

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO AERONÁUTICO
2. **TÍTULO:** Caracterización de Propiedades Mecánicas de Estructuras Tipo Sándwich con Núcleo en Honeycomb Bajo Cargas de Flexión.
3. **AUTORES:** Andrés Núñez Montoya y David Felipe Blanco Murillo.
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C
5. **FECHA:** Abril de 2020
6. **PALABRAS CLAVE:** Manufactura Aditiva, Ácido Poliláctico (PLA), Esfuerzo de Flexión, Fibra de Carbono, Materiales Compuestos de Matriz Polimérica, Norma ASTM C393.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es caracterizar las propiedades mecánicas a flexión de probetas fabricadas bajo la técnica de modelado por deposición fundida. En este proyecto se realizó la fabricación de estructuras tipo sándwich con núcleo en *honeycomb* bajo dos configuraciones de tamaño de celda (1/4" y 3/8") y con laminados de refuerzo en PLA y fibra de carbono, esto con el fin de demostrar la viabilidad de la implementación de los materiales compuestos en probetas a flexión por medio del análisis de gráficas y de tipos de falla en cada una de las probetas. Este proyecto se realizó bajo los lineamientos establecidos por la norma ASTM C393 con el fin de tener resultados verídicos y realizar los procedimientos adecuados con el fin de realizar los ensayos a flexión bajo las condiciones óptimas para así realizar el correspondiente análisis de resultados garantizando la fiabilidad de estos.
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:** El valor más alto de carga máxima y el promedio más alto correspondiente a la carga soportada por las probetas se encuentra en el lote de probetas con tamaño de celda de 3/8", determinado así que las probetas de 3/8" son más resistentes a la flexión que las probetas de 1/4". La estructura celular tipo honeycomb con tamaño de celda de 3/8" presenta mejores valores en todas sus propiedades mecánicas que las probetas con tamaño de celda de 1/4". La carga soportada está relacionada con el modo de falla debido a que los especímenes que soportaron cargas más bajas presentaron la ruptura del núcleo en la sección media del honeycomb a comparación de las probetas que fallaron por las paredes de la estructura celular obteniendo así valores más altos de carga soportada. El lote de probetas sometidas a temperatura post-fabricación presentó en todos sus especímenes falla tipo "X" (explosiva), es decir que someter las probetas a 50°C durante una hora con un proceso de enfriamiento controlado luego de ser fabricadas, tiene influencia en el modo de falla puesto que el tipo presentado en los tres lotes restantes variaba entre X, M, D y C. Las estructuras celulares tipo honeycomb fabricadas mediante técnicas de manufactura aditiva pueden ser empleadas en pequeñas aplicaciones como drones en las en promedio la carga no sea superior a 490 N para 1/4" y 539 N para 3/8" sin procesos de temperatura post-fabricación a 50°C o más.

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESTRUCTURAS TIPO
SÁNDWICH CON NÚCLEO EN HONEYCOMB BAJO CARGAS DE FLEXIÓN.**

Andrés Núñez Montoya.

David Felipe Blanco Murillo.

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA AERONAUTICA
BOGOTA D.C.
2020**

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESTRUCTURAS TIPO
SÁNDWICH CON NÚCLEO EN HONEYCOMB BAJO CARGAS DE FLEXIÓN.**

INTEGRANTES:

**Andrés Núñez Montoya.
David Felipe Blanco Murillo.**

DIRECTOR:

Daniel Agudelo Noreña MSc.

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA AERONAUTICA
BOGOTA D.C.
2020**

DEDICATORIA

iii

A mi familia que me apoyó en este proceso de formación como ingeniero aeronáutico, a mis padres Claudia Montoya, Ricardo Núñez y especialmente a mi hermana Luisa Núñez por presenciar cada paso y esfuerzo para lograr esta anhelada meta, por su apoyo en mis emprendimientos y sus consejos, mil gracias.

A esas dos personas que dejaron este mundo durante este proceso y que hicieron parte de mi vida, de quienes aprendí mucho y lamentablemente no lograron presenciar el fruto de estos años de esfuerzo y dedicación.

A mis amigos de la Universidad San Buenaventura Bogotá, con quienes compartí a lo largo de este proceso, con quienes aprendí y compartí momentos increíbles, a mis profesores por el conocimiento transmitido y por la excelente formación que me dejan para afrontar la vida profesional.

A esa persona tan especial, que desde el inicio de este proceso estuvo a mi lado, en los buenos y malos momentos, en las alegrías y tristezas, por todo el apoyo y por cada momento en esta gran aventura mil gracias Laura.

Y a todas las demás personas que de alguna forma me dieron el ánimo, motivación y apoyo para dar lo mejor de mí sin importar las circunstancias, gracias.

Andrés Núñez Montoya.

AGRADECIMIENTOS

iv

Se agradece inmensamente al ingeniero Daniel Agudelo Noreña por su tiempo, apoyo y aportes intelectuales para el desarrollo de este producto de investigación realizado para alimentar el conocimiento y la ciencia.

Al ingeniero Fabio Merchán gracias por su tiempo y acompañamiento en las pruebas destructivas realizadas, así como al ingeniero Jaime Pérez por su apoyo y tiempo dedicado.

Finalmente, a la Universidad de San Buenaventura Bogotá, gracias por brindarnos las bases del conocimiento necesarias para el desarrollar esta investigación y por la máquina universal de ensayos empleada para las pruebas destructivas.

1.	Introducción.....	1
2.	Planteamiento del problema.....	3
2.1.	Antecedentes.....	3
2.2.	Descripción y formulación del problema.....	17
2.3.	Objetivos.....	18
2.4.	Alcances y limitaciones.....	18
3.	Marco teórico y conceptual.....	22
3.1.	Manufactura aditiva.....	22
3.2.	Termoplásticos.....	23
3.3.	Estructuras celulares.....	24
3.4.	PLA.....	24
3.5.	Materiales compuestos de matriz polimérica.....	25
3.6.	Norma ASTM C 393.....	25
3.7.	Esfuerzo de flexión.....	26
3.8.	Diseño Factorial.....	27
4.	Metodología.....	29
5.	Desarrollo de ingeniería.....	31
5.1.	Proceso de pre-impresión.....	31
5.1.1.	Diseño de probetas.....	31
5.2.	Impresión de probetas.....	32
5.2.1.	Pruebas de impresión.....	32
5.2.2.	Impresión de probetas.....	34
5.2.3.	Control dimensional de probetas.....	35
5.3.	Laminados en fibra de carbono.....	36
5.3.1.	Diseño de laminados.....	36
5.3.2.	Fabricación de laminados.....	37
5.3.3.	Corte de laminados.....	42
5.3.4.	Control dimensional de los laminados.....	43
5.4.	Adhesión de los núcleos a los laminados.....	44
5.4.1.	Ensayo de adherencia.....	44
5.4.2.	Adherencia de laminados.....	45
5.5.	Pruebas mecánicas a flexión.....	51
5.5.1.	Configuración de la máquina universal de ensayos.....	51
5.5.2.	Cálculo de propiedades.....	53
5.5.3.	Manejo estadístico.....	55
5.6.	Diseño de experimentos.....	56
5.7.	Metodología de fabricación de estructuras tipo sándwich con un núcleo fabricado mediante técnica de manufactura aditiva y reforzado en materiales compuestos.....	61
6.	Presentación y análisis de resultados.....	64
6.1.	Probetas fabricadas en PLA.....	65
6.1.1.	Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4”	65

6.1.2.	Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8”....	70
6.1.3.	Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8” sometidas a temperatura post fabricación.	73
6.1.4.	Núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8” reforzados con laminados de fibra de carbono.	75
7.	Conclusiones.	80
8.	Recomendaciones.	82
9.	Bibliografía	83

Lista de tablas

Tabla 1. Códigos de identificación de fallos en probetas. Fuente: ASTM C393/C393M-16.....	26
Tabla 2. Dimensiones generales de los núcleos.....	32
Tabla 3. Parámetros generales de impresión de probetas. Fuente: Autores.....	34
Tabla 4. Tiempos de impresión de probetas. Fuente: Autores.....	35
Tabla 5. Relación volumétrica de resina y endurecedor. Fuente: Autores.	39
Tabla 6. Temperatura de curado y tiempo en cámara de calor para el pegamento Scotch-Weld DP420.	45
Tabla 7. Parámetros para generar reporte en la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.	53
Tabla 8. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 1/4" completamente PLA. Fuente: Autores.....	60
Tabla 9. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA. Fuente: Autores.....	60
Tabla 10. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.....	60
Tabla 11. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA. Fuente: Autores.	66
Tabla 12. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA. Fuente: Autores.....	67
Tabla 13. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA. Fuente: Autores.	70
Tabla 14. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA. Fuente: Autores.....	71
Tabla 15. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.	73
Tabla 16. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.....	75
Tabla 17. Propiedades mecánicas del lote de núcleos de 3/8" fabricados en PLA con laminados en fibra de carbono. Fuente: Autores.....	78

Lista de Figuras

Figura 1. Falla de estructura a 45°. Fuente: (Hedayati, 2016).....	3
Figura 2. Resultados de influencia de estructura celular. Fuente: (Hedayati, 2016)	4
Figura 3. Impresión de probetas. Fuente: (Calle Guamantario, 2014).....	5
Figura 4. Resultados de pruebas según patrón de relleno. Fuente: (Calle Guamantario, 2014).....	6
Figura 5. Vista isométrica de probeta tipo sándwich. Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)	6
Figura 6. Prueba a flexión de probeta compuesta. Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)	7
Figura 7. Resultados de pruebas con probetas de núcleo compuesto. Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)	7
Figura 8. Gráfica esfuerzo - deformación a alta velocidad. Fuente: (Cedillo, 2016)	8
Figura 9. Gráfica esfuerzo - deformación a baja velocidad. Fuente: (Cedillo, 2016).....	9
Figura 10. Comparación de datos experimentales y computacionales de prueba de fatiga. Fuente: (Hussain, Khan, & Abbas, 2019).....	10
Figura 11. Comparación de especímenes sometidos a cargas de flexión. Fuente: (Hussain, Khan, & Abbas, 2019).....	11
Figura 12. Gráfica de tensiones máximas. Fuente: (Alburquerque, 2014)	12
Figura 13. Estructura interna de probeta con menor resistencia a tensión. Fuente: (Alburquerque, 2014)	12
Figura 14. Estructura interna de probeta con mayor resistencia a tensión. Fuente: (Alburquerque, 2014)	13
Figura 15. Comparación de resultados obtenidos a tensión de PLA y ABS. (Agudelo, y otros, 2019)	14
Figura 16. Resultados de pruebas a compresión con núcleo de 1/4". Fuente: (Agudelo, Merchan, Nieto, & Rodríguez, 2019).....	15
Figura 17. Grafica de Fuerza vs. Deflexión. Fuente: Autores.	27
Figura 18. Diagrama de flujo de metodología.	30
Figura 19. Visualización de la probeta en Simplify 3D.....	33
Figura 20. Evidencia de “blobs” en impresión de prueba.....	33
Figura 21. Impresora 3D MakerGear M2.	35
Figura 22. Control de superficies de probetas.	36
Figura 23. Planos de corte de laminados en materiales compuestos.	37
Figura 24. Corte de fibra de carbono.	38
Figura 25. Corte de plástico de vacío.....	38
Figura 26. Pre-impregnado de fibra de carbono.	39
Figura 27. Aplicación de alcohol polivinílico en vidrio.	40
Figura 28. Vidrio con cinta chicle.....	40
Figura 29. “peel ply” (tela azul) y guata (tela blanca).	41
Figura 30. Laminado en proceso de vacío.	42

Figura 31. Laminados finales en fibra de carbono.....	42
Figura 32. Laminados de probetas cortados.	43
Figura 33. Control dimensional de laminados.	44
Figura 34. Pegamento epóxico Scotch-Weld DP 420.....	44
Figura 35. Núcleos y probetas previos a la entrada a la cámara de calor.	47
Figura 36. Curva de calentamiento Binder E28.....	48
Figura 37. Curva de enfriamiento Binder E28.....	49
Figura 38. Deformación de probetas en cámara de calor.....	50
Figura 39. Cabezal superior e inferior de máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.	52
Figura 40. Montaje de probeta en la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.....	53
Figura 41. Variables a controlar en el desarrollo estadístico. Fuente: Autores.	56
Figura 42. Gráfica de interrelación entre variables. Fuente: Autores.	57
Figura 43. Diagrama de flujo de la metodología de fabricación de probetas realizadas mediante técnicas de manufactura aditiva reforzadas con materiales compuestos. Fuente: Autores... 63	
Figura 44. Gráfica con perturbaciones debido a la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.....	64
Figura 45. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente: Autores.....	66
Figura 46. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente Autores.....	67
Figura 47. Probeta de 1/4" con tipo de falla M-A-B. Fuente: Autores.....	69
Figura 48. Probeta de 1/4" con tipo de falla X-A-F. Fuente: Autores.....	69
Figura 49. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8". Fuente: Autores.....	70
Figura 50. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8". Fuente: Autores.	71
Figura 51. Probeta de 3/8" con tipo de falla "M-A-B" Fuente: Autores.....	72
Figura 52. Probeta de 3/8" con tipo de falla "X-A-F" Fuente: Autores.....	73
Figura 53. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8" sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.....	74
Figura 54. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas con núcleo en PLA y laminados en fibra de carbono. Fuente: Autores.....	76
Figura 55. Falla de núcleo de la probeta 1 del lote. Fuente: Autores.	77
Figura 56. Falla de núcleo de la probeta 2 del lote. Fuente: Autores.	77
Figura 57. Zonas de adherencia profunda y superficial en los laminados. Fuente: Autores.	78

