Figura 29 se muestra una vista isométrica para el espécimen B. Finalmente, en la Figura 30 se muestran las vistas del espécimen y la celda de conformación con sus respectivas medidas de diseño.



*Figura 29. Vista de corte isométrica del espécimen B- Generado en CATIA V5.*

*Fuente: (Autores, 2018).*

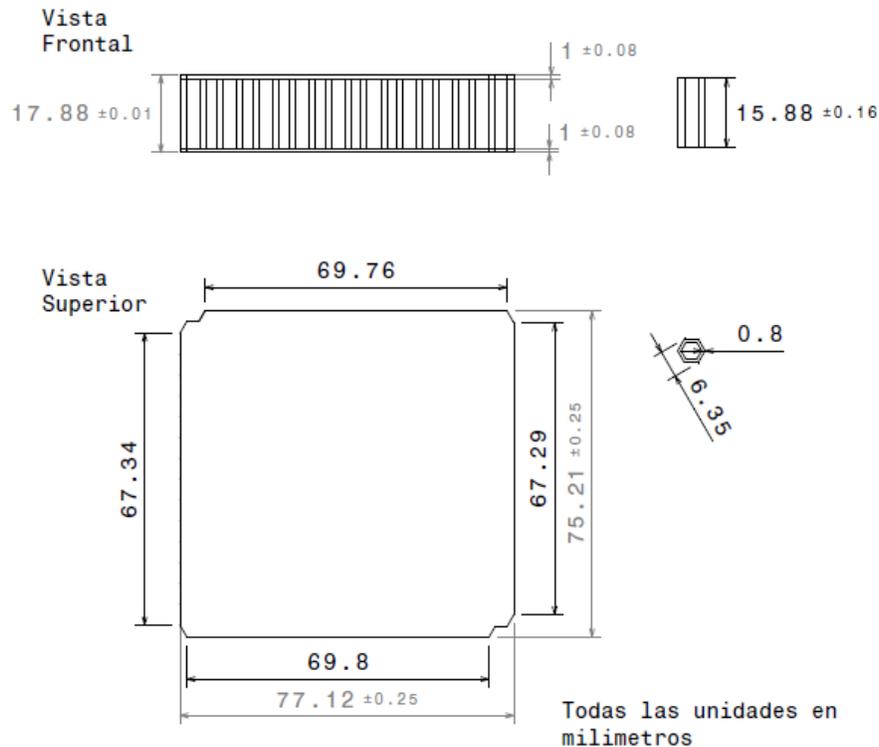


Figura 30. Vistas y dimensiones del espécimen B.

Fuente: (Autores, 2018).

## 2.5 Generador de estructura honeycomb – OpenSCAD

El software OpenSCAD es un programa de código abierto el cual sirve como una plataforma de diseño de elementos bajo el uso de comandos, algoritmos o programación diseñada específicamente para la geometría que se quiera realizar. Con el propósito del uso de un código ya desarrollado por la comunidad (Villamil, 2014) por el cual es posible generar el honeycomb con las características geométricas requeridas, dichas características se estipularon en la altura de celda, tamaño de celda, espesor de pared según los resultados de preimpresión de los honeycomb pudiendo determinar dichos valores. Por último, en este fueron seleccionados el número de columnas y filas para poder cumplir con los lineamientos que estipula la norma ASTM C365 para el área y tamaño de celda mínimos requerimiento de la

Tabla 5. En el Anexo 5 se describe el proceso de creación del honeycomb en el software OpenSCAD para las dos configuraciones establecidas de especímenes propuestos para el desarrollo de las pruebas destructivas.

## **2.6 Procesos de impresión de especímenes**

La configuración de impresión que se seleccionó para la fabricación de los especímenes fue determinada mediante el desarrollo de los casos de impresión descritos en las pruebas de impresión con geometría variable de este capítulo, considerando la configuración dada en el software FlashPrint, como una configuración de alta calidad debido a las características que se dieron al valor de altura de capa el cual es el parámetro más importante para definir la resolución de una impresión 3D. Otro aspecto que influye en la altura de capa seleccionada fue el comportamiento mecánico que soportará el espécimen, cuando se generan impresiones con una resolución mayor o lo que es igual a un número de capas mayor, aumentando sus propiedades mecánicas a compresión (Sood, Ohdar, & Mahapatra, 2011).

### **2.6.1 Configuración de parámetros de impresión**

Los valores determinados para la configuración de impresión de la impresora 3D son presentados en la Tabla 10, con el fin de poder producir un proceso de impresión estandarizado para cada espécimen. El software FlashPrint divide la configuración de impresión en 9 módulos los cuales configuran distintos parámetros que varían la calidad, tiempo y forma de la impresión. Se modificaron solo los parámetros que se muestra en la Tabla 10, los demás parámetros expuestos en el software FlashPrint se mantuvieron iguales para una configuración estándar seleccionada en el programa.

Para efectos de esta investigación, se evaluaron los parámetros de impresión que generaban mejores efectos de solidificación de los filamentos en la deposición del material de manera efectiva por medio de las pruebas experimentales realizadas por los autores y por medio de valores determinados en investigaciones acordes al proyecto de investigación. La selección de la temperatura

tanto de cama como del extrusor, están basadas inicialmente en la búsqueda de un valor adecuado para una correcta deposición y conformación del filamento por medio de variaciones numéricas dentro de la prueba piloto con los valores correspondientes a las sugerencias del proveedor del material usado y posteriormente se seleccionaron los valores que mejores resultados presentó en la manufactura de este tipo de piezas como se observa con detalle en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros de impresión para software FlashPrint.

<b>Módulo General</b>	
Modo altura de capa	Altura de capa fija
Alto de capa	0,18mm
Alto de primera capa	0,20mm
Temperatura del extrusor	218 °C
Temperatura plataforma	50 °C
Velocidad de impresión de base (alimentación de filamento)	60 mm/s
Velocidad de trayectoria (Desplazamiento del extrusor)	80 mm/s
<b>Módulo Perímetro</b>	
Recuento de estructura	2
Superposición máxima de recorrido	30 %
<b>Módulo Relleno</b>	
Capas solidas superiores	3
Capas solidas inferiores	3
Densidad de relleno	65 %
<b>Módulo Soportes</b>	
Habilitar soportes	No
<b>Módulo Base</b>	
Habilitar base	No
<b>Módulo Adiciones</b>	
Habilitar pre-extrusión	Sí
<b>Módulo Enfriamiento</b>	
Mantener valores preestablecidos por el programa para este modulo	
<b>Módulo Avanzado</b>	
Mantener valores preestablecidos por el programa para este modulo	
<b>Módulo Otros</b>	
Habilitar ajustes	No
Permitir puente	Sí

Fuente: (Autores, 2018).

### 2.6.2 Adecuación de la máquina de impresión

Para poder realizar procesos de impresión estandarizados, fue necesario seguir las recomendaciones diseñadas por el fabricante de la impresora 3D (FlashForge 3D Printer, 2016). Se utilizó como material de impresión un carrete del material termoplástico PLA de la compañía

“PRUSA Research” designado con la referencia “FLM-PLA-175-SLV” el cual corresponde al carrete de 1 kilogramo de material termoplástico PLA color plateado, ver Figura 31. La Tabla 3 describe las características del material determinadas por el productor del biopolímero utilizado para la impresión de los especímenes (PRUSA Research, 2018).



*Figura 31. Carrete de PLA plateado referencia FLM-PLA-175-SLV.*

*Fuente: (PRUSA Research, 2018).*

La instalación del carrete en la máquina se realizó como se establece en el manual de operación de la impresora el cual especifica ubicar el carrete en uno de los dos soportes ubicados en la parte posterior de máquina, el carrete debe instalarse de tal forma que el filamento pueda ser tomado por el extrusor libremente sin que se genere obstrucciones por el sentido de giro del carrete. Por último, se ejecutó la opción de precalentamiento del extrusor y la plataforma para poder permitir un proceso de impresión adecuado según los valores de temperatura establecidos en la Tabla 10.

## **2.7 Protocolo de impresión**

El diseño un protocolo de impresión para permitió un proceso de impresión controlado lo cual de cómo resultado especímenes impresos con las mismas características geométricas y de conformado. El protocolo contempla todos los procesos necesarios para poder producir satisfactoriamente el espécimen deseado, el enfoque de este documento se generó con base en la división del proceso de impresión donde este se conforma por los procesos de preimpresión, impresión y post impresión del espécimen. El Anexo 1 establece todos los pasos y tareas que se deben

cumplir para generar el producto deseado, para consultar los resultados de forma detallada es necesario la revisión de este anexo para determinar y aplicar protocolos de fabricación.

Las diferentes etapas de producción de los especímenes se desarrollaron en función a las pruebas iniciales realizadas para determinar el tamaño de celda adecuado del honeycomb, en este proceso se logró identificar los parámetros de impresión descritos en la sección 2.1 y 2.6.1 del documento para poder obtener elementos de iguales características. Como se describió en la sección 2.5, el diseño digital del honeycomb se desarrolló por medio de un software especializado el cual permite generar archivos con formato (.stl), este software puede utilizarse de igual forma para poder generar otros patrones geométricos de núcleo celular como triángulos, rectángulo y circunferencias, por lo cual es posible aplicar el protocolo desarrollado a figuras geométricas básicas que puedan ser seleccionadas como característica geométrica del núcleo con estructura celular.

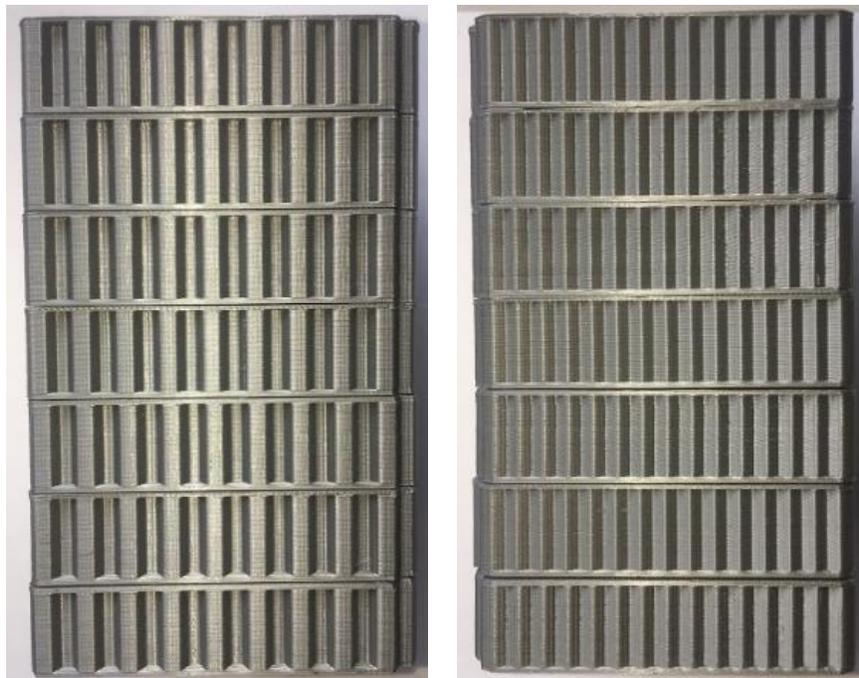
## **2.8 Impresión de especímenes**

Se imprimieron 14 especímenes en total, para las dos configuraciones establecidas designadas como tipo A y B, fueron registrados los valores y parámetros de fabricación del honeycomb como lo requiere la norma ASTM C365. Por otra parte, debido a que el espécimen A7 presentó pandeo en su superficie inferior, el espécimen A4 presentaría un modo de fallo inválido y el mismo defecto de pandeo, mediante el control de calidad y la experiencia obtenida con la prueba realizada fue posible deducir dicha característica de falla en la prueba para dicho espécimen. Por lo tanto, fue necesario fabricar el espécimen A8 y generar un nuevo espécimen con características de impresión validas del lote tipo A el cual reemplace el espécimen A4. En el Anexo 8 se muestran dichos valores para todas las impresiones realizadas. En la Figura 32 se muestra el lote de impresión correspondiente a la configuración tipo A. De igual forma en la Figura 33 se muestra el lote de impresión correspondiente a la configuración de celda B.



*Figura 32. Lote de impresión tipo A en PLA.*

*Fuente: (Autores, 2018).*



*Figura 33. Lote de impresión tipo B en PLA*

*Fuente: (Autores, 2018).*

## 2.9 Tasa de enfriamiento del espécimen

Para poder determinar la tasa de enfriamiento de un espécimen, que ha sido producido bajo el método de FDM, fue necesario recurrir al uso de una cámara que visualice el espectro de luz infrarrojo para poder conocer la tasa de transferencia de calor del sistema de impresión y el espécimen al ambiente; mediante el uso de la cámara FLIR T300 se registraron un serie de fotografías justo en la finalización de la impresión de un espécimen, como resultado se generó una gráfica de enfriamiento del espécimen en función al tiempo transcurrido, se describe este método posteriormente en este documento, ver Anexo 4.

En el proceso de post impresión de los especímenes, la cantidad de tiempo que se estipuló para poder retirar con seguridad el espécimen de la plataforma de impresión se determinó mediante la gráfica que se muestra en la Figura 34. La gráfica de la tasa de enfriamiento del espécimen se realizó mediante la toma de fotografías térmicas con la cámara infrarroja FLIR T300, se tomaron 48 fotografías en un intervalo de tiempo de 27 minutos después de que la máquina de impresión 3D terminara el proceso de impresión del espécimen, ver Anexo 4.

Para cada fotografía se registraron 4 áreas de referencia posicionados en el centro y en las esquinas de la cama de impresión los cuales miden la temperatura local en estos puntos, se registraron las temperaturas promedio para cada intervalo de tiempo en el Anexo 4, en este se presentan los puntos de referencia y los intervalos de tiempo de referencia dados para cada imagen. El post proceso 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 las siguientes, ver Tabla 11.

*Tabla 11. Parámetros de adquisición de datos.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Emisividad	0,86
Temperatura de reflexión	50 °C
Distancia	1 m
Temperatura Atmosférica	17 °C
Temperatura óptica externa	20 °C
Transición óptica externa	1
Humedad Relativa	68 %
Tipo de Lente	FOL 10 mm

*Fuente: (Autores, 2018).*

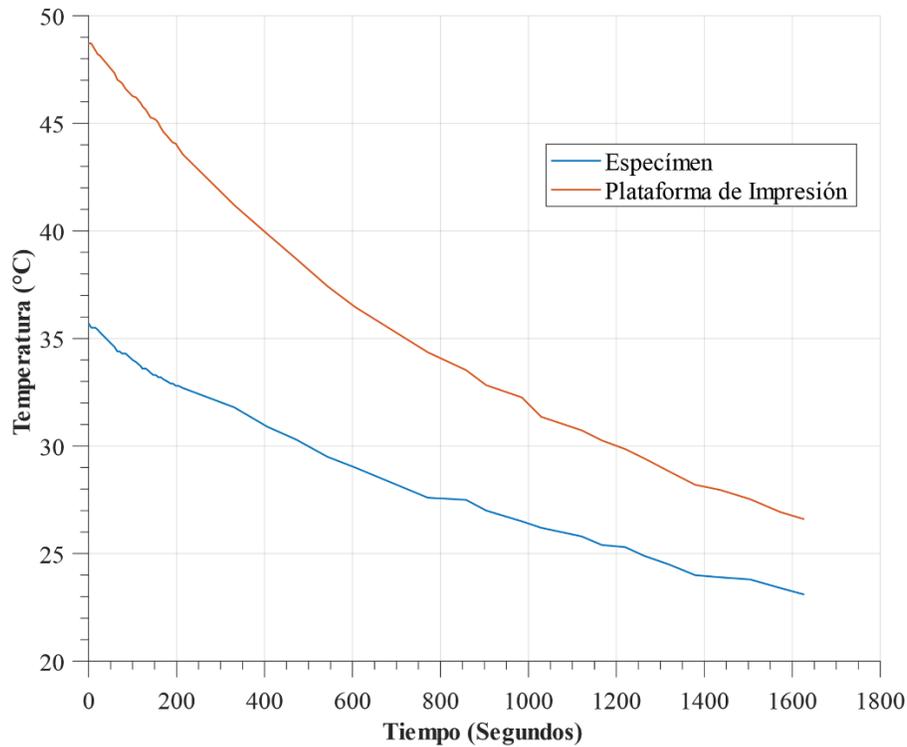
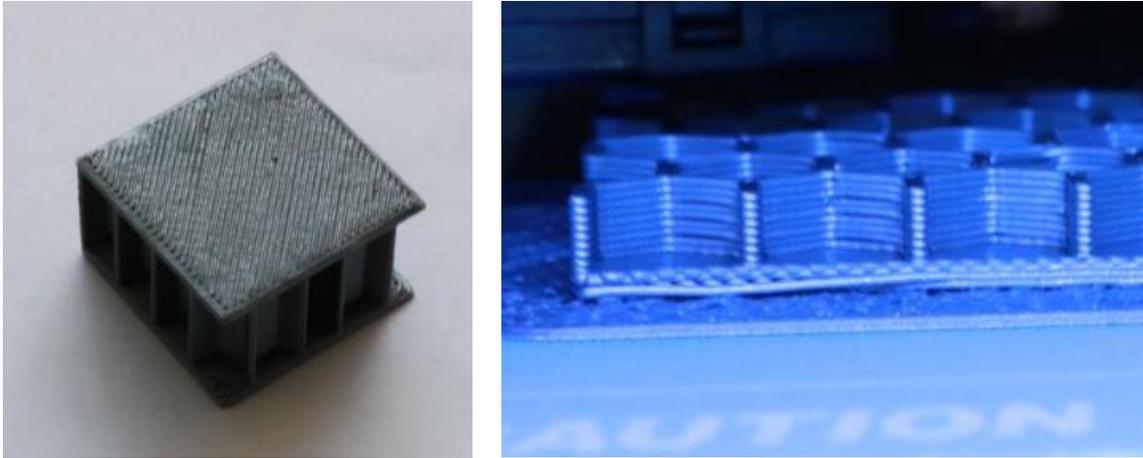


Figura 34. Tasa de enfriamiento del espécimen y plataforma de impresión.

Fuente: (Autores, 2018)

## 2.10 Control de calidad de especímenes

El control de calidad de los especímenes se estipuló mediante los lineamientos establecidos en la sección control de producción y calidad del capítulo 1 de este documento, en el cual el control de calidad se divide en dos fases. Inicialmente, para la primera fase se realizó una inspección visual de cada espécimen, este proceso contempló el control y vigilancia del proceso de impresión, para prevenir que durante la impresión se presentaran fallas evidentes sobre la deposición del PLA para la conformación del espécimen, ver Figura 35.



*Figura 35. Defecto menor y mayor de impresión en especímenes.*

*Fuente: (Autores, 2018)*

Seguido de esto, se realizó la inspección visual sobre cada espécimen impreso para determinar los defectos establecidos en el apartado de control y producción de calidad del Capítulo 1. Por último, durante la segunda fase para el control de calidad geométrico, se tomaron las medidas finales de los especímenes impresos, para verificar que cumplieran con las tolerancias establecidas por la norma ASTM C365 descritas en el apartado de parámetros generales. Para el proceso de inspección visual, se determinó la presencia de defectos críticos, mayores y menores en cada espécimen y el porcentaje de defecto aceptable se estableció igualmente con la norma (ASTM International, 2016). Teniendo en cuenta que el valor superior (14) pertenece al número de defectos y el valor inferior (15) corresponde al número total de especímenes inspeccionados más el intervalo de un elemento más para poder calcular un porcentaje de aceptación teórico estipulado por el grupo de trabajo en función al NAC establecido. Con la ecuación (2) se estipulo el porcentaje de defecto visual.

$$P.D.V = \frac{14 \times 100}{15} = 93 \%$$

En el Anexo 2, se muestran las tablas referentes a los procesos de inspección visual e inspección geométrica de cada espécimen, se aplicaron los porcentajes de aceptabilidad de defectos

para cada espécimen, estableciendo que los valores que se encuentran en color verde significan que se encuentran dentro de la tolerancia establecida para cada ítem evaluado del espécimen.

El nivel de aceptación dimensional para los especímenes fue determinado por el grupo de trabajo, dicho porcentaje de aceptación es igual o mayor al 90 % el cual está en función al número de parámetros dimensionales evaluados igual a 10 ítems geométricos, los cuales están estipulados en el control de calidad, esta información puede consultarse en el Anexo 2.

## 2.11 Configuración de la máquina universal de ensayos

Previo al posicionamiento o instalación del espécimen fue práctico establecer algunos parámetros de configuración. Durante el montaje de los especímenes fue necesario la configuración de parámetros esenciales tanto para el buen funcionamiento de la maquina Tinius Olsen H300KU con el uso del programa Test Wizard, como del protocolo para llevar a cabo una prueba exitosa. El programa permite la configuración de adquisición de datos resultantes, generando 16533 datos por espécimen para la siguiente configuración de 12 parámetros esenciales como se observa en la siguiente tabla.

Tabla 12. Parámetros de configuración para Test Wizard.

<i>Time</i>	[s]	<i>Force</i>	[N]
<i>Deflection</i>	[mm]	<i>Current Modulus</i>	[MPa]
<i>Point Number</i>	[-]	<i>Force Rate</i>	[N/s]
<i>Position</i>	[mm]	<i>Position Rate</i>	[mm/s]
<i>Strain</i>	[mm]	<i>Strain Rate</i>	[mm/s]
<i>Stress</i>	[MPa]	<i>Stress Rate</i>	[MPa/s]

Fuente: (Autores, 2019).

Se postularon los valores de ancho, espesor y longitud de cada espécimen como datos de entrada requeridos por el software de la máquina universal de ensayos antes de iniciar la prueba destructiva a compresión. Una vez configurado el montaje de la máquina, se procede a configurar la velocidad de aplicación de la carga a compresión estableciendo un valor de 1 mm/min para todos los especímenes descrita en la norma ASTM C365 para pruebas de compresión (ASTM International, 2002).