Nomenclatura

Símbolo	Significado
"	Pulgada.
°	Grado.
°C	Grado Celsius.
°F	Grado Fahrenheit.
B	Probabilidad de aceptar la hipótesis.
Φ	Parámetro de no centralidad.
σ	Esfuerzo estimado en la cara.
σ_f	Esfuerzo en la cara.
a	Número de variables del primer factor.
ABS	Acronitrilo butadieno estireno.
AM	Manufactura aditiva.
ASTM	Sociedad Americana para pruebas y materiales.
b	Número de variables del denominador.
CAD	Diseño asistido por computador.
cm	Centímetro.
CV	Coefficiente de variación.
D	Diferencia entre medias.
FDM	Modelado por deposición fundida.
F_s	Esfuerzo cortante del núcleo estimado.
F_s^{ult}	Esfuerzo cortante último del núcleo.
F_s^{yield}	Esfuerzo cortante de fluencia del núcleo.
gr	Gramo.
hr	Hora.
Hz	Hercio.
ISO	Organización internacional de normalización.
k	Espesor del núcleo.
kPa	Kilo Pascal.
m	Espesor del sándwich.
L	Separación entre cabezales de carga de la máquina universal.
min	Minuto.
mm	Milímetro.
MPa	Mega Pascal.
PLA	Ácido Poliláctico.
P_{max}	Carga máxima.
P_{yield}	Carga al 2% de la deflexión.
Q	Factor de fuerza en el laminado.
S	Separación entre soportes.
S_{n-1}	Desviación estándar.

Símbolo	Significado
STL	Lenguaje triangular estándar.
t	Espesor de los laminados.
Tg	Temperatura de transición vítrea.
v1	Grados de libertad del primer factor.
v2	Grados de libertad del denominador.
w	Ancho del sándwich.
x_i	Propiedad media.
\bar{x}	Valor promedio.

1. Introducción.

En la industria constantemente se han creado nuevos materiales y con ello diferentes técnicas de manufactura, es por esto que nace la necesidad de conocer las propiedades de cada uno de ellos para determinar posibles usos y aplicaciones que puedan tener en la industria; al contar con una amplia variedad de materiales se requiere de un sinnúmero de técnicas de manufactura que permitan la creación de elementos de forma precisa y de fácil operación, es así como las máquinas de impresión de 3D nacen con el fin de cubrir el vacío de la necesidad de modelar piezas simples y complejas en distintos materiales. Las técnicas de impresión 3D son procesos relativamente nuevos en el mercado y mucho más en el ámbito latinoamericano, sin embargo, el modelado por deposición fundida es el más conocido y actualmente empleado tanto en las industrias fabricando elementos para vehículos como en hogares imprimiendo partes simples para reparar elementos usados en el día a día.

Al diseñar y fabricar cualquier elemento es necesario tener en cuenta la futura aplicación y las cargas a las cuales la pieza estará sometida para así determinar el método de manufactura óptimo y su material, es por esto que se propone el desarrollo de un proyecto de investigación el cual esté enfocado en resolver el desconocimiento de las características mecánicas del ácido poliláctico (PLA) de la empresa Prusa bajo cargas de flexión a partir de una prueba de flexión de tres puntos en la máquina universal de ensayos, dicho material continua la línea de caracterización que se lleva en la Universidad; para ello por medio del modelado por deposición fundida se fabricaran probetas con una estructura celular definida, honeycomb para este caso. Adicionalmente, se fabricarán probetas que incluirán un recubrimiento de material compuesto en sus caras superior e inferior, con el fin de verificar la variación de las propiedades de este tipo de estructuras bajo la presencia de este material de refuerzo. La hipótesis a abordar será demostrar el incremento de la resistencia estructural al emplear el refuerzo en materiales compuestos.

A partir de la prueba de flexión realizada a cada espécimen, se realizará una comparación de las propiedades mecánicas a flexión (masa, esfuerzo de flexión, deformación a flexión y módulo de elasticidad a flexión) de cada una de las configuraciones de núcleo y laminado para así demostrar la hipótesis en mención.

La investigación contempla desarrollar un procedimiento de fabricación para las probetas con el fin de llevar un proceso de manufactura riguroso, y preciso puesto que en el mencionado se incluye un control dimensional con el cual se logrará obtener una mayor similitud entre las probetas impresas.

2. Planteamiento del problema.

En esta sección se evidencian los antecedentes y la formulación del problema con el cuál se da inicio al desarrollo del proyecto de investigación, además de los objetivos, alcances y limitaciones.

2.1. Antecedentes.

Mechanical properties of additively manufactured octagonal honeycombs.

Esta investigación realizada en el 2016 por R. Hedayati en la universidad Politécnica de Teherán en Irán se centró en el estudio de las propiedades mecánicas del honeycomb octagonal fabricado mediante técnicas de manufactura aditiva.

Durante la investigación se realizaron comparaciones entre el honeycomb octagonal y diferentes estructuras celulares como: rectangular, circular, cuadrada, diamante y especialmente honeycomb hexagonal.

Las pruebas mecánicas realizadas bajo cargas de compresión arrojaron como primer resultado una evidente falla del espécimen en la prueba, ya que al finalizar la aplicación de la carga las probetas presentaban una fractura a 45° como se ilustra en la Figura 1, por otra parte, al calcular el módulo de elasticidad y el punto de fluidez se evidencia una muy cercana aproximación entre las propiedades del honeycomb octagonal y hexagonal.

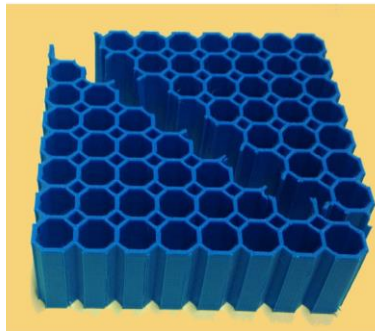


Figura 1. Falla de estructura a 45° .
Fuente: (Hedayati, 2016)

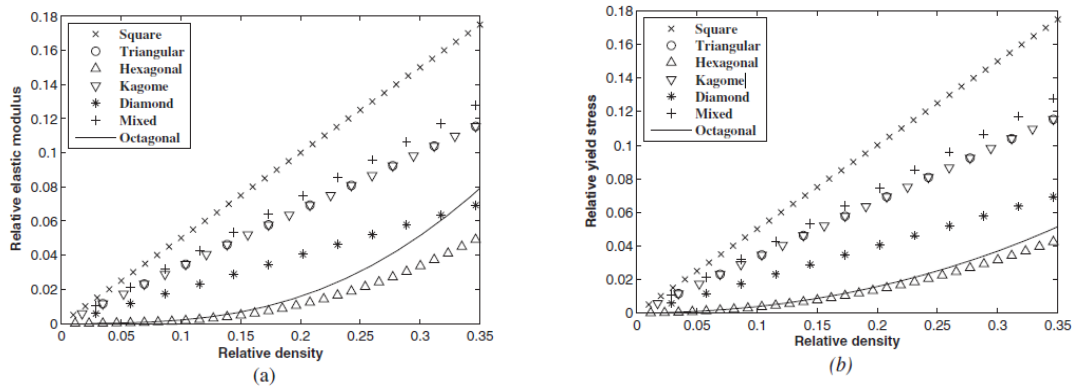
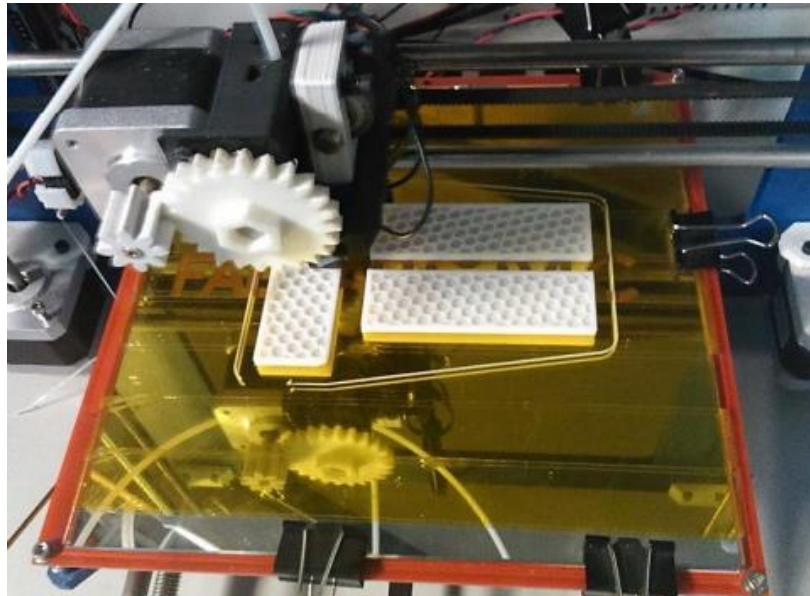


Figura 2. Resultados de influencia de estructura celular.
Fuente: (Hedayati, 2016)

Tomando como referente los resultados de la investigación realizada por R. Hedayati (Figura 2) fue posible definir una estructura celular para realizar el estudio de las propiedades mecánicas a flexión; teniendo en cuenta que los especímenes de este trabajo de investigación serán fabricados mediante manufactura aditiva se seleccionó el honeycomb hexagonal ya que presenta similitudes con el honeycomb octagonal y en términos de optimización de tiempo implica una menor cantidad de minutos la fabricación de la estructura celular hexagonal (Hedayati, 2016).

Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste.

En el 2014 W. Calle inició su investigación en la Universidad Politécnica de Valencia con el fin de determinar la influencia de la estructura celular interna de probetas fabricadas mediante técnicas de manufactura aditiva (modelado por deposición fundida) sometidas a cargas de flexión; las pruebas destructivas realizadas para determinar las características de las estructuras internas de las probetas se desarrollaron con la norma ISO 178:2006 como referente titulada: Plásticos: determinación de las propiedades de flexión.



*Figura 3. Impresión de probetas.
Fuente: (Calle Guamantario, 2014)*

La impresión de las probetas (Figura 3) se realizó en múltiples impresoras de bajo costo, sin embargo, como primer resultado obtenido en la investigación se determinó que no hay influencia de las impresoras en los resultados de las pruebas destructivas siempre y cuando se mantengan iguales los parámetros de impresión (temperatura de extrusión, altura de capa, temperatura de superficie, diámetro de extrusor, etc). Por otra parte, al finalizar el análisis de las pruebas a flexión se compiló la información presentando así la Figura 4, en la que se destaca el honeycomb como la estructura interna con mayor módulo de flexión y resistencia a la flexión en las tres diferentes densidades de relleno (20%, 50% y 100%); en cuanto a la deformación, el honeycomb es la estructura que menor porcentaje presenta, pero aun así se aproxima a los valores de las otras estructuras internas perdiendo así relevancia este aspecto en la influencia de las pruebas a flexión (Calle Guamantario, 2014).

Densidad de Relleno	Patrón de Relleno	Resistencia promedio a la flexión (MPa)	Deformación promedio a la flexión (%)	Módulo de flexión promedio (MPa)	Masa promedio (gr)	Tiempo promedio (min)
20%	Line	34,62	4,28	1238	5,78	17:07
	Honeycomb	35,96	4,00	1280	5,96	18:52
	Rectilinear	34,08	4,12	1186	5,70	16:56
50%	Line	42,54	5,28	1400	7,35	19:57
	Honeycomb	45,06	5,00	1502	7,83	23:47
	Rectilinear	42,20	5,06	1368	7,35	19:42
100%	Line	57,64	5,22	1838	9,67	23:57
	Honeycomb	62,34	5,08	1946	9,92	1:25
	Rectilinear	59,98	5,1	1824	9,76	23:54

Figura 4. Resultados de pruebas según patrón de relleno.
Fuente: (Calle Guamantario, 2014)

Three-point bending of sandwich beam with special structure of the core.

La Universidad de Tecnología de Poznan en Polonia, desarrolló una investigación liderada por el ingeniero Piotr Paczos con el fin de determinar las características de una estructura tipo sándwich sometida a cargas de flexión.

Las probetas fabricadas mediante técnicas de manufactura aditiva presentaban una sección en honeycomb desde los extremos extendiéndose hasta el centro (tonalidad más clara de la Figura 5) puesto que la hipótesis a demostrar en el proyecto se relacionaba con la reducción del peso en un espécimen empleando honeycomb con distribuciones no convencionales.