Las mordazas deben ser puestas cuidadosamente para que estén correctamente alineadas con el espécimen como se muestra en la Figura 36, bajo la configuración de una plantilla de alineación como se muestra en el Anexo 7. Una vez puesto el espécimen en la plantilla de alineación en la mordaza inferior, se procede a realizar el primer contacto entre la mordaza superior y el espécimen, verificando que el contacto sea mínimo para que este no afecte la aplicación de carga con ayuda del programa Test Wizard con el fin de garantizar un contacto con el espécimen por medio de una velocidad contacto entre 0.05mm/min a 0.08mm/min y una velocidad acercamiento entre 40 mm/min a 50 mm/min.

Para la prueba mecánica se realizó una precarga bajo una velocidad en un rango de 0.08mm/min a 0,1 mm/min, estipulada como sugerencia por la norma para el análisis de las propiedades mecánicas a compresión y la obtención de las gráficas esfuerzo vs deformación de los especímenes manufacturados bajo el método por deposición fundida. Por último, la máquina universal se encuentra lista para empezar la prueba de compresión como se muestra en la Figura 37, procediendo a realizar la prueba, de igual manera se realizó este procedimiento para cada una de las probetas a evaluar.

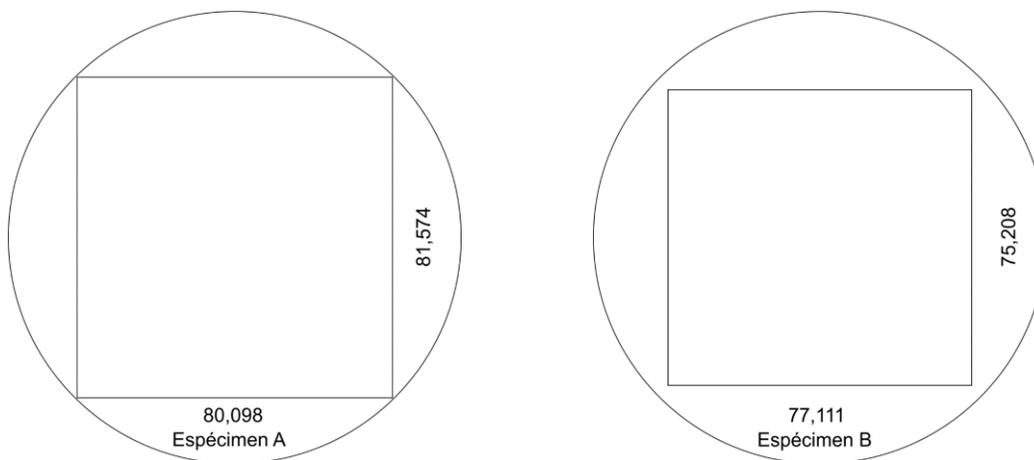


Figura 36. Plantillas para centrar espécimen A-B sobre plato de carga.

Fuente: (Autores, 2018)



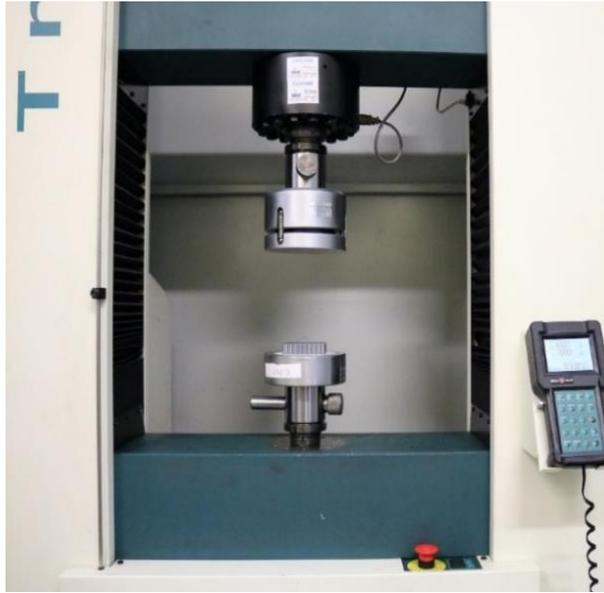
*Figura 37. Disposición inicial de la prueba mecánica a compresión.*

*Fuente: (Autores, 2018)*

## **2.12 Pruebas mecánicas de compresión plana**

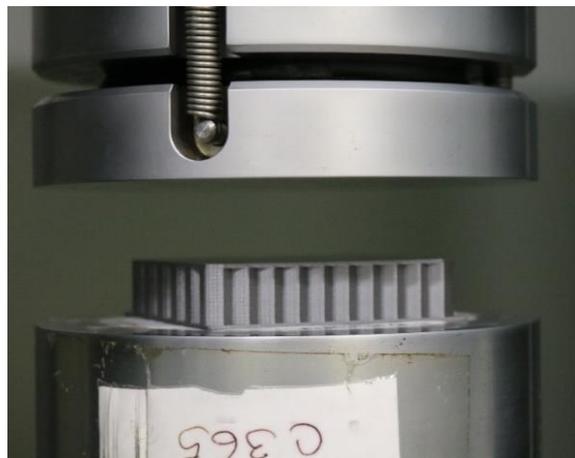
A continuación, se describen los métodos utilizados para calcular las propiedades mecánicas de los honeycomb tipo A y B a partir de la norma ASTM C365, las cuales permiten y dan cumplimiento de las limitaciones propuestas para esta investigación. Para el desarrollo de las pruebas destructivas a compresión, se desarrolló un protocolo de prueba el cual fue diseñado en función a pruebas piloto realizadas con la máquina universal de ensayos Tinius Olsen, la cual fue utilizada con especímenes experimentales de prueba para determinar los parámetros correctos de ensayo descritos en el numeral 11 de la norma ASTM C365. En el Anexo 6 se puede consultar el protocolo de prueba diseñado para el desarrollo de las pruebas destructivas a compresión, en este documento se describen los parámetros de prueba a utilizar para los ensayos destructivos como la velocidad de prueba, valor de precarga al espécimen, tiempo de prueba, instalación del espécimen en los platos de carga, valores dimensionales del espécimen en el software de control de la máquina universal de ensayos y el registro de datos de cada prueba. Los valores promedio dimensionales utilizados en el software de la máquina se pueden consultar en el Anexo 2.

A partir de los datos obtenidos de la gráfica de esfuerzo vs deformación, se pueden desarrollar los cálculos necesarios para determinar las propiedades mecánicas a tensión de cada material bajo diferentes configuraciones.



*Figura 38. Mordazas C365 Prueba mecánica en especímenes.*

*Fuente: (Autores, 2018)*



*Figura 39. Ubicación del espécimen en la plantilla de la mordaza inferior.*

*Fuente: (Autores, 2018)*

### **2.13 Toma de resultados y reporte de prueba experimental**

Para cada prueba destructiva realizada, fue desarrollado un formato en el cual fueron registrados los valores de la prueba desarrollada, así como la información que requiere registrar la norma ASTM C365 para cumplir con los parámetros de prueba requeridos (ASTM International, 2016). Cada prueba destructiva desarrollada en la máquina universal de ensayos Tinius Olsen, genera una serie de dos archivos en los formatos (.bmp) y (.xps).

En estas gráficas obtenidas es posible observar el comportamiento mecánico del elemento probado por medio de una gráfica de esfuerzo-deformación. Además, esta muestra en la leyenda de la gráfica, los valores máximos de esfuerzo, carga y módulo; información que se necesita reportar para calcular las propiedades mecánicas a compresión de las probetas del lote A y B.

Al finalizar cada prueba destructiva, es necesario determinar mediante una inspección visual si el espécimen falló como lo requiere el numeral 12 de la norma ASTM C365, el cual debe ser una deformación uniforme de todo el espécimen, si no se cumple el modo de falla estipulado, el espécimen debe ser considerado como no válido y los valores de prueba no se incluirán en la estadística de datos. A partir de los datos obtenidos de la gráfica de esfuerzo-deformación, es posible el desarrollo de cálculo de las propiedades mecánicas que requiere reportar la norma ASTM C365.

### **2.14 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. Estos valores son tomados de la información proporcionada por la máquina universal de ensayos y por las ecuaciones planteadas en la norma ASTM C365 en el numeral 13 y descritas a continuación.

### **2.15 Esfuerzo último de compresión**

El esfuerzo último de compresión plana es calculado mediante la obtención de la carga última o máxima la que soportó el espécimen antes de alcanzar la falla y el área transversal de prueba del

espécimen. El valor de la carga máxima se determina mediante la gráfica de esfuerzo-deformación en la cual se puede evidenciar la carga máxima al momento que el espécimen falla plásticamente o las celdas colapsan plásticamente. El área transversal del espécimen se tomó de la Tabla 9. Con la siguiente ecuación se determina el esfuerzo último del espécimen a analizar (ASTM International 2016).

$$F_z^{fcu} = P_{max}/A$$

Donde

$F_z^{fcu}$  = Máximo esfuerzo a compresión plana, MPa.

$P_{max}$  = Carga última previa a la falla, N.

$A$  = Área transversal del espécimen, mm<sup>2</sup>.

## 2.16 Esfuerzo al 2% de deflexión

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 al valor de la altura inicial del espécimen. Es indispensable dirigirse y consultar el Anexo 9, donde se registran los resultados de las pruebas destructivas y los valores de carga al 2 % de deformación para cada espécimen probado mediante el análisis de la gráfica de esfuerzo-deformación, mediante los puntos de la gráfica es posible identificar dichos valores con exactitud, sin embargo, se realizó un método de interpolación de datos cuando los puntos de la gráfica no coincidían con el valor exacto al 2,0 % en la región elástica del honeycomb. El esfuerzo es calculado con la siguiente ecuación descrita a continuación (ASTM International 2016).

$$\sigma_z^{fc0,02} = P_{0,02}/A$$

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.

$\delta_{0,02}$  = Valor de deflexión registrada tal que  $\delta/t$  es cercano al 2%.

$A$  = Área transversal del espécimen,  $\text{mm}^2$ .

## 2.17 Módulo de compresibilidad

La norma ASTM C365 requiere calcular el módulo de compresibilidad de cada espécimen probado usando la ecuación del numeral 13.3, esta ecuación permite conocer el *Chord Modulus* o módulo secante del comportamiento elástico del honeycomb, 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 0.1% y 0.3 %, 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 en la gráfica se describe como *toe compensation* 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.

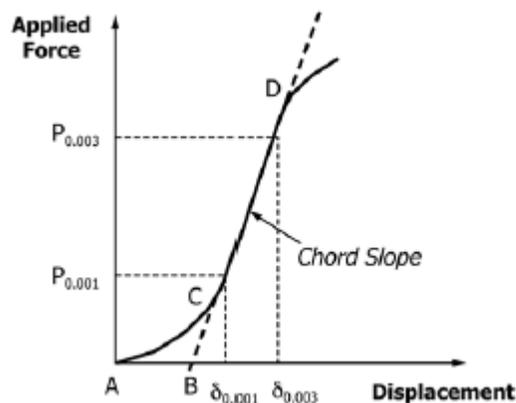


Figura 40. Gráfica representativa del efecto de asentamiento del espécimen.