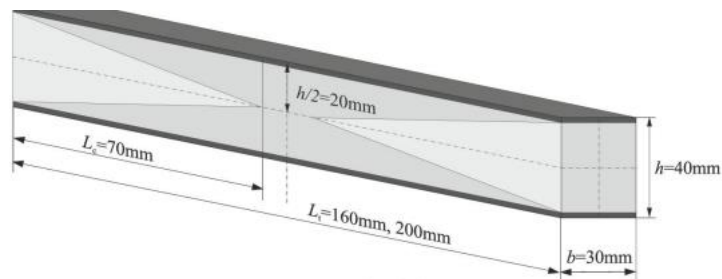


Figura 5. Vista isométrica de probeta tipo sándwich.
Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)

Una vez desarrolladas las pruebas destructivas de flexión a tres puntos (Figura 6) se determinó que la deflexión de los especímenes es proporcional a su longitud, es decir, entre mayor sea la longitud de la probeta, mayor será su deflexión, sin embargo, la carga soportada por la misma será menor, destacándose en este aspecto las probetas de menor longitud ya que estarán en capacidad de soportar las cargas más altas como se gráfica en la Figura 7 (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018).

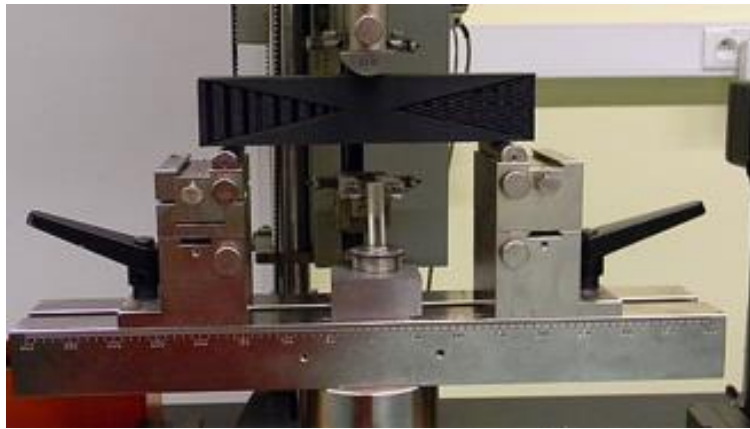


Figura 6. Prueba a flexión de probeta compuesta.
Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)

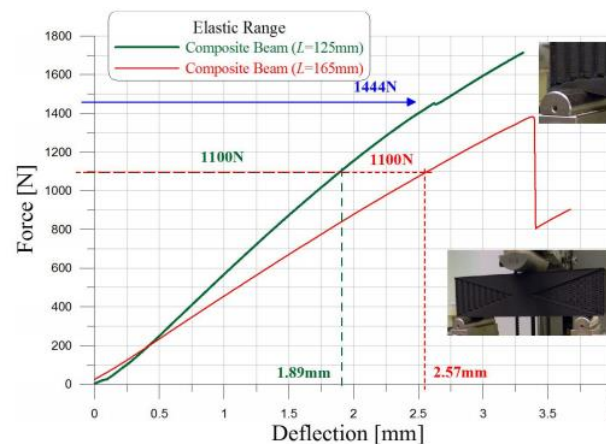


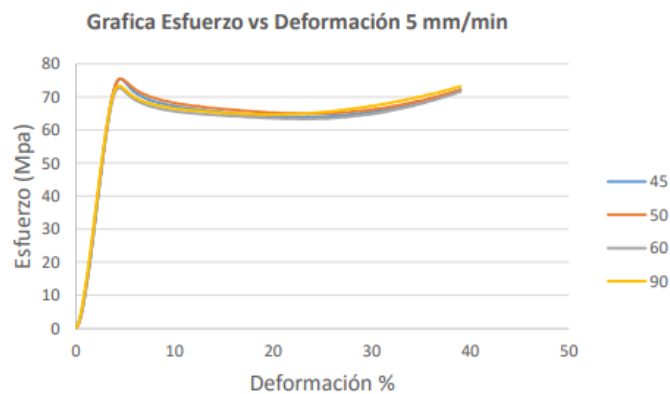
Figura 7. Resultados de pruebas con probetas de núcleo compuesto.
Fuente: (Paczos, Wichniarek, & Magnucki, 2018)

Caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3D.

En Ciudad de México transcurriendo el año 2016 en el Instituto Politécnico Nacional el ingeniero Arturo R. Cortés C. desarrolló una investigación relacionada a las propiedades mecánicas del PLA sometido a tensión y flexión a tres puntos; para cumplir el objetivo se emplearon las normas ASTM correspondientes a cada prueba para así obtener datos válidos.

Las probetas fueron fabricadas mediante el modelado por deposición fundida, y para desarrollar las pruebas a flexión y tensión la orientación de capas de los especímenes presentó variación en sus ángulos (45° , 50° , 60° y 90°), y en cuanto a la ejecución de la prueba destructiva se emplearon diferentes velocidades con el fin de determinar la influencia de estos dos parámetros en los resultados obtenidos.

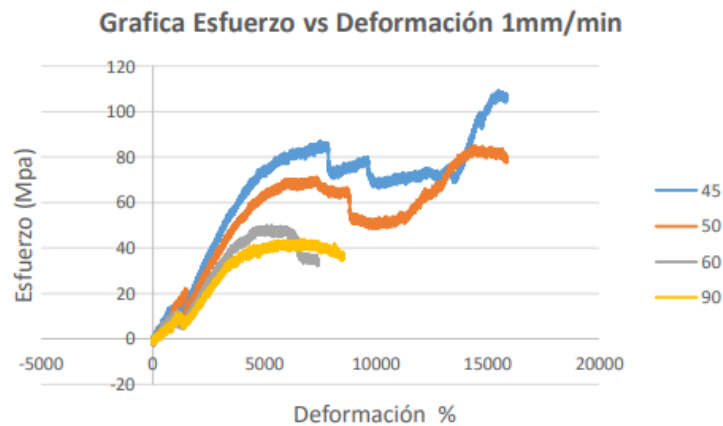
En cuanto a las probetas sometidas a pruebas de tensión se evidenció que la zona elástica de los especímenes presenta un comportamiento muy similar en todos los casos sin importar la velocidad de la prueba y la orientación de las capas de PLA no afectó drásticamente los resultados (Figura 8).



*Figura 8. Gráfica esfuerzo - deformación a alta velocidad.
Fuente: (Cedillo, 2016)*

Por otra parte, las pruebas de flexión arrojaron resultados muy variables al reducir la velocidad de la prueba destructiva (Figura 9), concluyendo que la orientación de capas y velocidad de prueba afecta directamente los datos obtenidos en el desarrollo de las pruebas mecánicas a flexión; no obstante, los resultados se concluyeron como válidos puesto que en pruebas realizadas repetitivamente se presentó el mismo comportamiento y tendencia

de las gráficas, y al seguir los pasos e indicaciones dadas por la normativa ASTM en cuanto al manejo estadístico y condiciones de pruebas se genera credibilidad en la información obtenida (Cedillo, 2016).



*Figura 9. Gráfica esfuerzo - deformación a baja velocidad.
Fuente: (Cedillo, 2016)*

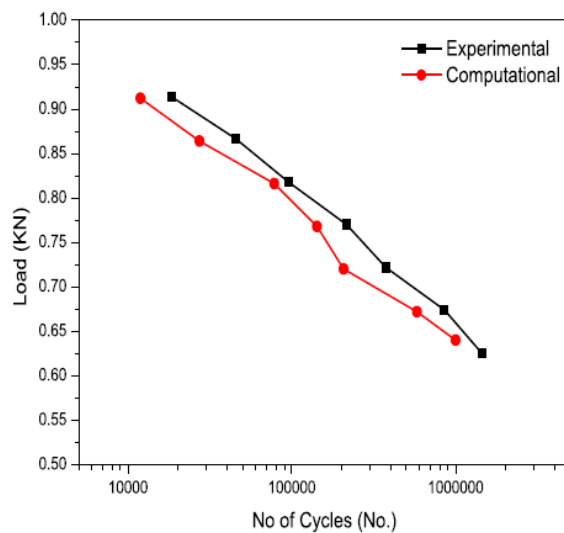
Experimental and computational studies on honeycomb sandwich structures under static and fatigue load.

A partir de una investigación en la Universidad del Rey Saudi, un grupo de estudiantes desarrollaron probetas tipo sándwich las cuales poseían una estructura celular tipo honeycomb de aluminio y en sus caras superior e inferior presentan un recubrimiento de fibra de vidrio; los lotes de probetas fabricados fueron sometidos a pruebas a flexión a tres puntos y a las correspondientes cargas de fatiga.

Para el desarrollo de la prueba de fatiga se empleó una señal senoidal con una frecuencia de 3 Hz que se aplicaba al espécimen el cual presentaba una capa delgada de oro sobre el laminado de fibra de vidrio mejorando así las características de las probetas y analizando mejor las cargas relacionadas a fatiga debido a las propiedades conductoras del oro.

En cuanto a los resultados de la prueba de fatiga (Figura 10) se presentó una diferencia entre el método experimental y el realizado por el método de análisis por elementos finitos puesto que la fibra de vidrio al ser un material anisotrópico, como lo es la impresión 3D,

no cuenta en la actualidad con un modelo de alta precisión que permita aproximar su comportamiento al estar bajo las cargas mencionados.



*Figura 10. Comparación de datos experimentales y computacionales de prueba de fatiga.
Fuente: (Hussain, Khan, & Abbas, 2019)*

Las pruebas de flexión se desarrollaron bajo dos condiciones, un lote de especímenes de probetas sin precargas (especímen 1), y el segundo lote con probetas sometidas a fatiga (especímen 2); los resultados obtenidos demostraron que el honeycomb al ser precargado soporta una carga menor, sin embargo, permite una mayor deflexión de la probeta; por otra parte, es evidente que las gráficas presentan un comportamiento variable una vez la carga llega a su punto máximo (Figura 11) (Hussain, Khan, & Abbas, 2019).

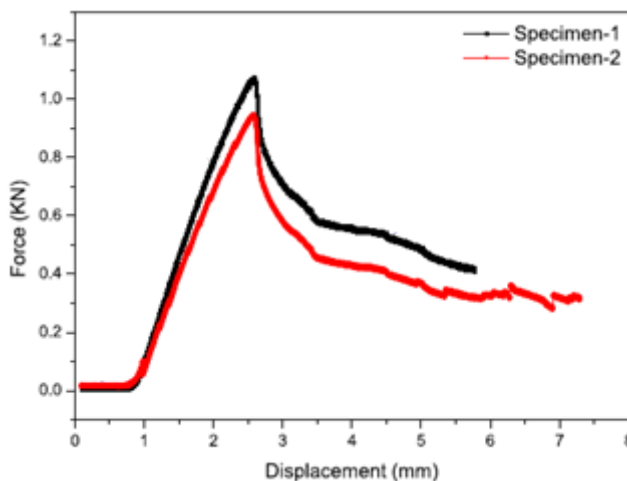
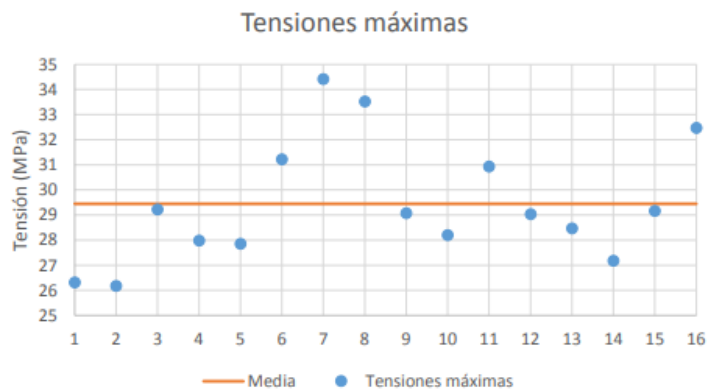


Figura 11. Comparación de especímenes sometidos a cargas de flexión.
Fuente: (Hussain, Khan, & Abbas, 2019)

Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas.

El trabajo de grado realizado en la Universidad Carlos III de Madrid en España por Juan A. Albuquerque quién desarrolló su investigación basándose en los parámetros de impresión que más influencia tienen sobre los elementos fabricados en impresoras 3D como: uso del ventilador, velocidad de impresión, temperatura de la cama de impresión y temperatura del extrusor; con los parámetros críticos indicados se realizó un análisis de diseño de experimentos llegando así a un diseño factorial completo 2^n con un número de cuatro factores obteniendo 16 diferentes combinaciones para así realizar la fabricación de 3 lotes por combinación con el fin de tener repetibilidad en las medidas para concluir con la prueba de 48 especímenes.

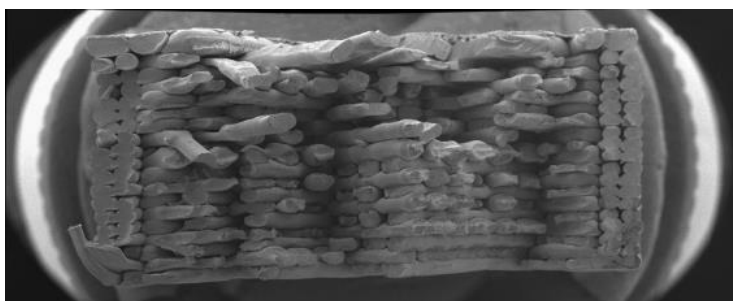
Las probetas sometidas a cargas de tensión presentaron variación en sus deformaciones máximas y en sus tensiones máximas, sin embargo, los módulos de elasticidad de los especímenes no presentaron variaciones considerables en las gráficas presentadas. A continuación, se presenta la gráfica (Figura 12) correspondiente las tensiones máximas obtenidas en las pruebas destructivas (puntos azules), ubicando así la distribución por encima y por debajo de la tensión media calculada (línea naranja).



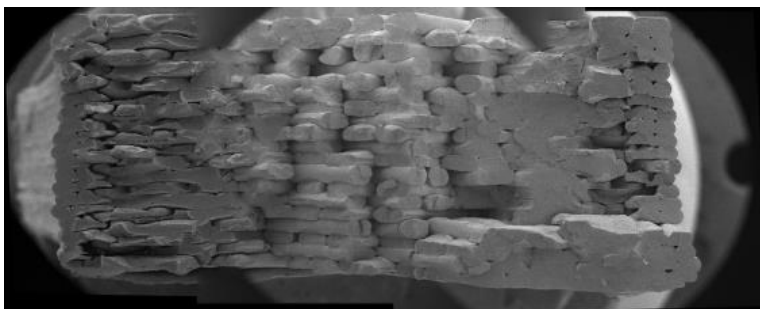
*Figura 12. Gráfica de tensiones máximas.
Fuente: (Albuquerque, 2014)*

Una vez finalizadas las pruebas destructivas a tensión se tomaron dos especímenes para realizar una captura de la microestructura por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM); los especímenes seleccionados fueron aquellos que presentaron mayor y menor resistencia a la tensión.

De la Figura 13 se concluyó que este espécimen presentó menor resistencia a tensión puesto que en la imagen entregada por el microscopio es posible evidenciar que los hilos de impresión están uno encima del otro de forma ordenada dejando así espacios como se observa en el perímetro de la sección transversal de la probeta. En cuanto a la Figura 14 es evidente que el espacio entre hilos es menor y en ciertas secciones se evidencia una estructura más compacta y es por esta razón que la probeta presentó mayor resistencia a la tensión (Albuquerque, 2014).



*Figura 13. Estructura interna de probeta con menor resistencia a tensión.
Fuente: (Albuquerque, 2014)*



*Figura 14. Estructura interna de probeta con mayor resistencia a tensión.
Fuente: (Alburquerque, 2014)*

Caracterización de las propiedades mecánicas de probetas fabricadas bajo la técnica de modelado por deposición fundida.

En la Universidad de San Buenaventura un grupo de estudiantes desarrollaron un proyecto cuyo propósito fue caracterizar las propiedades mecánicas de materiales termoplásticos como el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) sometiéndolo a pruebas de tensión con probetas cuyas capas de impresión fueron orientadas a diferentes ángulos con el fin de comprobar la incidencia de este parámetro de impresión en la resistencia a la tensión de los especímenes.

Los parámetros concernientes a la temperatura de cama y extrusión para la fabricación de las probetas fueron determinados mediante pruebas de impresión para cada material, puesto que el ABS es un material que requiere de una mayor temperatura de fundición (250°C) y de cama (110°C) para lograr una adhesión óptima a comparación del PLA que no requiere de altas temperaturas para lograr su correcta deposición (220°C) y fijación a la superficie de impresión (70°C).

Para lograr el objetivo propuesto de investigación inquirieron las normas que aplican para la realización de pruebas mecánicas a tensión en termoplásticos, llegando así a la normativa ASTM D3039 la cual indica la velocidad de prueba, características de las probetas, y procedimientos a realizar para así obtener las propiedades mecánicas de los materiales analizados.

Durante las pruebas realizadas (Figura 15) se evidenció que la mejor orientación de capas para las probetas sometidas a tensión es $[0^\circ/0^\circ]$ y $[0^\circ/90^\circ]$ para el PLA ya que fue posible con estas dos orientaciones alcanzar los valores más altos de esfuerzo máximo, mayor deformación y el mayor módulo de Young, por otra parte, fue evidente que el ABS es un termoplástico con muy poca resistencia a la tensión, especialmente con orientación de capas de $[90^\circ/90^\circ]$ (Agudelo, y otros, 2019).

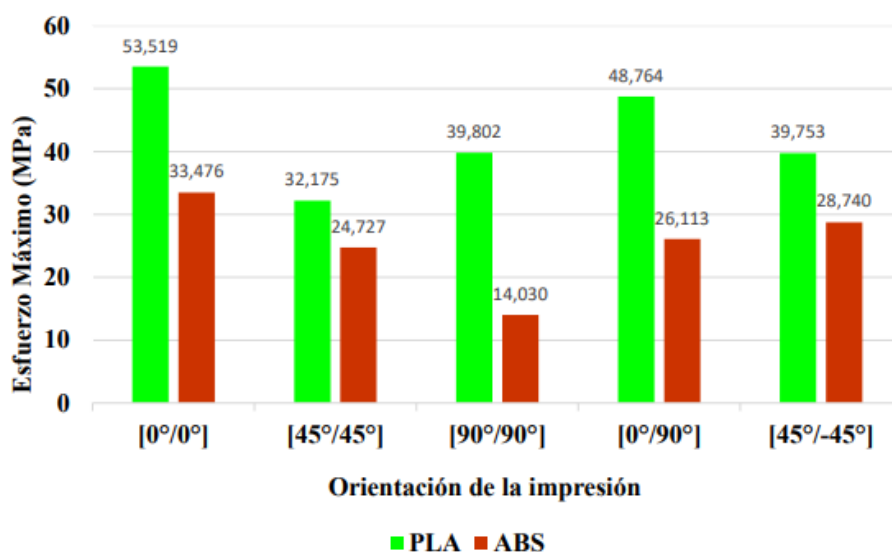


Figura 15. Comparación de resultados obtenidos a tensión de PLA y ABS. (Agudelo, y otros, 2019)

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

Continuando la línea de investigación de la Universidad San Buenaventura, este grupo de estudiantes realizó la investigación del material PLA de la empresa Prusament en esta ocasión sometiéndolo a cargas de compresión basándose en la norma ASTM C365.

La estructura celular empleada para la investigación fue tipo honeycomb hexagonal con dos configuraciones de celda diferentes, 1/4 y 3/8 de pulgada, con el fin de comprobar cuál era la configuración más resistente durante las pruebas con cargas de compresión. El número de especímenes se determinó basándose en la normativa anteriormente

mencionada, fabricando así siete probetas para cada una de las configuraciones y realizar 14 pruebas en total.

Durante las pruebas destructivas (Figura 16) se evidenció que las probetas del lote B (1/4") presentaron valores más altos de esfuerzo de compresión a comparación de la configuración de 3/8", sin embargo, las deformaciones para los dos casos fueron similares.

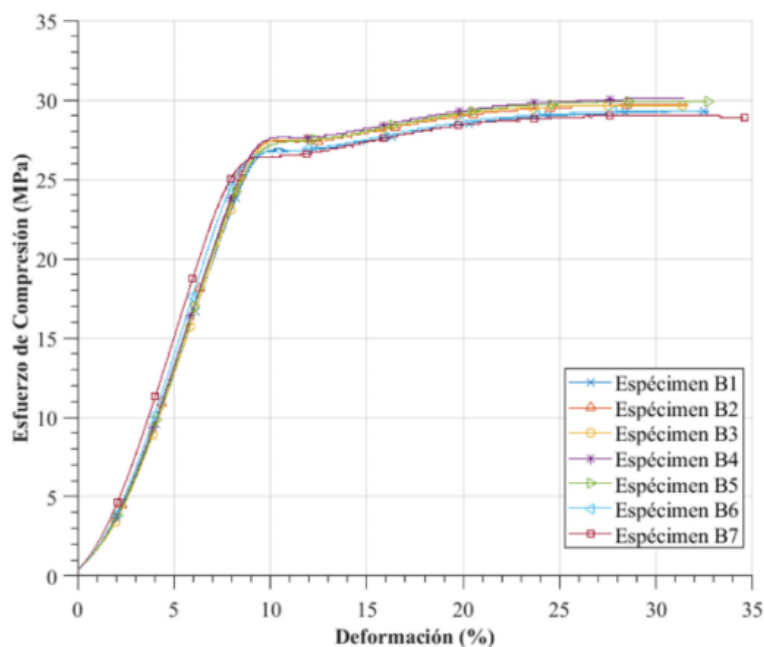


Figura 16. Resultados de pruebas a compresión con núcleo de 1/4".
Fuente: (Agudelo, Merchan, Nieto, & Rodríguez, 2019)

Por otra parte, en este trabajo de investigación se destaca una de las propiedades más importantes en estructuras celulares sometidas a cargas y es el comportamiento de las paredes debido a la aplicación de una carga unidireccional (*out-of-plane*) ya que en estos casos los valores de módulo de elasticidad y esfuerzos son más grandes que las estructuras celulares cargadas en el plano (*in-plane*) puesto que el comportamiento de las paredes de las celdas no será análogo como sucede con las cargas *out-of-plane*.

Finalmente, se concluyó que la manufactura aditiva tiene un gran potencial para aplicaciones aeroespaciales, sin embargo, es necesario tener en cuenta múltiples factores que pueden afectar las piezas fabricadas como: temperatura del extrusor, temperatura de la

superficie de impresión, altura entre capas y velocidad de desplazamiento del extrusor (Agudelo, Merchan, Nieto, & Rodríguez, 2019).

Mechanical Property Optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives.

En la Universidad Central de Florida en Orlando, estudiantes pertenecientes al programa de ingeniería aeroespacial desarrollaron una investigación enfocada en las propiedades a torsión de especímenes fabricados mediante impresión 3D y posteriormente sometidos a tratamientos térmicos.

Para la fabricación de las probetas se tuvieron en cuenta dos parámetros considerados críticos (espesor de capa y porcentaje de relleno) debido a que los resultados se podrían ver drásticamente afectados variando los mencionados y son los dos parámetros más importantes para realizar optimizaciones relacionadas a la fuerza y capacidad de soportarla en las probetas.

En cuanto a las probetas sometidas a temperatura post-fabricación se fabricaron siete lotes ya que se probaron diferentes tiempos (5, 10, 20, 30, 40, 50 y 60 minutos) a 100°C en dónde se evidenció que los efectos del recocido se empezaban a evidenciar en los tiempos mayores a 20 minutos, asimismo se determinó con los tratamientos térmicos que después de someter las probetas por 10 minutos a 100°C se inicia un proceso de cristalización en termoplástico.

Por último, de la investigación se concluyó que la ductilidad se ve drásticamente afectada a causa de los tratamientos térmicos especialmente en los lotes expuestos a más de 20 minutos de temperatura, al igual que la resistencia de los especímenes ya que estos se fracturan antes de llegar a la región de deformación plástica en las curvas de esfuerzo vs. deformación y esfuerzo cortante vs. deformación cortante (Torres, Cotelo, Karl, & Gordon, 2015).

2.2. Descripción y formulación del problema.

Durante la última década, el auge de la impresión 3D se ha presenciado en Europa, Asia y América debido al impacto económico y tecnológico que trae consigo la idea de modelar una pieza y fabricarla en casa en un par de horas ofreciendo una amplia gama de materiales, siendo los termoplásticos la principal opción, sin embargo, se han venido desarrollando cerámicos, compuestos entre madera y plástico, materiales solubles, metales e incluso materiales alimenticios (Simplify3D, 2018).

Múltiples marcas dedicadas a la producción de impresoras 3D han logrado un alto posicionamiento en el mercado, y un claro ejemplo de ello es la empresa checa Prusa, que en diez años de servicio ha logrado llegar a 190 países, vender alrededor de 40.000 impresoras al año, ganar más de 11 premios, permitiendo a miles de personas acceder a un proceso de manufactura de alta calidad (Prusa, 2018).

Debido a la variedad de materiales y aplicaciones, la impresión 3D empieza a tomar protagonismo en campos como la medicina, con el desarrollo de prótesis para humanos y animales, en la arquitectura con la construcción de edificaciones, elementos mecánicos y estructuras, y especialmente en el campo aeronáutico con el desarrollo de estructuras optimizadas en cuanto a peso y tiempo de fabricación; por tal razón es pertinente iniciar el análisis de uno de los materiales más usados en estas máquinas, puesto que en algunos casos, el material empleado para la fabricación de elementos, puede no ser el adecuado y debido a que es una tecnología relativamente nueva, es evidente una brecha del conocimiento en cuanto a la escasa información y análisis confiables que se encuentran en referentes bibliográficos y recursos electrónicos. Este auge de la tecnología, sumado a la trayectoria en la Universidad en la fabricación y prueba de estructuras bajo cargas de tensión y de compresión, motivan al presente grupo a dar respuesta a la pregunta ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de estructuras celulares tipo honeycomb fabricadas bajo técnicas de manufactura aditiva y sujetas a cargas de flexión?