Fuente: (ASTM International, 2016).

De la Figura 40 se puede evidenciar que para materiales que presenten un comportamiento no lineal en la zona elástica, es necesario realizar un ajuste de corrección para estipular un valor igual a cero para la deformación y de allí poder calcular el módulo, sin embargo, los valores porcentuales de deformación estipulados por la norma ASTM C365 no representan el comportamiento lineal de la región elástica para los especímenes diseñados y probados en este estudio, sin embargo, en el numeral 13.3 de la norma ASTM C365 se estipula la posibilidad de seleccionar otro rango de deformación que sea más apropiado para describir el comportamiento lineal de la gráfica de esfuerzo-deformación, estos valores pueden ser definidos a al criterio del usuario. En consecuencia, los valores porcentuales de deformación para calcular el módulo de los especímenes se determinaron en 4 y 7 %, estos valores fueron determinados en función al análisis del comportamiento de los grupos de graficas generadas en donde puede evidenciarse un inicio de tendencia lineal constante en la zona elástica desde el 4 % de deformación. Por último, en el mismo numeral 13.3 de la norma ASTM C365, se estipula que dichos valores deben estar entre en 25 a 50 % de la deformación total presentada en la gráfica de esfuerzo-deformación. En la siguiente Ecuación se muestra la expresión utilizada para calcular el módulo de compresibilidad de los especímenes de los lotes A y B fabricados para el desarrollo de las pruebas destructivas estipuladas en esta investigación (ASTM Interantional,2016).

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

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  $\delta/t$  es cercano al 7%.

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

## 2.18 Densidades de los especímenes de prueba

La densidad de un honeycomb es un parámetro físico que está en función a las características mecánicas finales del elemento debido a la suma de volúmenes de cada celda que conforman el honeycomb las cuales están a su vez, en función al espesor de pared de cada una de ellas, en el Anexo 12 se determinaron para todos los especímenes producidos, el peso, densidad nominal y densidad relativa; con dichos parámetros será posible realizar la comparación de las propiedades mecánicas con honeycomb comerciales fabricados en aluminio y aramida ya que estos están clasificados por tamaño de celda y densidad, ver el Anexo 1 para la consulta de propiedades de los honeycomb comerciales.

## 2.19 Estadística de propiedades mecánicas

La norma ASTM C354 estipula la determinación del valor promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de las propiedades calculadas mediante las pruebas a compresión realizadas sobre cada espécimen. Mediante el análisis de las gráficas de todas las pruebas destructivas desarrolladas para cada espécimen, es posible determinar el comportamiento de cada uno en graficas de grupo por las cuales es posible identificar los especímenes que se encuentren fuera de tendencia, por otro lado, se analizaron los valores que estén por fuera de la desviación estándar para las propiedades mecánicas estipuladas a calcular. Finalmente, los datos para especímenes que fallen de manera inválida serán descartados de la muestra total de datos para aplicar el proceso estadístico final de los datos obtenidos. De esta forma, el promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación porcentual se calculó con las Ecuaciones descritas a continuación.

$$\bar{x} = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / n$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2\right)/(n-1)}$$

$$CV = 100 \times S_{n-1}/\bar{x}$$

Donde:

$\bar{x}$  = Promedio simple

$s_{n-1}$  = Desviación estándar simple

CV = Coeficiente de variación en porcentaje

n = Número de especímenes

$X_i$  = Valor de la propiedad

### Capítulo 3

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de cada uno de los especímenes tipo honeycomb para cada tipo de tamaño de celda, durante el desarrollo de las pruebas de ensayo a compresión plana. A continuación, se describirán los resultados encontrados para cada una de las probetas sometidas a este tipo de prueba destructiva, ver Figura 41.



*Figura 41. Prueba y posicionamiento del espécimen en máquina universal de ensayos Tinius Olsen H300KU. Fuente: (Autores, 2019).*

A continuación, se estipuló el análisis mecánico y la comparación del comportamiento de los especímenes manufacturados en PLA con respecto a la prueba de compresión del presente proyecto de investigación. Respecto a lo descrito anteriormente, los resultados obtenidos después de someter a prueba cada uno de los especímenes serán presentados en el documento acompañados de anexos que sustentan los protocolos y el manejo de los datos adquiridos.

### 3 Procesamiento de gráficas

El procesamiento de los datos obtenidos mediante los ensayos destructivos a compresión fue un proceso estipulado para poder generar satisfactoriamente las gráficas de esfuerzo – deformación de las pruebas a compresión realizadas, la obtención de los puntos de conformación de las gráficas se basó en dos métodos, en primer lugar, se utilizó un software de código abierto (WebPlotDigitizer,2017) el cual permite analizar imágenes, para este caso, la máquina universal de ensayos utilizada fue capaz de generar gráficas en el formato requerido (.bmp).

Para los especímenes del lote A se implementó el software WebPlotDigitizer, como programa para la generación de gráficas de esfuerzo-deformación de cada ensayo destructivo realizado, se optó por utilizar este método debido a que no se contaba al momento inicial de las pruebas destructivas para el lote A con la capacidad de generar los puntos de información por medio del software de la máquina universal de ensayos, en el Anexo 10 se describe los pasos de uso del software WebPlotDigitizer. En las gráficas de esfuerzo-deformación de las probetas tipo A y tipo B, se presenta el comportamiento elástico de cada espécimen probado, al igual que su comportamiento plástico hasta el punto de final de la prueba. El esfuerzo de compresión aplicado se representa en Megapascales en el eje y de la gráfica y para el eje x se representa la deformación unitaria porcentual.

En segundo lugar, el método utilizado para generar las gráficas de esfuerzo-deformación de los ensayos destructivos realizados, fue por medio del software de la máquina universal de ensayos ya que se contó la capacitación de personal experto de la empresa IMOCOM, el cual facilitó al grupo de trabajo el exportar la información obtenida por medio de los transductores de posición y fuerza de la máquina universal de ensayos, a archivos de tabulación de datos en el cual se dieron en formato (.txt). Para el lote B de especímenes, el segundo método fue utilizado para generar las gráficas de esfuerzo-deformación de cada espécimen probado.

Vale la pena aclarar que ambos métodos son aceptables para poder procesar la información de los ensayos destructivos realizados, mediante la ejecución de las pruebas en los especímenes tipo

B, se generaron los archivos que requieren ambos métodos para su correcto funcionamiento los cuales son imágenes en el formato (.bmp) y los puntos de información obtenidos en el formato (.txt), ambos generados por la máquina universal de ensayos. Para demostrar el porcentaje de error que existe entre ambos métodos, se determinó realizar un análisis comparativo para las pruebas destructivas realizadas en el espécimen B1 y B2, de la información obtenida se procesaron ambos métodos en una misma gráfica para demostrar el pequeño desfase que existe en el valor del esfuerzo máximo obtenido. En la Figura 42 y 43 se puede observar el comportamiento mecánico del espécimen B1 y B2 respectivamente, por medio de la gráfica de esfuerzo-deformación. Además, se muestran en cada leyenda de la gráfica los valores máximos de esfuerzo para cada método estipulado.

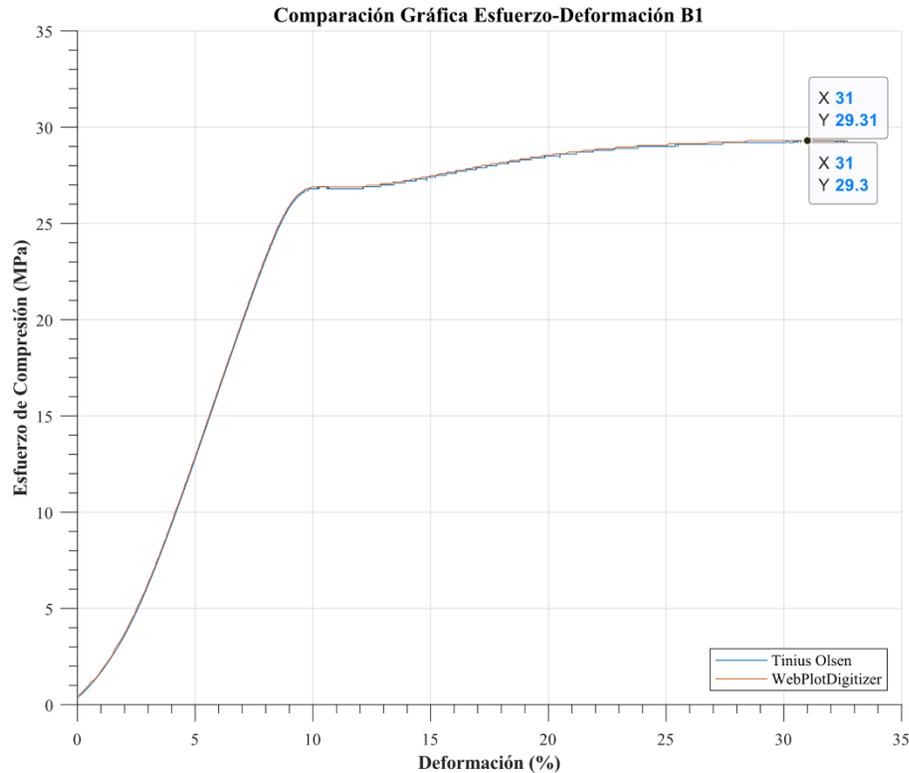


Figura 42. Gráfica de esfuerzo-deformación del espécimen B1 comparando ambos métodos de análisis.

Fuente: Autores (2019).

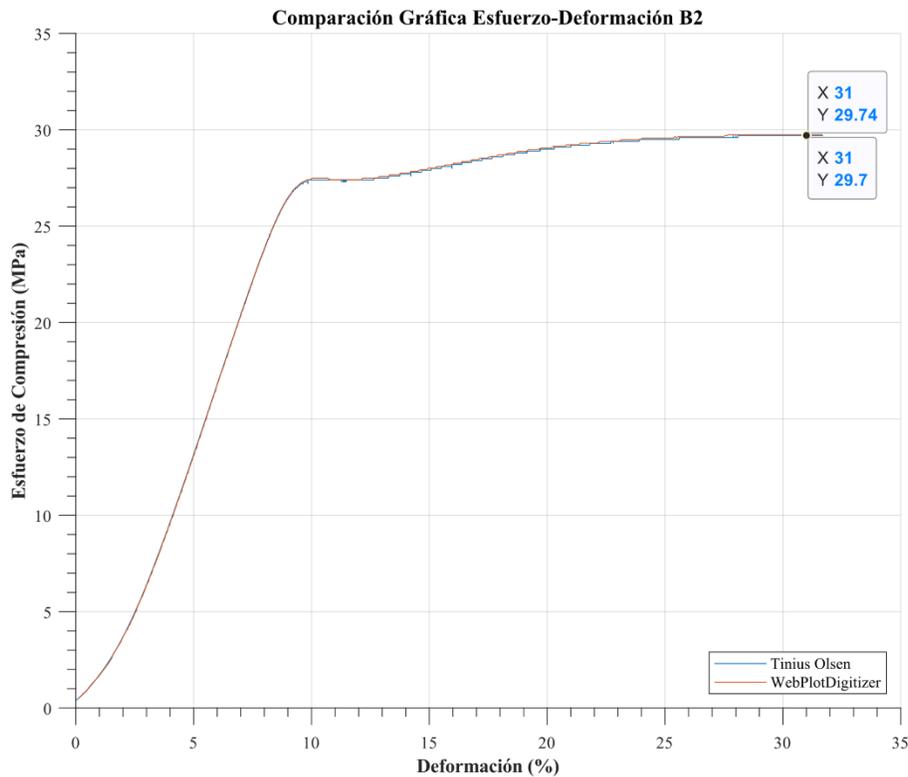


Figura 43. Gráfica de esfuerzo-deformación del espécimen B2 comparando ambos métodos de análisis.