2.3. Objetivos

Objetivo general.

Determinar las propiedades mecánicas de estructuras celulares tipo sándwich con núcleo en honeycomb desarrolladas mediante técnicas de manufactura aditiva y sometidas a una carga de flexión.

Objetivos específicos.

- Establecer las propiedades mecánicas de una estructura celular sometida a una carga de flexión.
- Establecer las propiedades mecánicas de una estructura celular reforzada con fibra de carbono sometida a una carga de flexión.
- Determinar un procedimiento de fabricación de estructuras tipo sándwich con un núcleo fabricado mediante técnica de manufactura aditiva y reforzado en materiales compuestos.

2.4. Alcances y limitaciones.

Alcances del proyecto.

- La técnica de manufactura aditiva es modelado por deposición fundida FDM.
- Las estructuras celulares diseñadas y fabricadas durante el desarrollo del proyecto, serán tipo honeycomb hexagonal.
- El material que se utilizará para fabricar el núcleo de las probetas es ácido poliláctico (PLA) del proveedor Prusa.
- Para la fabricación de las probetas se utilizará la impresora 3D MakerGear M2 REV E y el software Simplify3D para la generación del código de impresión.
- Se realizarán pruebas destructivas a flexión de tres puntos de apoyo, basadas en la norma ASTM D393.

- El número de probetas se determinará empleando un diseño de experimentos de la forma 2^n .
- Las variables a tener en cuenta para determinar el número de las probetas fabricadas completamente en ácido poliláctico son:
 - Temperatura de extrusión.
 - Temperatura de cama.
 - Altura de capa.
- Las variables a tener en cuenta para determinar el número de las probetas fabricadas con núcleo en ácido poliláctico y laminados en fibra de carbono son:
 - Relación volumétrica.
 - Temperatura de curado.
 - Humedad relativa.
- Las pruebas destructivas se realizarán en una máquina universal de ensayos que permita obtener el comportamiento mecánico de las probetas durante la aplicación de la carga de flexión.
- Las propiedades de cada probeta que serán determinadas son:
 - Masa de la probeta.
 - Esfuerzo cortante último del núcleo.
 - Esfuerzo cortante de fluencia del núcleo.
 - Esfuerzo en la cara.
- Redacción de artículo científico publicable.

Limitaciones del proyecto.

- Las dimensiones de las probetas serán determinadas acordes a la norma ASTM D393.
- Las probetas construidas únicamente en material termoplástico se fabricarán bajo dos configuraciones celulares descritas en el desarrollo de este documento.

- Las probetas construidas en material termoplástico y reforzadas en material compuesto se fabricarán bajo dos configuraciones celulares descritas en el desarrollo de este documento.
- La configuración geométrica de las probetas dependerá de las características técnicas de la impresora y de las herramientas disponibles en el software para la generación de códigos de la impresora.
- Los procedimientos a seguir y la cantidad de probetas requeridas para cada ensayo se establecerán a partir de la norma ASTM C393.
- Se evaluará el comportamiento mecánico de cuatro conjuntos de probetas: dos fabricadas completamente en material termoplástico y dos con un núcleo fabricado en material termoplástico y caras superior e inferior en materiales compuestos. Los lotes uno y dos, fabricados completamente en material termoplástico tendrán configuraciones celulares diferentes. Los lotes tres y cuatro compartirán la configuración celular con los lotes uno y dos respectivamente e incluirán las caras laminadas en material compuesto.
- No se realizarán análisis computacionales de elementos finitos para ninguna de las probetas en PLA de estructuras celulares.
- El material compuesto de refuerzo se utilizará para la fabricación de las caras superior e inferior de las probetas.
- Únicamente se utilizará laminados fabricados en fibra de carbono bidireccional y resina epóxica. El espesor de las caras se determinará de acuerdo con la normativa descrita en el documento.
- Se utilizará fibra de carbono bidireccional y resina epóxica de las referencias disponibles en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.
- Únicamente se utilizará una configuración de refuerzo en material compuesto del laminado con orientación $[45^{\circ}/-45^{\circ}]$.
- La técnica de fabricación de los laminados en fibra de carbono y resina epoxica será pre impregnado

- El proyecto se centrará en determinar las características de las configuraciones celulares seleccionadas y no en la configuración de los parámetros de la impresión.
- No se incluirán análisis de las propiedades térmicas del material PLA durante su proceso de fabricación.
- Los ensayos mecánicos se enfocarán solo a pruebas de flexión sobre las diferentes configuraciones del núcleo manufacturadas.
- Solo se realizarán pruebas de flexión a tres puntos dado los recursos que tiene la máquina de ensayos de la Universidad de San Buenaventura.
- Las pruebas mecánicas destructivas se realizarán conforme a la norma ASTM C393.
- No se realizarán cálculos teóricos, ni simulaciones para determinar el comportamiento mecánico de las probetas. Para tal fin, se aplicará los procedimientos de manipulación de datos descritos en la norma ASTM 393.
- Las pruebas a desarrollar se basarán en los métodos estandarizados incluidos en la norma ASTM C393 y no surgirán como resultado de procedimiento de diseño de experimentos.
- No se desarrollarán pruebas relacionadas al pegamento empleado en el laminado de las probetas. Su selección se basará en referentes bibliográficos y experimentos similares realizados. El pegamento a usar será Scotch-Weld DP420.
- Debido a la infraestructura disponible en el salón de materiales compuestos de la Universidad, no se controlan variables de humedad, presión y temperatura. Este limitante agregara variabilidad a los resultados que se obtendrán.

3. Marco teórico y conceptual.

En esta sección se presentan los conceptos y la teoría de importancia sobre la cual se desarrolla el proyecto de investigación incluyendo normativa, herramientas y máquinas empleadas para el cumplimiento del objetivo.

3.1. Manufactura aditiva.

Conocida como AM por sus siglas en inglés (additive manufacturing) es un método de producción que actualmente está tomando popularidad en múltiples industrias como: industria mecánica, aeronáutica, deporte y de la salud, debido a su fácil acceso y simplicidad de uso.

El principio de esta técnica de manufactura es el conformado de objetos tridimensionales previamente digitalizados, empleando diferentes materiales, generalmente termoplásticos que son fundidos y extruidos capa a capa hasta lograr la geometría deseada.

Desde 1987 cuando la empresa norteamericana 3D Systems lanzó al mercado su primer sistema de manufactura aditiva el interés por esta tecnología no ha decrecido; las investigaciones y desarrollos de esta tecnología han aumentado de manera tal que actualmente múltiples ciudades de Norte América y Europa han presentado significantes incrementos en su economía logrando así \$5.165 billones de dólares en 2015 relacionados a productos y servicios concernientes a la manufactura aditiva (Rainer Christoph, 2016).

El impacto de esta tecnología en la industria aeronáutica ha empezado a dar frutos, puesto que actualmente la empresa General Electric cuenta con un departamento llamado “Center for Additive Technology Advancement” o CATA, el cual ya desarrolló su primer componente en impresión 3D implementado en los motores; se trata de una boquilla de inyección de combustible que anteriormente era fabricada por técnicas convencionales y compuesta por 20 componentes, sin embargo, el componente fabricado mediante manufactura aditiva permite la fabricación de la boquilla en una única pieza y con 25% menos de peso, reduciendo así inventario en almacenes (Kover, 2018).

La manufactura aditiva es empleada en este trabajo de investigación para la fabricación de los especímenes a analizar para así mediante procesos estandarizados lograr determinar las propiedades del material empleado y la viabilidad de la impresión 3D en aplicaciones aeronáuticas.

3.2. Termoplásticos.

Los materiales termoplásticos son aquellos materiales plásticos que a una cierta temperatura tienden a ser maleables, estos materiales cumplen un proceso de producción industrial en el cual son llevados a una temperatura lo suficientemente alta para que el plástico pueda obtener una geometría especial para cada uso según su futura aplicación.

Este tipo de materiales tienden a ser cadenas de polímero de alto peso molecular, las cadenas con las cuales están unidos los polímeros se obtienen por medio de fuerzas tales como, fuerza de Van der Waals, enlaces de hidrogeno e interacciones de polímeros dipolo-dipolo; lo que le da una buena plasticidad luego de enfriarse y una buena resistencia a la deformación (Juárez, Balart, Peydró, & Ferrándiz, 2012).

Entre los polímeros existen dos tipos, los termoplásticos y los termoestables, su mayor diferencia radica en su estructura molecular, para los termoestables conforman una macromolécula de enlaces equivalentes lo que hace que este material sea mucho más resistente que los termoplásticos, a su vez una gran desventaja que poseen a diferencia de los termoplásticos, radica en que los termoestables una vez fundidos y moldeados al enfriarse no pueden ser reutilizables; los termoplásticos si pueden ser reutilizados para otro tipo de procesos o incluso para conformar nuevos artículos (Muedra & Segovia López, 2015).

En cuanto a aplicación de los termoplásticos en la impresión 3D, se tiene el método FDM (*Fused Deposition Modeling*) por sus siglas en inglés, este proceso principalmente radica en que el termoplástico está dispuesto a manera de filamento en un carrete, que luego será fundido y extruido constituyendo una determinada geometría o estructura al enfriarse, gracias a las características de los termoplásticos es el material con más uso en este tipo de tecnología emergente (Costa, Duarte, & Covas, 2014).

3.3. Estructuras celulares.

Las estructuras celulares han sido usadas en diferentes frentes de investigación e industria en las últimas décadas, ya que este tipo de configuraciones ayuda a la estructura a ser capaz de soportar cargas y esfuerzos de una manera más efectiva, lo que lleva al material a disminuir el riesgo de sufrir grietas o rupturas por fatiga, además de esto al tener estructuras celulares se opta por una disminución del peso de las maquinas o componentes, disminuyendo precios de producción o de operación (Li, Meisel, Williams, Batra, & Druschitz, 2015).

En el ámbito de la impresión 3D, existen varios tipos de relleno o estructura celular en la cual puede ser variada la densidad en cada uno, cada estructura celular tiende a tener un balance entre peso, tiempo de impresión y resistencia; existen tres tipos de estructura celular usados en la impresión 3D: cuadrados, triángulos equiláteros y hexágonos; a partir de estos tres tipos de estructura el científico Thomas Callister en 1998, prueba las tres configuraciones además de concluir que a la estructura celular hexagonal en comparación a las otras dos, gasta menos material en su producción como también una mejor distribución de las cargas aplicadas (Baich, Manogharan, & Marie, 2015).

3.4. PLA.

El ácido Poliláctico o su acrónimo PLA, es un polímero en el cual su estructura interna está hecha a partir de ácido láctico, este termoplástico tiene la particularidad de que es un material degradable el cual puede ser reutilizado para otro tipo de proceso industrial, normalmente este material es degradado fácilmente con oxido de carbono o agua.

Su producción es de carácter natural, es obtenido a partir de almidón de maíz, caña de azúcar o almidón de yuca. Es uno de los materiales más utilizados para la producción de máquinas de impresión 3D puesto que es muy estable en cuanto a las temperaturas de disposición y enfriamiento para así obtener piezas consistentes (Ryan, Espera, Chen, & Advincula, 2018).

3.5. Materiales compuestos de matriz polimérica.

Actualmente múltiples industrias y en especial la aeroespacial buscan reducciones en el peso de componentes y estructuras con el fin de optimizar las aeronaves y así cubrir una mayor distancia con una menor cantidad de combustible.

Los materiales tradicionales como los metales, aceros y diferentes aleaciones con los avances tecnológicos han empezado a ser sustituidos, sin embargo, aún no se cuenta con algún material compuesto que esté en capacidad de reemplazar por completo un metal ofreciendo las mismas propiedades y características; sin embargo los materiales compuestos de matriz polimérica tienen un amplio campo de uso en diferentes industrias a nivel mundial, gracias a sus propiedades son de uso práctico generando confiabilidad donde es usada (Xiong, Ma, Pan, Papadopoulos, & Vaziri, 2012).

3.6. Norma ASTM C 393.

American Society for Testing and Materials por sus siglas en inglés corresponde a la entidad internacional encargada de publicar normas técnicas de productos, sistemas, procedimientos estandarizados y materiales; actualmente existen aproximadamente 12575 normas que son utilizadas a nivel mundial para certificar materiales o realizar procedimientos de pruebas o investigación (ASTM, ASTM, 2018).

Esta entidad nace como respuesta a un control de calidad estandarizado el cual sea válido en cualquier parte del mundo; por lo anterior y para este trabajo de investigación relacionado con pruebas de flexión a tres puntos para estructuras tipo sándwich, la norma que se ajusta a esta necesidad es la C393; en esta norma se encuentra el tipo de prueba a realizar para un ensayo de flexión, los requerimientos mínimos de dimensión de especímenes, a su vez el tipo de configuración del mismo, en este caso una configuración tipo sándwich.

Los equipos que deben ser empleados para la ejecución y validez del ensayo de flexión junto con el procedimiento pertinente una vez son realizadas las pruebas destructivas también está contenido en la norma para así garantizar una validez científica del ensayo

desarrollado (ASTM, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016).

Las propiedades obtenidas al realizar las pruebas destructivas cumpliendo con las indicaciones y procedimientos estipulados en la norma son: esfuerzo cortante último del núcleo, esfuerzo cortante de fluencia del núcleo y esfuerzo en la cara del espécimen; para documentar lo sucedido con los especímenes durante las pruebas destructivas la norma C393 plantea la Tabla 1. Códigos de identificación de fallos en probetas. Fuente: ASTM C393/C393M-16 de este documento en la cual se indica la nomenclatura para describir el tipo de falla, el área de falla y la ubicación de la falla de cada una de las probetas.

Tabla 1. Códigos de identificación de fallos en probetas.
Fuente: ASTM C393/C393M-16

<i>First Character</i>		<i>Second Character</i>		<i>Third Character</i>	
<i>Failure Type</i>	<i>Code</i>	<i>Failure Area</i>	<i>Code</i>	<i>Failure Location</i>	<i>Code</i>
<i>core Crushing</i>	<i>C</i>	<i>At load bar</i>	<i>A</i>	<i>Core</i>	<i>C</i>
<i>skin to core Delamination</i>	<i>D</i>	<i>Gage</i>	<i>G</i>	<i>core-facing bond</i>	<i>A</i>
<i>Facing failure</i>	<i>F</i>	<i>Multiple areas</i>	<i>M</i>	<i>Bottom facing</i>	<i>B</i>
<i>Multi-mode</i>	<i>M(xyz)</i>	<i>Outside gage</i>	<i>O</i>	<i>Top facing</i>	<i>T</i>
<i>transverse Shear</i>	<i>S</i>	<i>Various</i>	<i>V</i>	<i>both Facings</i>	<i>F</i>
<i>eXplosive</i>	<i>X</i>	<i>Unknown</i>	<i>U</i>	<i>Various</i>	<i>V</i>
<i>Other</i>	<i>O</i>			<i>Unknown</i>	<i>U</i>

Por ejemplo, un código C-A-B indica:

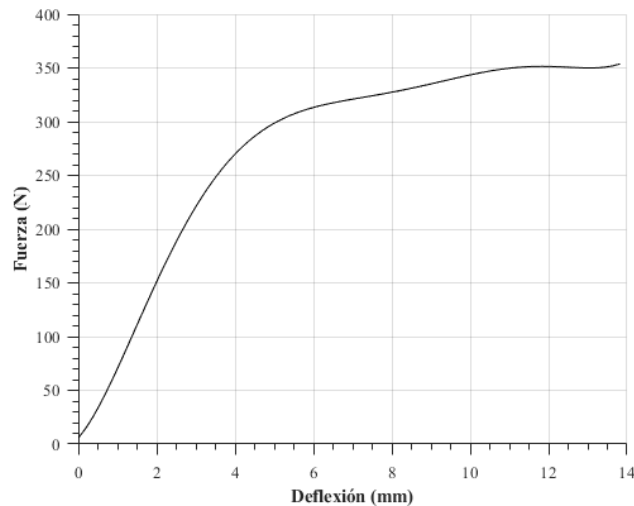
- Primera letra (tipo de falla): aplastamiento del núcleo.
- Segunda letra (área de falla): en la celda de carga.
- Tercera letra (ubicación de falla): en el laminado inferior.

3.7. Esfuerzo de flexión.

La flexión es causada por esfuerzos aplicados de forma perpendicular al eje longitudinal de un elemento que generan momentos en los extremos que tienden a doblar el cuerpo al cual están siendo aplicados los esfuerzos (Rajpurohit & Harshit, 2018).

El esfuerzo de flexión es uno de los fenómenos mecánicos que se presenta con mayor frecuencia y especialmente en la industria aeronáutica, razón por la cual se determinará a partir de una prueba de flexión de tres puntos cuan resistente son los especímenes cuando se le aplica una carga perpendicular el eje longitudinal; para ello se parte con la norma ASTM 393 como referente para calcular las propiedades mecánicas de los especímenes a flexión y así determinar las posibles aplicaciones del material empleado en la fabricación de los mencionados (Luzanin, Guduric, Ristic, & Muhic, 2017).

Para compilar los datos obtenidos durante las pruebas destructivas y calcular las propiedades mecánicas la norma exige la realización de una gráfica fuerza vs. deflexión (Figura 17. Grafica de Fuerza vs. Deflexión. Fuente: Autores.), a partir de la cual se extraerán datos como: fuerza máxima de la prueba, fuerza al 2% de la deflexión máxima y deflexión total.



*Figura 17. Grafica de Fuerza vs. Deflexión.
Fuente: Autores.*

3.8. Diseño Factorial.

Es una técnica de carácter estadístico la cual permite determinar y cuantificar los efectos o variables que se tienen en un estudio experimental; el número de variables define la

complejidad de la experimentación y a partir de ello saber el número de repeticiones pertinentes para demostrar que los datos obtenidos a partir de las pruebas destructivas son confiables (Montgomery, 2004).

En este caso el diseño factorial 2^k es el modelo ideal para descubrir si existe alguna interrelación entre los factores k ; para el caso de este trabajo de investigación se determinó un valor de k igual a tres, fijando así un número de ocho probetas por lote.

Seguido de esto, es necesario desarrollar un diseño de experimentos, el cual toma la desviación estándar de las pruebas realizadas en cada uno de los lotes de probetas para demostrar si el factor k definido inicialmente genera la cantidad de probetas necesarias para obtener como resultado datos con baja probabilidad de rechazo.

4. Metodología.

El proyecto se desarrollará mediante un enfoque empírico analítico; inicialmente se reunirá información relacionada con proyectos similares realizados y se determinará la normativa que permita el correcto desarrollo de las pruebas para determinar las propiedades mecánicas del ácido poliláctico a flexión.

El número de especímenes para desarrollar las pruebas destructivas será determinado por medio de un diseño de experimentos en el cual se determinarán ciertas variables para así satisfacer el modelo factorial mixto.

El proceso de fabricación de las probetas se realizará por el método de manufactura aditiva haciendo uso de los recursos disponibles; los parámetros de impresión serán presentados en el documento. Dos lotes de probetas se fabricarán completamente en PLA, y los dos restantes serán núcleos de PLA reforzados con material compuesto, fibra de carbono para este caso.

Por otra parte, para asegurar una uniformidad en las probetas fabricadas se realizará un control dimensional de cada una de ellas registrando todas sus medidas dimensionales y realizando una inspección visual de las paredes, en caso de no cumplir con alguna de las características o de evidenciar alguna anomalía en el espécimen, este será desechado y se fabricará de nuevo. Una vez fabricadas las probetas, se llevará a cabo la prueba de flexión a tres puntos y se obtendrán las gráficas y tablas de datos para así manipular la información y obtener las propiedades mecánicas del material, cabe resaltar que durante el desarrollo de las pruebas destructivas se capturarán imágenes y videos los cuales evidenciarán el comportamiento de las probetas al estar sometidas a la carga aplicada.

Por último, se presentará un procedimiento de fabricación de probetas por medio de impresión 3D para la realización de pruebas destructivas detallando los pasos y cuidados requeridos para una desarrollar de manera adecuada el procedimiento según la norma.

La organización de la metodología planteada se encuentra compilada en el diagrama de flujo presentado en la Figura 18. Diagrama de flujo de metodología. para mayor claridad de las tareas y procedimientos para el cumplimiento de los objetivos planteados.

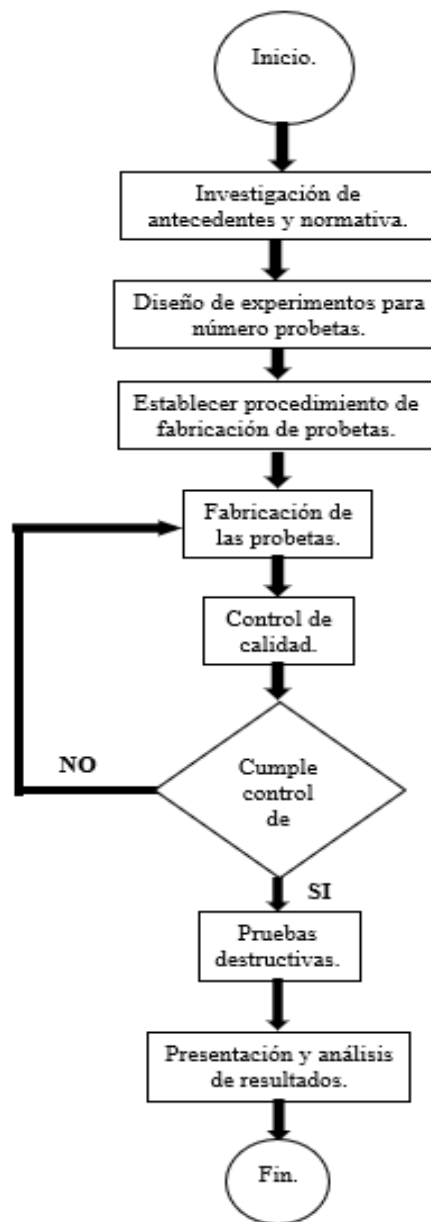


Figura 18. Diagrama de flujo de metodología.

Fuente: Autores.

5. Desarrollo de ingeniería.

En esta sección del documento se encuentra el paso a paso realizado en el trabajo de investigación desde el diseño de las probetas hasta la realización de las pruebas mecánicas para así tener estos procedimientos como referente en futuras replicas del experimento, dando así cumplimiento a la metodología propuesta.

5.1. Proceso de pre-impresión.

5.1.1. Diseño de probetas.

El diseño de los núcleos de las probetas se realizó en OpenSCAD haciendo uso de una herramienta generadora de honeycomb (código incluido en el anexo 1); para el caso de las probetas con diámetro de celda de 6.25mm (1/4”) se generaron 4 filas y 32 columnas, y las de 9.525mm (3/8”) con 3 filas y 22 columnas. Para finalizar el diseño se importaron las geometrías a CATIA para añadir las caras correspondientes a los laminados de las probetas de 1 mm de espesor cada uno.

Las medidas de las probetas satisfacen por completo las ecuaciones indicadas en la norma ASTM C393 en su sección 8.2.3 que son:

$$S \leq \frac{2Q\sigma t}{F_s} + L \quad (1)$$

$$F_s \leq \frac{2Q\sigma t}{(S - L)} \quad (2)$$

En dónde **S** es la separación entre los soportes de la máquina universal de ensayos, **Q** es el factor de fuerza en el laminado (valor recomendado según la normativa 0,75), **σ** es el esfuerzo último estimado en los laminados, **t** es el espesor de los laminados, **F_s** es el valor estimado correspondiente al esfuerzo cortante del núcleo; cabe resaltar que para las pruebas destructivas a flexión de tres puntos el valor de **L** (distancia entre cabezales de aplicación de carga) en los cálculos será igual a cero.

De esta manera, estimando el esfuerzo último en los laminados (σ) con un valor obtenido mediante referentes teóricos de 35MPa y un esfuerzo cortante del núcleo (F_s) de 0,3MPa se logró satisfacer la ecuación (1) llegando a: $150 \leq 175$ [mm].

En cuanto a la ecuación (2), se tiene: $F_s \leq \frac{2*0,75*35*1}{150}$, es decir que $0,3 \leq 0,35$ [MPa], determinado así que las medidas empleadas para el diseño de las probetas son adecuadas y apropiadas para el desarrollo de las pruebas destructivas según ASTM C393.

Ahora bien, una vez demostrada la aceptación de las medidas de las probetas se presentan sus dimensiones geométricas en la siguiente tabla y el plano detallado para cada configuración en el anexo 2:

Tabla 2. Dimensiones generales de los núcleos.

Diámetro de celda [mm]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	
			Núcleos	Probetas laminadas
6,25	200,89	32,07	15	17
9,525	200,37	36,72	15	17

5.2. Impresión de probetas.

5.2.1. Pruebas de impresión.

Una vez listas las geometrías de las probetas en su debido formato (.stl) se procedió a realizar impresiones de prueba para determinar los parámetros de impresión pertinentes para la correcta manufactura de las probetas, el software empleado para modificar los parámetros de impresión y generar el G-code de las probetas fue Simplify 3D en su versión 4.0 (Figura 19. Visualización de la probeta en Simplify 3D.).

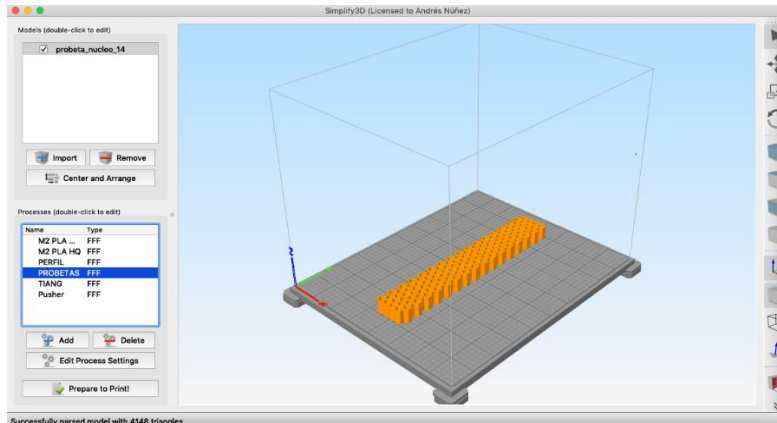


Figura 19. Visualización de la probeta en Simplify 3D.