Fuente: Autores (2019).

Hay que resaltar que ambos métodos son capaces de generar la misma gráfica para el ensayo destructivo propuesto, tienen una diferencia la cual radica en el número de datos o puntos generados. Para el primer método el cual utiliza el software WebPlotDigitizer, el número de puntos oscila en un rango de 450 a 500 puntos, por otro lado, el segundo método utilizando el software de la máquina universal de ensayos genera 16400 puntos en la gráfica. De lo anterior se puede decir que esta diferencia de datos solo radicará en la resolución de la gráfica generada, sin embargo, el comportamiento mecánico del espécimen expresado en la gráfica de esfuerzo-deformación será el mismo sin importar cual método sea utilizado para analizar los datos obtenidos de cada ensayo destructivo. Por último, en la Tabla 13 se muestra en porcentaje de error absoluto que existe entre cada método.

Tabla 13. Error relativo en comparación de métodos de análisis.

Espécimen	$F_z^{f_{cu}}$ (MPa) Método WebPlotDigitizer	$F_z^{f_{cu}}$ (MPa) Método Tinius Olsen	Error relativo %
B1	29,311	29,300	0,038
B2	29,743	29,700	0,145

Fuente: Autores (2019).

### 3.1 Análisis de resultados

A continuación, se presenta el análisis y comparación de cada uno de los resultados obtenidos durante el desarrollo de pruebas experimentales a compresión las cuales dan cumplimiento con los objetivos específicos estipulados para este proyecto. Durante el análisis estadístico de datos, se presentan los resultados finales después de aplicar el intervalo de confianza calculado mediante la obtención del promedio simple y desviación estándar de cada propiedad mecánica calculada.

En las gráficas de esfuerzo-deformación de las probetas tipo A y tipo B, se describe el comportamiento elástico de cada espécimen probado, al igual que su comportamiento plástico hasta alcanzar el punto final de la prueba mecánica y la deformación alcanzada para dichos especímenes como se podrá observar a continuación, cabe resaltar que todos los ensayos destructivos propuestos se realizaron en un periodo de tiempo de 6 minutos como lo establece la norma ASTM C365. El esfuerzo de compresión aplicado se representa en Megapascuales en el eje y de la gráfica y para el eje x se representa la deformación unitaria de ingeniería en porcentaje.

#### 3.1.1 Probetas lote A

Para esta configuración geométrica de honeycomb, 7 especímenes fueron sometidos a pruebas de compresión plana o tipo Flatwise. Es relevante resaltar que los requerimientos de la norma ASTM C365 exigen el uso de al menos 5 resultados válidos para obtener resultados correctos en el procesamiento estadístico de los datos. En la Figura 44 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación a 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, para el espécimen A7 el cual

presentó un modo de falla inválido debido a que la deformación se presentó en una esquina y por ende la estructura del honeycomb falló antes de alcanzar el valor máximo de carga en comparación con los especímenes A1 al A6 se debió a dos defectos críticos (ii) y (vi) que presentó el espécimen A7 los cuales surgieron en el proceso de manufactura, el protocolo de control de calidad fue capaz de determinar que dicho espécimen posiblemente fallaría de manera inválida como realmente sucedió verificando la existencia de dichos defectos críticos. Ahora bien, se puede apreciar de igual forma en la Figura 44 que el esfuerzo último alcanzado por el espécimen A4 tiene un valor menor en comparación con los especímenes A1, A2, A3, A5 y A6.

De acuerdo a la teoría descrita en el Capítulo 1 de este documento que hace referencia al comportamiento de honeycomb cargados axialmente a compresión en el plano *out-of-plane*, puede evidenciarse 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, de igual forma teniendo en cuenta el control de calidad aplicado para el espécimen A4, se determinó que existía la presencia de un defecto crítico, el cual no procedió a una falla inválida del espécimen pero si posiblemente produjo que el valor de esfuerzo último soportado por el espécimen A4 estuviera fuera de la tendencia del valor de esfuerzo último, por otro lado en la comparación de atributos realizada en el Anexo 12, se determinó que la densidad (peso) del espécimen A4 el cual es uno de los menores en el lote A y según la teoría de honeycomb la cual relaciona la densidad y el esfuerzo, pudiera conducir a que el espécimen A4 soportara mucho menos carga en comparación a los otros elementos, es por esto que fue descartado de igual forma que el espécimen A7.

Es necesario especificar que no se presenta un comportamiento tipo “plateau” (Figura 13) debido a la corta duración de la prueba y a que no se presenta una densificación total de las celdas además de no presentarse la totalidad de la deformación, la gráfica de esfuerzo vs deformación para cada espécimen se relaciona con la variación del esfuerzo de transición en cada uno de los especímenes, relacionando su modo de falla y el esfuerzo presentado, una deformación uniforme de las celdas, el colapso de las celdas se presentó al sobre pasar el esfuerzo de fluencia de material, la

presencia de un defecto mayor enfocado en la separación de deposición del filamento por la forma de producción fue el único detectable, se obtuvieron defectos menores sobre los revestimientos del espécimen, pero la inspección visual y geométrica del espécimen no detectó variaciones geométricas considerables que afectara el comportamiento mecánico del elemento, por ende se pudo evidenciar que el parámetro físico que afectó en mayor parte el esfuerzo soportado entre los especímenes fue la densidad en cada uno de estos.

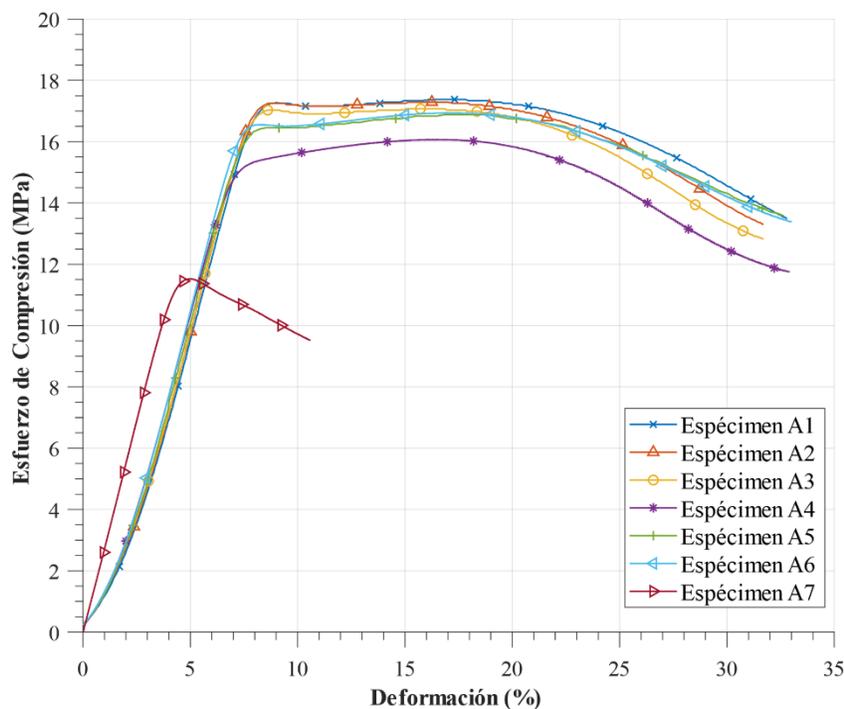


Figura 44. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de honeycombs tipo A.

Fuente: (Autores, 2019).

En la Tabla 14 se registran los valores de esfuerzo último de compresión, esfuerzo al 2 % de deformación y el módulo de compresión de los siete especímenes probados, así mismo se realizó el análisis estadístico de cada parámetro mencionado anteriormente.

Tabla 14. Propiedades mecánicas de especímenes tipo A

Especímen	$F_z^{fcu}$ (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	$E_z^{fc}$ (MPa)
A1	17,382	2,613	262,100
A2	17,294	2,769	266,500
A3	17,075	2,821	263,000
A4	16,070	2,970	235,333
A5	16,878	2,921	254,867
A6	16,940	2,950	262,333
A7	11,524	5,650	255,500
<b>Promedio simple</b>	<b>16,166</b>	<b>3,242</b>	<b>257,090</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>2,091</b>	<b>1,069</b>	<b>10,463</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>12,937</b>	<b>5,650</b>	<b>4,070</b>

Fuente: Autores (2019).

Resaltando el descarte de los especímenes A4 y A7 como se explicó anteriormente, en la Tabla 15 se vuelve a calcular el promedio simple, desviación estándar y coeficiente de variación porcentual de los honeycomb tipo A.

Tabla 15. Propiedades mecánicas de la muestra representativa de especímenes tipo A.

Especímen	$F_z^{fcu}$ (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	$E_z^{fc}$ (MPa)
<b>Promedio simple</b>	17,114	2,8415	261,760
<b>Desviación estándar</b>	0,219	0,136	4,242
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	1,280	4,780	1,620

Fuente: Autores (2019).

En la Tabla 15 se muestra el comportamiento mecánico de los especímenes tipo A, los cuales fueron seleccionados como las muestras representativas de los ensayos mecánicos efectuados a honeycomb con tamaños de celda igual a 9,525 milímetros.

Se presentó deformación uniforme sobre toda su superficie, se puede evidenciar el pandeo plástico en las celdas centrales de los especímenes, por otro lado, las celdas ubicadas en las esquinas colapsaron debido al desprendimiento de los filamentos al alcanzar el esfuerzo de transición del material. Los defectos menores sobre los revestimientos no tuvieron efecto sobre el comportamiento mecánico. Sin embargo, el defecto mayor que infiere la separación de filamento depositado por codificación de la impresión en las celdas de las esquinas pudo ser un factor para que dichas celdas

colapsaran y no presentaran un pandeo como las celdas centrales las cuales no representan dicho defecto.