Fuente: Autores.

Durante las impresiones de prueba se presentó una falla en cuanto a la calidad de impresión conocida como “blobs”, esta falla genera imperfecciones entre las capas y se evidencia en la superficie exterior de la sección de prueba puesto que a lo largo de la pieza es posible observar sobre extrusiones y líneas de resalto en la geometría como se indica en la Figura 20. Evidencia de “blobs” en impresión de prueba. cabe resaltar que para evitar desperdicios del material empleado para la fabricación de las probetas finales, las pruebas de impresión fueron fabricadas con PLA de la misma marca y como lo asegura el fabricante con las mismas condiciones de operación, sin embargo, el color de las impresiones de prueba fue diferente para identificar estas probetas de las probetas a caracterizar.

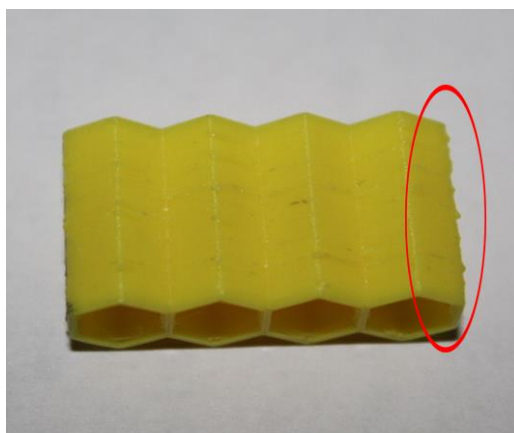


Figura 20. Evidencia de “blobs” en impresión de prueba.

Fuente: Autores

La solución a este problema se llevó a cabo agregando un parámetro de impresión que en el software Simplify3D es conocido como “extra restart distance” cuya función es retraer el filamento una distancia muy pequeña en los bordes que conectan los hexágonos que componen la geometría (honeycomb) para así evitar una deposición de material innecesaria; una vez solucionado ese problema se procedió a configurar los parámetros en Simplify3D, los cuales se evidencian en la Tabla 3. Parámetros generales de impresión de probetas.

Fuente: Autores., varios de los cuales son determinados por el fabricante del filamento (Prusament) como lo son las temperaturas de cama y de extrusión. (Simplify3D, Print Quality Troubleshooting Guide, 2019)

Tabla 3. Parámetros generales de impresión de probetas.

Fuente: Autores.

Parámetro	Valor
Temperatura de Cama	65°C
Temperatura de Extrusión	220°C
Diámetro de Boquilla	0,35mm
Extrusion Multiplier	0,79
Extra Restart Distance	-0,2mm
Infill	100%
Altura de Capa	0,1mm
Velocidad de Impresión	3500mm/min

5.2.2. Impresión de probetas.

La impresión de las probetas se realizó en la máquina MakerGear M2 Rev.E (Figura 21. Impresora 3D MakerGear M2.), fabricada por la empresa estadounidense MakerGear; la

impresora cuenta con unas dimensiones de trabajo de 200x250x200 milímetros (WxDxH), un extrusor de 0,35mm de diámetro y dos tipos de conectividad (vía USB y tarjeta SD).

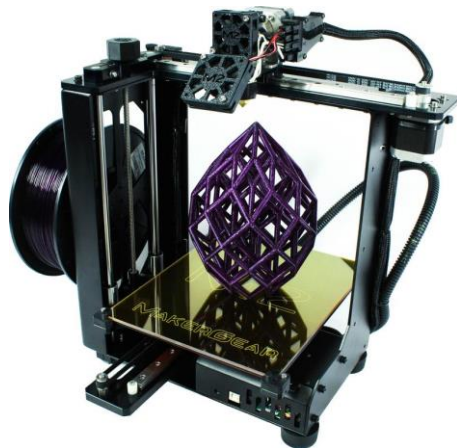


Figura 21. Impresora 3D MakerGear M2.

Fuente: <https://www.makergear.com/products/m2>

Los tiempos de impresión (Tabla 4. Tiempos de impresión de probetas. Fuente: Autores.) fueron medidos de inicio a fin para así llevar un mejor control del proceso de manufactura, al igual que diferentes características de las probetas como su peso y dimensiones generales como se evidencia en las tablas de control dimensional de las probetas fabricadas mediante técnicas de manufactura aditiva (anexo 3).

Tabla 4. Tiempos de impresión de probetas.

Fuente: Autores.

Tipo de Impresión	Diámetro de Celda	Tiempo
Núcleo	1/4"	7 horas 2 minutos
	3/8"	6 horas 8 minutos.
Probeta Laminada	1/4"	8 horas 25 minutos.
	3/8"	7 horas 42 minutos.

5.2.3. Control dimensional de probetas.

Además de los formatos presentados con respecto al control de tiempos y pesos, se realizó control de la cara superior e inferior de cada uno de los especímenes, es decir que se ubicaron las probetas y núcleos en superficies completamente planas y sin inclinación, para

así realizar un procedimiento similar a la nivelación manual de la superficie caliente de las impresoras 3D.

Este procedimiento consistió en desplazar un papel muy delgado alrededor de la probeta y en los casos en los cuales el papel pasó alguna pared de la probeta y entró entre la superficie plana y la superficie plástica (Figura 22. Control de superficies de probetas.), la mencionada se desechó puesto que al no ser completamente plana la cara plástica, el laminado una vez era adherido presentaba espaciamientos que según la norma no son permitidos.

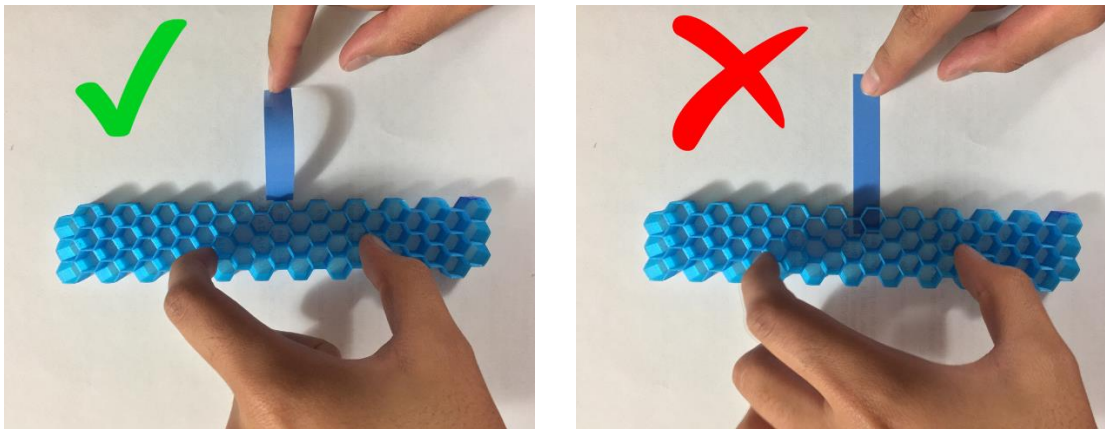


Figura 22. Control de superficies de probetas.

Fuente: Autores.

5.3. Laminados en fibra de carbono.

5.3.1. Diseño de laminados.

Para determinar la cantidad exacta de fibra de carbono y sus medidas requeridas para la fabricación de los laminados fue necesario en primera instancia realizar un plano de corte con las medidas de los laminados y la orientación de las geometrías, obteniendo como resultado la Figura 23. Planos de corte de laminados en materiales compuestos..

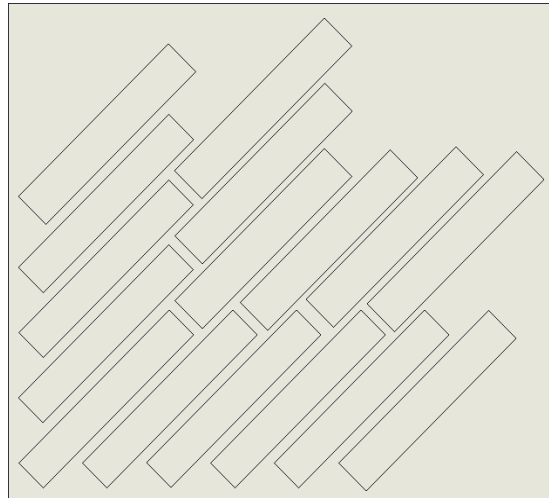


Figura 23. Planos de corte de laminados en materiales compuestos.

Fuente: Autores.

5.3.2. Fabricación de laminados.

La fabricación de los laminados inició midiendo 5 cuadrados de fibra con una medida de 48x55cm para la configuración $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$, esto con el fin de asegurar un espesor final del laminado de 1mm; el corte de la fibra de carbono se realizó empleando cinta de enmascarar en los bordes para así de evitar la deformación del tejido en los extremos cortados (Figura 24. Corte de fibra de carbono.).

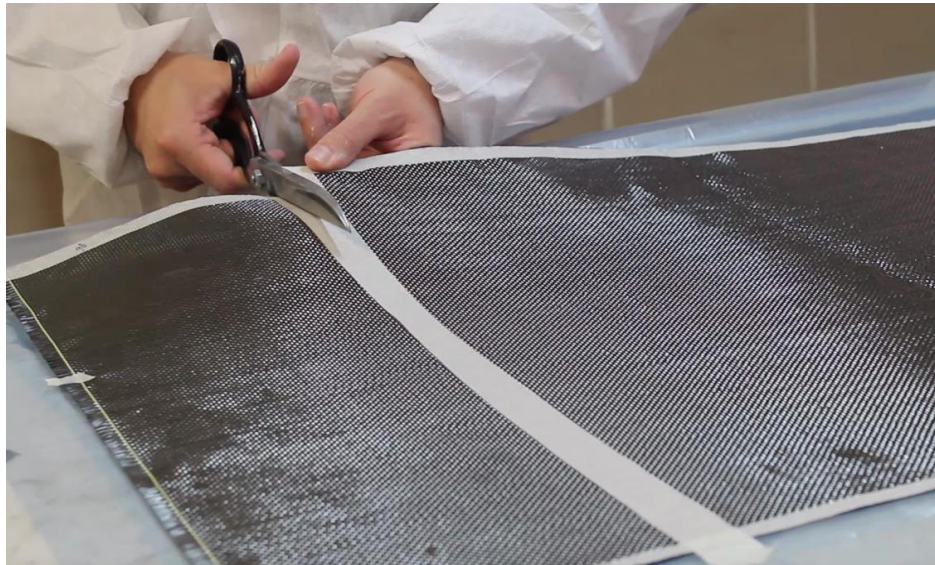


Figura 24. Corte de fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Seguido de esto se continuó con el corte del plástico de pre-impregnado (Figura 25. Corte de plástico de vacío.) con el doble de las medidas de los respectivos cuadrados de fibra de carbono, puesto que su función fue recubrir la fibra para el proceso de impregnado de resina, que se realizó con ayuda de espátulas plásticas que distribuían la resina de las zonas con mayor cantidad a las zonas menos impregnadas para así asegurar una uniformidad de resina a lo largo de todo el tejido.



Figura 25. Corte de plástico de vacío.

Fuente: Autores.

Para definir la cantidad necesaria de resina se pesaron los cuadrados de fibra de carbono cortados anteriormente y se tuvo en cuenta un 6% de pérdida durante el proceso de mezclado (baja lenguas, vaso de mezcla y plástico de vacío) y el pre-impregnado (Figura 26. Pre-impregnado de fibra de carbono.), conformando la mezcla con una relación 100:20 entre la resina y el endurecedor, información general compilada en la Tabla 5. Relación volumétrica de resina y endurecedor.

Fuente: Autores.