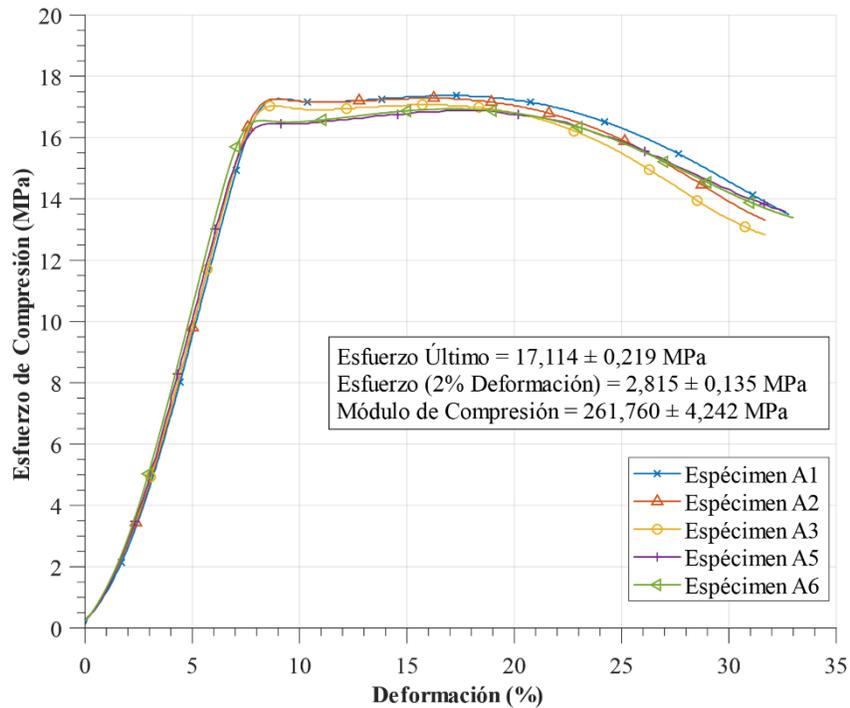


Figura 45. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de especímenes tipo A seleccionados.

Fuente: (Autores, 2019).

En la Tabla 16 se presentan los valores de esfuerzo específico y carga específica para cada espécimen probado del lote A, los pesos de cada espécimen se pueden consultar en el Anexo 11, el peso promedio para este espécimen es de 42,540 gramos.

Tabla 16. Esfuerzo máximo específico y carga específica para especímenes lote A.

Especimen	$F_{z\text{especifico}}$ (Pa/gr.)	$P_{\text{especifico}}$ (N/gr.)
A1	399285,534	2630,519
A2	401883,757	2630,519
A3	401763,728	2632,941
A4	380805,687	2492,717
A5	399327,578	2616,719
A6	398588,235	2609,436
A7	276014,891	1810,778

Fuente: Autores (2019).

### 3.1.2 Probetas lote B

De la configuración geométrica tipo B de honeycomb, fueron sometidos a ensayos destructivos de compresión 7 especímenes. En la Figura 46 se presenta la variación del esfuerzo a compresión en relación a la deformación unitaria porcentual de todos los especímenes probados, se puede observar que el compartimiento elástico tiende a ser constante para los especímenes probados, de esto se puede concluir que el proceso de manufactura de dichos especímenes se mantuvo en parámetros constantes. Por otra parte, 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 algunas 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 explicada en el capítulo 1 de este documento en el cual se infiere que los honeycomb 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 evidenciar que el fenómeno de densificación de las celdas no se presenta, esto se explica debido a que las pruebas desarrolladas no llevaron a los especímenes hasta sus capacidades límite ya que el tiempo de prueba que se estipuló está basado en el numeral 11.5 de la norma ASTM C365 en donde se especifica que cada prueba debe estar contemplada en un rango de tiempo entre 3 a 6 minutos. Como se puede ver en la Figura 13, el fenómeno de densificación se presenta en un rango mayor al 50 por ciento de deformación y para esta prueba solo se llegaron a rangos del 25 hasta el 35 por ciento de deformación.

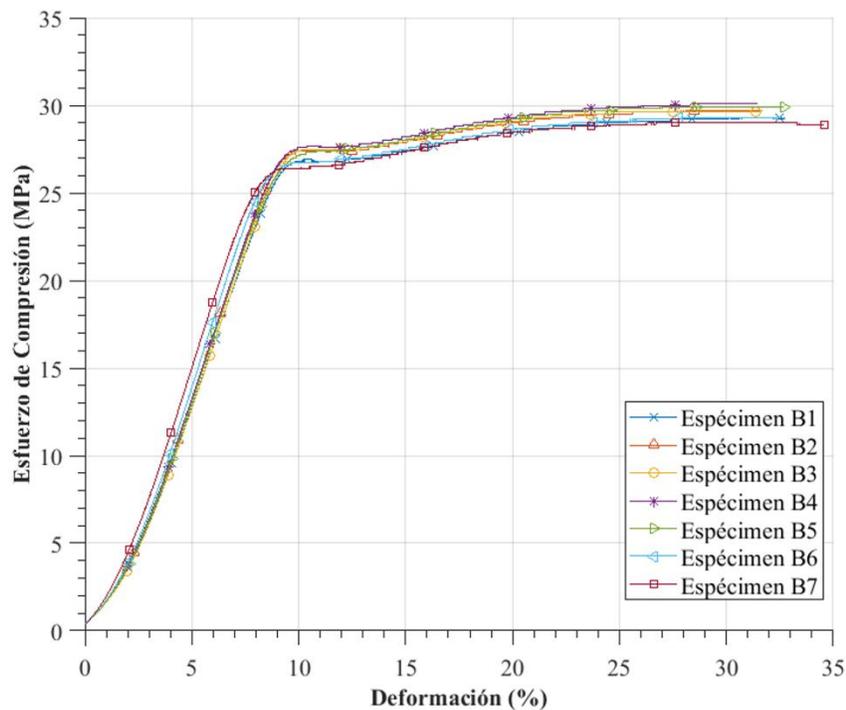


Figura 46. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de honeycomb tipo B.

Fuente: (Autores, 2019).

En la Tabla 17 se muestran los todos valores para el esfuerzo último a compresión, el esfuerzo al 2 por ciento de deformación y el módulo de compresión de los especímenes tipo B, además se muestran los valores del promedio simple, la desviación estándar y el coeficiente de variación para los valores de las tres propiedades mecánicas calculadas. De la gráfica anterior se puede evidenciar que el comportamiento del espécimen B7 en la zona de transición muestra un esfuerzo menor en comparación con los demás especímenes, al igual que en la zona elástica donde presenta valores de esfuerzo por encima del valor promedio de esfuerzo para los especímenes restantes, es por ello que se decide descartar dicho espécimen, igualmente el espécimen B6 fue descartado debido a que los valores de esfuerzo al 2 % de deformación y módulo se encuentran por fuera de la desviación estándar. Esta diferencia de valores puede residir de igual forma en los especímenes descartados para el lote A en la densidad ya que el espécimen B6 y B7 presentaron valores de peso menores en comparación a

los demás especímenes del lote B. Cabe recordar que la norma ASTM C365 requiere por lo menos 5 resultados válidos para la muestra significativa de los valores de esfuerzo y modulo que pueden soportar los núcleos tipo honeycomb.

Tabla 17. Propiedades mecánicas de especímenes tipo B.

Espécimen	$F_z^{fcu}$ (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	$E_z^{fc}$ (MPa)
B1	29,267	3,600	349,000
B2	29,718	3,690	359,667
B3	29,723	3,500	354,333
B4	30,105	3,750	359,667
B5	29,871	3,670	358,667
B6	29,305	3,870	378,000
B7	29,034	4,450	373,667
<b>Promedio simple</b>	<b>29,575</b>	<b>3,790</b>	<b>361,857</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0,381</b>	<b>0,313</b>	<b>10,342</b>
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>1,289</b>	<b>8,261</b>	<b>2,858</b>

Fuente: Autores (2019).

En la Tabla 18 se presentan los valores estadísticos que representan las muestras significativas de los especímenes tipo B, por ende, fueron descartados los especímenes B6 y B7 como se explicó anteriormente para poder obtener los valores finales.

Tabla 18. Propiedades mecánicas de la muestra representativa de especímenes tipo B.

Espécimen	$F_z^{fcu}$ (MPa)	$\sigma_z^{fc0,02}$ (MPa)	$E_z^{fc}$ (MPa)
<b>Promedio simple</b>	29,737	3,642	356,267
<b>Desviación estándar</b>	0,306	0,096	4,621
<b>Coefficiente de variación (%)</b>	1,030	2,629	1,297

Fuente: Autores (2019).

De igual forma, en la Figura 47 se presenta la gráfica del comportamiento elástico y plástico en función al esfuerzo y deformación porcentual de los especímenes representativos para un tamaño de celda igual a 6,35 milímetros. Adicionalmente se expone el comportamiento de los especímenes aptos del lote B donde el valor del esfuerzo último promedio es 29,737 MPa y la deformación de las celdas producto de la compresión en este lote.

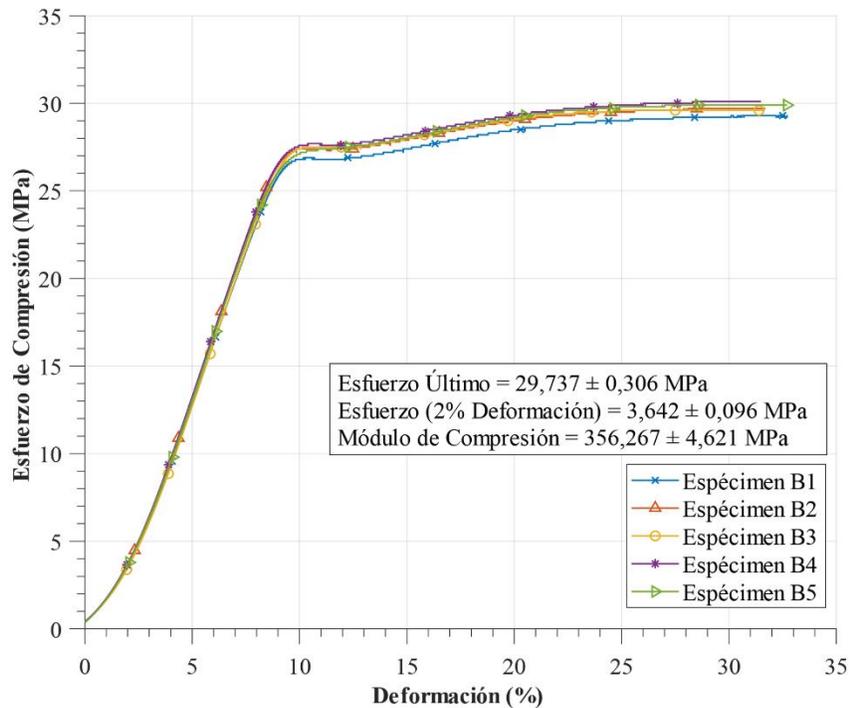


Figura 47. Esfuerzo de compresión vs. Deformación unitaria porcentual de especímenes tipo B seleccionados.

Fuente: (Autores, 2019).

Por otra parte, el comportamiento del espécimen tipo sándwich se destaca por la generación de la compresión pareja y constante en la deformación de celdas (aplastamiento) y tuvo para este lote una deformación con valores dispersos y con variaciones entre sí. La Figura 47 también presenta el esfuerzo máximo de compresión soportado, el módulo de compresión y el esfuerzo al 2% de la deformación de los especímenes representativos, donde se puede observar la transición del comportamiento sometido a la prueba destructiva y la similitud visual en los puntos de la gráfica del esfuerzo de compresión vs deformación unitaria entre los especímenes probados. Es relevante resaltar que la tendencia en el compartimento mecánico de las probetas arrojado por la máquina universal de ensayos compone un exitoso seguimiento de los estándares comprendidos en la ASTM C365 y un correcto protocolo de calidad propuesto.

En la se presentan los valores de esfuerzo especifico y carga especifica para cada espécimen probado del lote B, los pesos de cada espécimen se pueden consultar en el anexo 12, el peso promedio para esté espécimen es de 51,471 gramos.

Tabla 19. Esfuerzo máximo especifico y carga especifica para especímenes lote B.

Espécimen	$F_{z\text{especifico}}$ (Pa/gr.)	$P_{\text{especifico}}$ (N/gr.)
B1	573478,291	3331,156
B2	573328,491	3333,762
B3	571227,861	3322,870
B4	581557,065	3382,486
B5	577404,721	3365,335
B6	576865,814	3354,331
B7	568179,932	3309,198

Fuente: (Autores, 2019).

### 3.2 Comparación de resultados de honeycomb lote A

La comparación de las propiedades mecánicas de los especímenes tipo A se realizó en función al valor promedio del módulo de compresión de los especímenes probados con datos experimentales de honeycomb fabricados en Aluminio y Aramida. En el Anexo 1 se presentan los valores de las propiedades mecánicas de honeycomb comerciales en los cuales se clasifican por el tamaño de celda y por el valor de densidad nominal.

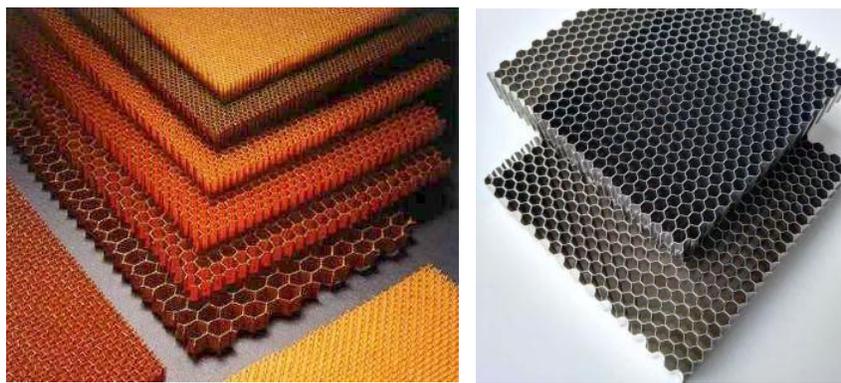
Tabla 20. Comparación de propiedades mecánicas de honeycomb tamaño de celda 3/8''.

Propiedad mecánica	Materiales de fabricación					
	PLA	CR III 5052	CR III 5056	PAMG-XR1 5052	HRH-10	PN2 Aramida
Densidad nominal ( $gr/cm^3$ )	1,339	0,067	0,048	0,048	0,048	0,048
Módulo de compresión (MPa)	261,760	930,792	634,318	634,318	117,211	668,791
Esfuerzo último (MPa)	17,114	3,861	2,344	2,206	2,206	1,931

Fuente: Autores (2019).

Por otra parte, para este tipo de tamaño de celda se generó la comparación del comportamiento mecánico del PLA entre cada uno de sus parámetros entre los diferentes tipos de materiales de fabricación de HC. En la Tabla 20 cabe destacar que la densidad nominal del PLA es la de valor máximo, debido a que lote A presenta un peso de alto valor en el núcleo celular

debido a la cantidad de material dado por la cantidad de capas depositadas y el método de conformación fundida en comparación de los métodos de manufactura de los HC en Aluminio 5052-5056 y Aramida, por consiguiente, este valor presenta una desventaja numérica en la aplicación comercial del PLA producto de valores de mayor magnitud entre los materiales de fabricación. Debido a que se tiene el mismo tamaño de celda es posible hacer la comparación numérica del módulo, aunque los demás materiales no presenten una configuración tipo sándwich y únicamente comprendan un mismo núcleo tipo honeycomb con predeterminado tamaño de celda, ver Figura 488. Para el PLA, la magnitud del módulo presenta un valor bajo en comparación a los demás materiales usados para la formación de honeycomb, esto puede ser debido a la conformación estructural, la densidad y la solidificación que presentan los especímenes manufacturados bajo técnica por deposición fundida, además de posibles tratamientos térmicos como procesos de endurecimientos pertenecientes a honeycomb de aluminio y procesos de troquelado en aramida, lo cual traduce en que dichos honeycombs son mucho más rígidos que el honeycomb en PLA pero debido a que este último posee mayor densidad, por ende soportara un esfuerzo mayor. Para el módulo del PLA se le atribuye un valor de 261,760MPa y este únicamente es mayor al del material HRH-10 con un valor 117,211MPa, pero esto no postula al módulo de compresión como su mejor propiedad mecánica del HC.



*Figura 48. HC comerciales Aluminio y Aramida.*

*Fuente: (Plascore, 2019).*

Con la finalidad de obtener una comparación con resultados confiables, se tuvo en cuenta el parámetro de esfuerzo último basándose en los 6 tipos de materiales con estructura celular tipo honeycomb y los especímenes manufacturados en PLA, para este parámetro se obtuvo que las probetas de tamaño de celda de 3/8" manufacturadas bajo técnica por deposición fundida, se caracterizaron con un valor promedio de 17,114MPa posicionándose con la mayor magnitud entre los postulados descritos en la Tabla 20. Teniendo en cuenta los aspectos mecánicos de los HC se postula como la mejor propiedad en el uso de estructuras honeycomb en PLA, para el soporte de esfuerzos a compresión y se propone llevar a cabo estudios de fatiga para su implementación en estructuras sujetas a cargas cíclicas.

### 3.3 Comparación de resultados de honeycomb lote B

La comparación de las propiedades mecánicas de los especímenes tipo B se realizó en función al valor promedio del módulo de compresión de los especímenes probados con datos experimentales de honeycomb fabricados en aluminio y Aramida. En el Anexo 1 se presentan los valores de las propiedades mecánicas de honeycomb comerciales en los cuales se clasifican por el tamaño de celda y por el valor de densidad nominal.

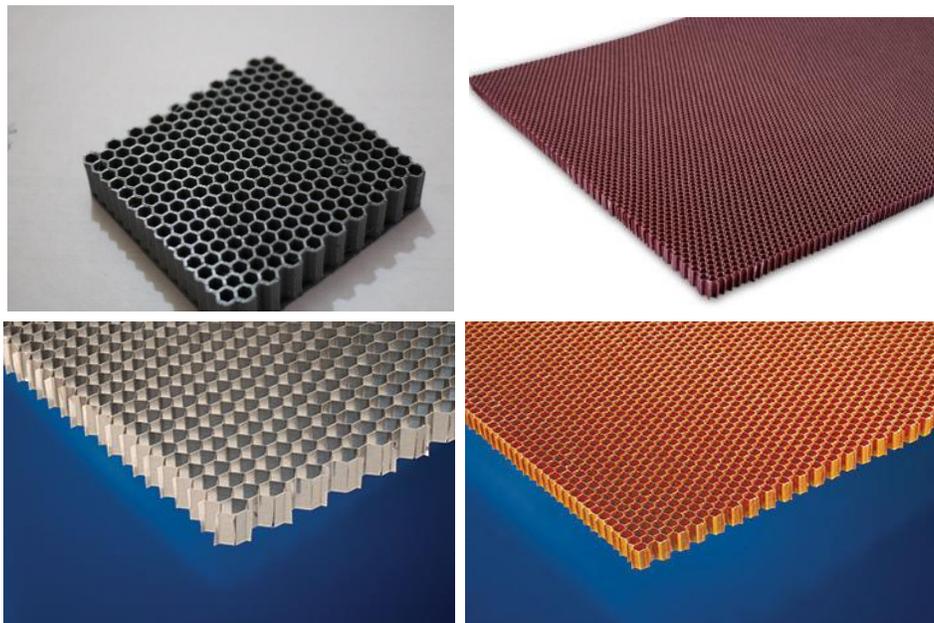
Tabla 21. Comparación de propiedades mecánicas de honeycomb tamaño de celda 1/4''.

Propiedad mecánica	Materiales de fabricación					
	PLA	CR III 5052	CR III 5056	PAMG-XR1 5052	HRH-10	PN2 Aramida
Densidad nominal ( $gr/cm^3$ )	1,434	0,096	0,083	0,083	0,064	0,048
Módulo de compresión (MPa)	356,267	1620,269	1585,795	1585,795	193,053	965,266
Esfuerzo último (MPa)	29,737	7,584	5,654	5,447	3,309	1,862

Fuente: Autores (2019).

Se estableció que el comportamiento mecánico del PLA varía entre cada uno de sus parámetros en comparación a los diferentes tipos de materiales de fabricación de HC. En la Tabla 21 cabe destacar que el valor de la densidad nominal del PLA es el valor máximo a igual que el

lote A, debido a la cantidad de material depositado y el método de conformación fundida en comparación de los métodos de manufactura de los HC en Aluminio 5052-5056 y Aramida, por consiguiente, este valor presenta una desventaja numérica en la aplicación comercial del PLA producto de valores de mayor magnitud entre los materiales de fabricación. Debido a que se tiene el mismo tamaño de celda es posible hacer la comparación numérica del módulo, aunque los demás materiales no presenten una configuración tipo sándwich y únicamente comprendan un mismo núcleo tipo honeycomb con predeterminado tamaño de celda ver Figura 49.



*Figura 49. Comparación entre HC PLA y HC comerciales.*

*Fuente: (Autores/Plascore, 2019).*

Para el PLA, la magnitud del módulo de compresión presenta un valor bajo en comparación a los demás materiales usados para la formación de honeycomb, al módulo le pertenece un valor de 356,267 MPa y este únicamente es mayor al de la Aramida PN2 con un valor 193,053 MPa, pero esto no posiciona al módulo como su mejor propiedad mecánica del HC.

Por otra parte, para este tipo de tamaño de celda se generó la comparación del comportamiento mecánico del PLA entre cada uno de sus parámetros entre los diferentes tipos de materiales de fabricación de HC. En la Tabla 21 cabe destacar que la densidad nominal del PLA

es la de valor máximo, debido a que lote B presenta un peso de alto valor en el núcleo celular debido a la cantidad de material dado por la cantidad de capas depositadas y el método de conformación fundida en comparación de los métodos de manufactura de los HC en Aluminio 5052-5056 y Aramida, por consiguiente, este valor presenta una desventaja numérica en la aplicación comercial del PLA producto de valores de mayor magnitud entre los materiales de fabricación. Debido a que se tiene el mismo tamaño de celda es posible hacer la comparación numérica del módulo, aunque los demás materiales no presenten una configuración tipo sándwich y únicamente comprendan un mismo núcleo tipo honeycomb con predeterminado tamaño de celda, ver Figura 49.

Con la finalidad de obtener una comparación con resultados confiables, se tuvo en cuenta el parámetro de esfuerzo último basándose en los 6 tipos de materiales con estructura celular tipo honeycomb y los especímenes manufacturados en PLA, la magnitud del módulo presenta un valor bajo en comparación a los demás materiales usados para la formación de honeycomb debido a la conformación estructural y la solidificación que presentan los especímenes manufacturados bajo técnica por deposición fundida, además de posibles tratamientos térmicos como procesos de endurecimientos pertenecientes a honeycomb de aluminio y procesos de troquelado en aramida, al módulo del PLA, para este parámetro se obtuvo que las probetas de tamaño de celda de 1/4" manufacturadas bajo técnica por deposición fundida, se caracterizaron con un valor promedio de 29,737 MPa posicionándose con la mayor magnitud entre los postulados descritos en la Tabla 21. Teniendo en cuenta los aspectos mecánicos de los HC se postula como la mejor propiedad en el uso de estructuras honeycomb en PLA, para el soporte de esfuerzos a compresión y se proponen futuros estudios de fatiga para su implementación en estructuras sujetas a cargas cíclicas.

## CONCLUSIONES

- Conforme al desarrollo del proceso de manufactura, se determinó que la temperatura que presenta un mejor proceso de extrusión para el material PLA del fabricante Prusa Research es de 218 °C, basado en las pruebas de impresión realizadas con tamaño de celda variable, en las cuales se pudo identificar que el filamento logra una mejor adherencia a la cama de impresión.
- Dentro del proceso de manufactura, se estableció que la mejor temperatura de cama para un proceso de impresión de PLA del fabricante Prusa Research es de 50°C, proporcionando así, adherencia uniforme en las primeras capas de extrusión.
- Una ventaja que presenta la manufactura aditiva es la disminución de material residual proveniente de procesos actuales de manufactura, debido a que se utilizan cantidades exactas de material.
- Una desventaja que presenta la deposición fundida es el tiempo requerido en la impresión de extensos o grandes volúmenes geométricos debido a condiciones de temperatura y de fijación de capas.
- Se define que un valor de altura entre capas puede ser de 0,20 mm para un proceso que genere una correcta unión entre capas consecutivas, procurando así solidez entre las capas del espécimen.
- Se pudo identificar que la deposición incorrecta de filamento en una sucesión continúa de capas del conformado el honeycomb, conlleva a generar concentradores de esfuerzo por los cuales se presentan fallas estructurales durante la aplicación de cargas de compresión.
- La trayectoria del extrusor debe recorrer dos veces el espesor de cada celda de la estructura tipo honeycomb para que se presente un adecuado proceso de adherencia y conformación estructural en cualquier tipo de espécimen.
- Los protocolos de control de calidad tanto visual como geométrico proporcionan y facilitan la identificación y selección de especímenes adecuados para la ejecución de pruebas mecánicas

de tipo compresión plana, generando en gran medida la probabilidad de evitar fallas prematuras y resultados desacertados debidos a efectos y configuraciones de impresión erróneas.

- La configuración estructural que presenta un mayor comportamiento mecánico uniforme en la zona elástica corresponde al tamaño de celda de 1/4" en comparación con la configuración de tamaño de celda de 3/8".
- La configuración estructural que presenta el mayor módulo de compresibilidad para el material PLA del fabricante Prusa Research fue la configuración de 1/4" como tamaño de celda proporcionando un valor promedio de 356,267 MPa.
- La configuración estructural que presenta el mayor esfuerzo máximo a compresión para PLA es la configuración de 1/4", proporcionando un valor de 29,737 MPa.
- Un parámetro fundamental en el proceso de manufactura aditiva para estructuras celulares tipo honeycomb, fue la separación de filamentos en el código de impresión (FlashPrint-FlashForge) debido a que este conforma la unión entre los filamentos e hilos depositados de forma uniforme.
- La densidad nominal que presentan tanto el lote A y como el lote B, corresponden a un valor mayor en comparación a los honeycomb de Aramida y Aluminio debido al proceso de manufactura empleado en el desarrollo de la investigación, el cual genera una cantidad de capas que componen el núcleo propias de la técnica por deposición fundida.
- Los módulos de compresión correspondientes al lote A y lote B son relativamente bajos en comparación a los materiales tomados como referencia, principalmente basados en los procesos de manufactura y tratamientos térmicos que estos presentan.
- Los esfuerzos de transición varían debido a la teoría de Gibson, es decir la densidad del núcleo tipo honeycomb juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico de los especímenes, los que presentan mayor esfuerzo de transición y esfuerzo ultimo son los que

más pesan (mayor densidad) o los que menor cantidad de defectos críticos y mayores presentan.

## **RECOMENDACIONES**

En primera instancia se sugiere realizar un seguimiento riguroso del contenido de la norma ASTM C-365 para determinar las características mecánicas de materiales tipo sándwich, basados en la cantidad de probetas necesarias para asegurar resultados estadísticos válidos según lo exige la norma para cada tamaño de celda de la estructura tipo honeycomb.

Como recomendación se sugiere calcular experimentalmente la tasa de enfriamiento de los especímenes teniendo en cuenta la temperatura de la probeta, la temperatura de cama además de la interferencia con la temperatura ambiente del lugar con ayuda de la cámara tipo FLIR E3 que proporciona imágenes y valores térmicos.

Para la generación de código G es conveniente hacer uso del programa de acceso libre FlashPrint debido a la compatibilidad que existe con la máquina de impresión FlashForge Creator descrita en el documento, de esta forma el programa permite por medio de una interfaz de usuario modificar parámetros operativos de impresión tales como: altura de capa, velocidad de impresión, temperatura de cama, temperatura de extrusión, porcentaje de relleno y tipo de material a emplear, entre otros. Adicionalmente, la interfaz proporciona herramientas de visualización previas a la impresión, así como la cantidad de capas empleadas para la conformación de un espécimen.

Se recomienda una previa calibración del eje Z de la impresora FlashForge Creator antes de empezar el proceso de impresión siguiendo las especificaciones técnicas del fabricante, garantizando de esta manera un mejor proceso en la deposición de filamentos y una correcta adherencia entre capas, este parámetro tiene como finalidad la obtención de resultados adecuados acordes con las características geométricas de cada espécimen.

Para ejecutar un correcto proceso de impresión se sugiere un calentamiento previo y para mantener una temperatura constante para el PLA del fabricante Prusa Research, de 218°C del extrusor y 50 °C de cama durante al menos 12 minutos antes de la impresión, esto para proporcionar mejor adherencia en la primera capa de extrusión, así como uniformidad entre las capas de filamentos depositados que

compondrán a los especímenes impresos, asegurando que la temperatura de cama sea mayor que la temperatura ambiente.

Se sugiere que para futuras impresiones se realice mantenimiento preventivo y correctivo a la máquina de impresión puesto que las impresiones consecutivas en la misma generan el deterioro normal de elementos mecánicos como soportes, varillas, poleas, rodamientos, correas y motores.

Con el fin de identificar con certeza el tiempo de solidificación de las piezas realizadas bajo un proceso de modelado por deposición fundida, se sugiere calcular la tasa de enfriamiento de la pieza a tratar.

Por otra parte, se recomienda incentivar futuras investigaciones basadas en aplicaciones de técnicas por manufactura aditiva con el fin de determinar ventajas y aplicabilidades conforme a las propiedades mecánicas de la extensa gama de materiales existentes.

Se sugiere tener en cuenta programas como Simplify 3D que permite controlar muchas más variables de impresión generando mayor precisión y un seguimiento continuo en la impresión evitando errores y pérdidas de material.

Para determinar el espesor de celda se sugiere el desarrollo de un experimento de impresión, a base de prueba y error con varios tipos de especímenes variando las características en el Gcode para encontrar los parámetros adecuados de impresión.

## Referencias

- ASTM International. (2016). *ASTM C365 / C365M-16 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. Retrieved from <http://www.standardscentre.co.uk/bs/ASTM-C365/C365M---11/>
- Departamento de Defensa de Estados Unidos de América. (1956, Junio 15). *everyspec*. Retrieved from [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-401B\\_5654/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-401B_5654/)
- Departamento de Defensa de Estados Unidos de América. (1963, Abril 29). *EverySpec*. Retrieved from [http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-105E\\_11675/](http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0100-0299/MIL-STD-105E_11675/)
- Fafenrot, S., Grimmelsmann, N., Wortmann, M., & Ehrmann, A. (2017, Octubre 19). *NCBI*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5667005/>
- FlashForge 3D Printer. (2016). *Flashforge*. Retrieved from <http://www.flashforge.com/creator-pro-3d-printer/>
- Gibson, L., & Ashby, M. (1997). *Cellular Solids Structures and Properties* (Segunda ed., Vol. I). Londres: Cambridge University Press.
- HEXCEL. (1999). *HexWeb Honeycomb Attributes and Properties*. Retrieved from [https://www.hexcel.com/user\\_area/uploads/Honeycomb\\_Attributes\\_and\\_Properties.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/uploads/Honeycomb_Attributes_and_Properties.pdf)
- Kashif Khan, M. (2006, Febrero). *Suparco*. Retrieved from <http://www.suparco.gov.pk/downloadables/properties-honeycomb.pdf>
- Lerch, B. (2018, Febrero). *National Aeronautics and Space Administration*. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20180001568.pdf>
- Miller, W., Smith, C., Scarpa, F., & Evans, K. (2009, Noviembre 6). *ScienceDirect*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.022>
- NatureWorks. (2017). Retrieved from [https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet\\_4043D\\_films\\_pdf.pdf?la=en](https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_films_pdf.pdf?la=en)
- Pollard, D., Ward, C., Herrmann, G., & Etches, J. (2017, Abril 26). *Tandofline*. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/20550340.2017.1306337>
- PRUSA Research. (2018). Retrieved from <https://shop.prusa3d.com/en/filament/46-silver-pla-filament-1kg.html>
- Relaño Pastor, A. (2013, Octubre). *Universidad Carlos III de Madrid Biblioteca e-Archivo*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10016/18015>
- Sanchez R, C., & Cortés R., C. (2006, Abril). *SciELO*. Retrieved from [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092006000100014](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092006000100014)
- Sood, A., Ohdar, R., & Mahapatra, S. (2011, Junio 2). *Journal of Advance Research*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>
- Villamil, G. P. (2014, Octubre 8). *Thingiverse*. (M. Industries, Ed.) Retrieved Junio 16, 2018, from <https://www.thingiverse.com/thing:493228>
- Yazdarni Sarvestani, H., Akbarzadeh, A., Niknam, H., & Hermenean, K. (2018, Abril 5). *ScienceDirect*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.002>