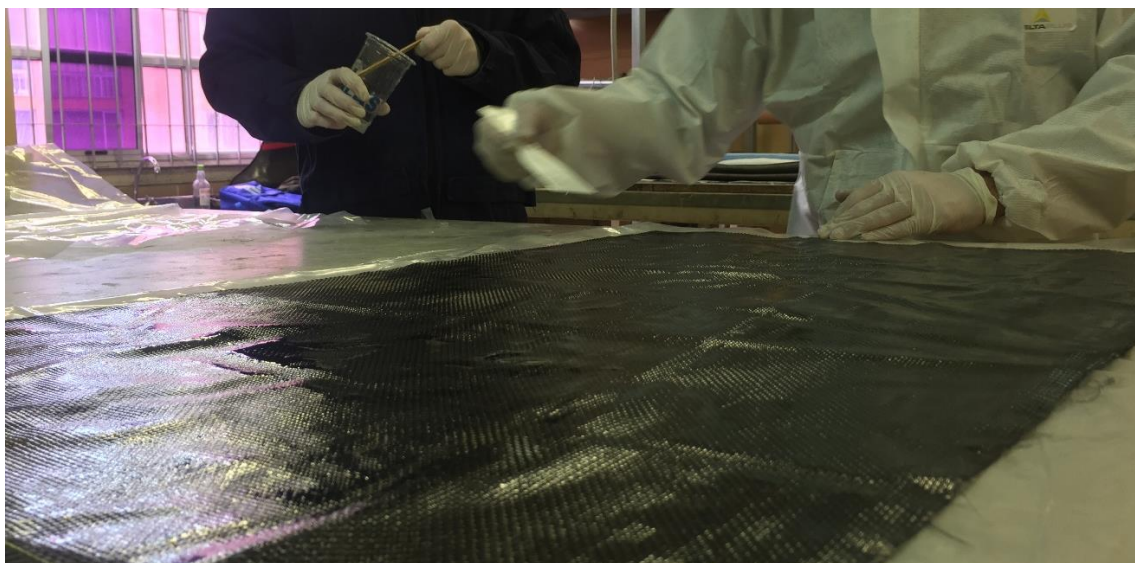


Figura 26. Pre-impregnado de fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Tabla 5. Relación volumétrica de resina y endurecedor.

Fuente: Autores.

Orientación de Laminado	Peso de Fibra [gr]	Resina [gr]	Endurecedor [gr]
[-45°/45°]	312,1	260,1	52

Para el proceso de vacío se empleó un vidrio con 8 centímetros más que los cuadros de fibra de carbono, que previamente fue limpiado. En primera instancia fue necesario aplicar tres capas de cera desmoldante para así evitar una completa adhesión entre la fibra y el vidrio, seguido de este se aplicó una capa uniforme de alcohol polivinílico (Figura 27.

Aplicación de alcohol polivinílico en vidrio.) para crear película aislante y permitir una fácil remoción entre la superficie de vidrio y el laminado de carbono una vez finalizado el proceso de vacío.



Figura 27. Aplicación de alcohol polivinílico en vidrio.

Fuente: Autores.

Una vez lista la superficie del vidrio se rodearon sus bordes con cinta de vacío (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) cuya función fue adherirse al plástico evitando cualquier fuga posible para así lograr un proceso de vacío contante sobre el laminado.



Figura 28. Vidrio con cinta chicle.

Fuente: Autores.

Una vez se ubicaron las fibras impregnadas sobre el vidrio se ubicó un cuadrado de tela pelable “*peel ply*” (tela azul) y uno de guata (tela blanca) como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con su respectivo camino de absorción (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**); la función del *peel ply* fue aislar el laminado impregnado de resina de la guata que absorbía la resina de la fibra durante el proceso de vacío que tomó 7 horas en curado a -40 kPa.



Figura 29. “*peel ply*” (tela azul) y guata (tela blanca).

Fuente: Autores.

Por último, una vez terminado el proceso de curado se procedió a desmoldar el laminado del vidrio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.1**) teniendo precaución puesto que lo ideal es evitar flexionar el laminado durante la remoción del mencionado.



Figura 30. Laminado en proceso de vacío.

Fuente: Autores.

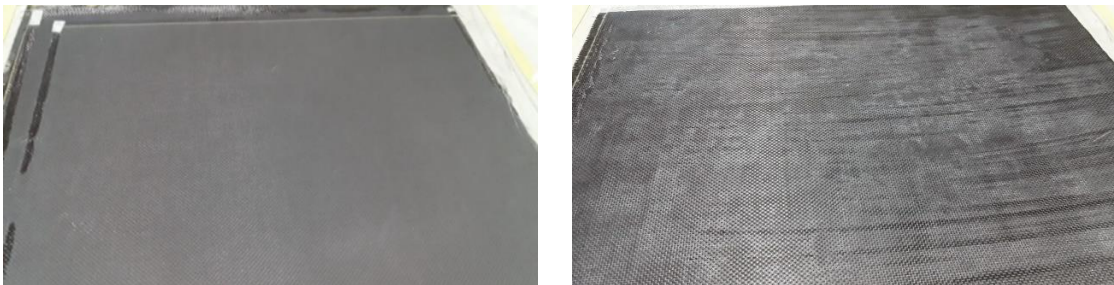


Figura 31. Laminados finales en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

5.3.3. Corte de laminados.

El corte de los laminados de fibra de carbono se realizó con el método de corte por chorro de agua que consiste en ubicar el laminado en una superficie plana mientras se desplaza una boquilla expulsando agua a alta presión siguiendo el patrón de las geometrías diseñadas en el plano de corte (Figura 32. Laminados de probetas cortados.).

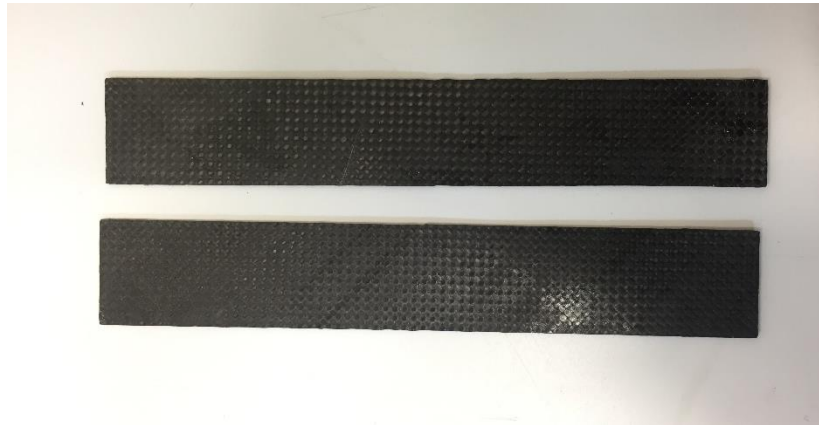


Figura 32. Laminados de probetas cortados.

Fuente: Autores.

Se optó por este método de corte ya que para efectos de precisión y lograr simetría entre los núcleos y los laminados es más eficiente que el corte manual tradicional.

5.3.4. Control dimensional de los laminados.

El proceso relacionado al control dimensional de los laminados (anexo 4) se llevó a cabo empleando un calibrador pie de rey y un micrómetro (Figura 33. Control dimensional de laminados.), el primero de ellos para medir las dimensiones generales de los laminados, es decir, su largo y su ancho, y una vez las medidas coincidían con las deseadas en los núcleos se procedió a usar el micrómetro para asegurar la uniformidad del espesor de 1mm a lo largo de todo el laminado.

El procedimiento de metrología lineal directa realizado con los instrumentos mencionados anteriormente se realizó en diferentes puntos de los núcleos y de los laminados; en cuanto a los núcleos se tomó la medida de ancho y largo en cada una de las celdas que compone

la probeta, y en los lamiados el espesor fue medido en diferentes secciones como se indica en el anexo 3.

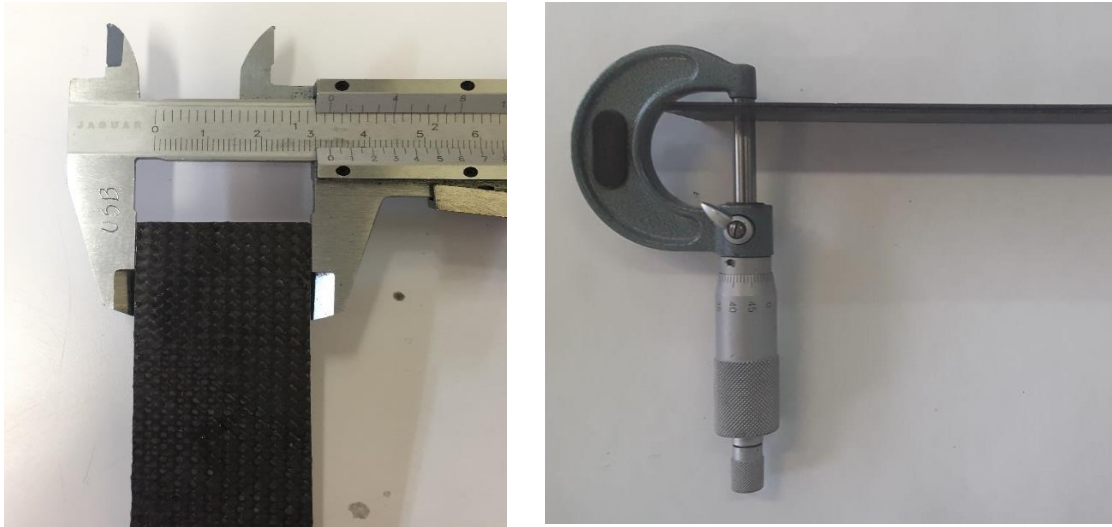


Figura 33. Control dimensional de laminados.

Fuente: Autores.

5.4. Adhesión de los núcleos a los laminados.

Para este proceso se realizó una investigación de los pegamentos empleados para la fibra de carbono y como resultado se encontró que el Scotch-Weld DP 420 es ideal para la fibra de carbono sin degradar o afectar el plástico, además de esto fue necesario tener en cuenta las especificaciones indicadas en el *datasheet* del pegamento como el tiempo de curado, y sus proporciones de mezcla para asegurar las propiedades del pegamento.



Figura 34. Pegamento epóxico Scotch-Weld DP 420.

Fuente: <https://multimedia.3m.com/mws/media/669980/3m-scotch-weld-epoxy-adhesive-dp420-dp420-ns-dp420-lh.pdf>.

5.4.1. Ensayo de adherencia.

Con el fin de determinar los cuidados requeridos y la efectividad del pegamento, se realizó un ensayo con dos laminados de prueba y un núcleo; este consistió en realizar el procedimiento tal cual se ejecutaría en caso de estar pegando los núcleos y laminados reales con las mismas condiciones de mezclado y de curado, con el fin de evidenciar las posibles fallas o eventualidades que se podrían presentar durante el proceso de adherencia con las probetas a caracterizar.

En este proceso de prueba se determinó mediante el *datasheet* del pegamento que uno de los factores más importantes era el control de temperatura y para una mayor precisión al momento de adherir los laminados debía realizarse el proceso en dos etapas, la primera de ellas para adherir los laminados inferiores y la segunda de ella para la cara restante puesto que al momento de hacer todo el proceso en una sola etapa los laminados tendrían a desplazarse perdiendo simetría con los núcleos.

Los tiempos de curado del pegamento están indicados en la Tabla 6. Temperatura de curado y tiempo en cámara de calor para el pegamento Scotch-Weld DP420. del documento, extraída del *datasheet* del pegamento realizado por la compañía 3M en la que se relaciona el tiempo la cámara de calor en la con la temperatura de curado (3M Scotch-Weld, 2019).

Tabla 6. Temperatura de curado y tiempo en cámara de calor para el pegamento Scotch-Weld DP420.

Fuente: (3M Scotch-Weld, 2019)

Tiempo en cámara de calor	Temperatura de curado		
	73°F (23°C)	122°F (50°C)	140°F (60°C)
15 min.	-	-	3200
30	-	2300	-
60	-	4700	4700
2 hr.	300		
3	800		
5	3000		
6	3700		
24	4500		

5.4.2. Adherencia de laminados.

Para iniciar la adhesión de todos los laminados con sus respectivos núcleos, en primera instancia se realizó una limpieza de los laminados con un paño seco con el fin de remover posibles suciedades en la cara a adherir, sin embargo, a los núcleos al no se les efectuó ningún proceso de limpieza debido a que estuvieron almacenados en cajas de cierre hermético hasta el proceso de adherencia; seguido de esto se realizó la mezcla del pegamento epóxico y finalmente se aplicó una capa uniforme en los laminados por la cara menos rugosa, puesto que de esta manera se aseguraba una mejor adherencia entre el núcleo de PLA y el laminado en fibra de carbono debido a que las superficies superior e inferior del honeycomb entraban en completo contacto con el laminado sin presentar espaciamentos entre las superficies.

Para el curado del pegamento se llevaron las probetas a una cámara de calor (Binder E28) puesto que en este dispositivo era más preciso el control de temperatura; allí se fijó una temperatura de 50°C y las probetas permanecieron una hora como se indica en la Tabla 6. Temperatura de curado y tiempo en cámara de calor para el pegamento Scotch-Weld DP420. para así lograr un mejor curado del pegamento; una vez finalizado el tiempo de curado se dejaron los especímenes dentro de la cámara hasta que la temperatura del horno llegó aproximadamente a la temperatura ambiente. Sin embargo, al momento de curar las probetas se generó una pregunta en el desarrollo de la investigación, puesto que los núcleos al estar sometidos a una temperatura alta después de ser fabricados podrían llegar a alterarse las propiedades mecánicas del material, por tal razón al momento de introducir los núcleos a la cámara de calor se incluyeron seis probetas más de control (Figura 35. Núcleos y probetas previos a la entrada a la cámara de calor.) para determinar la influencia de la temperatura durante el proceso de curado en las propiedades mecánicas de las probetas.

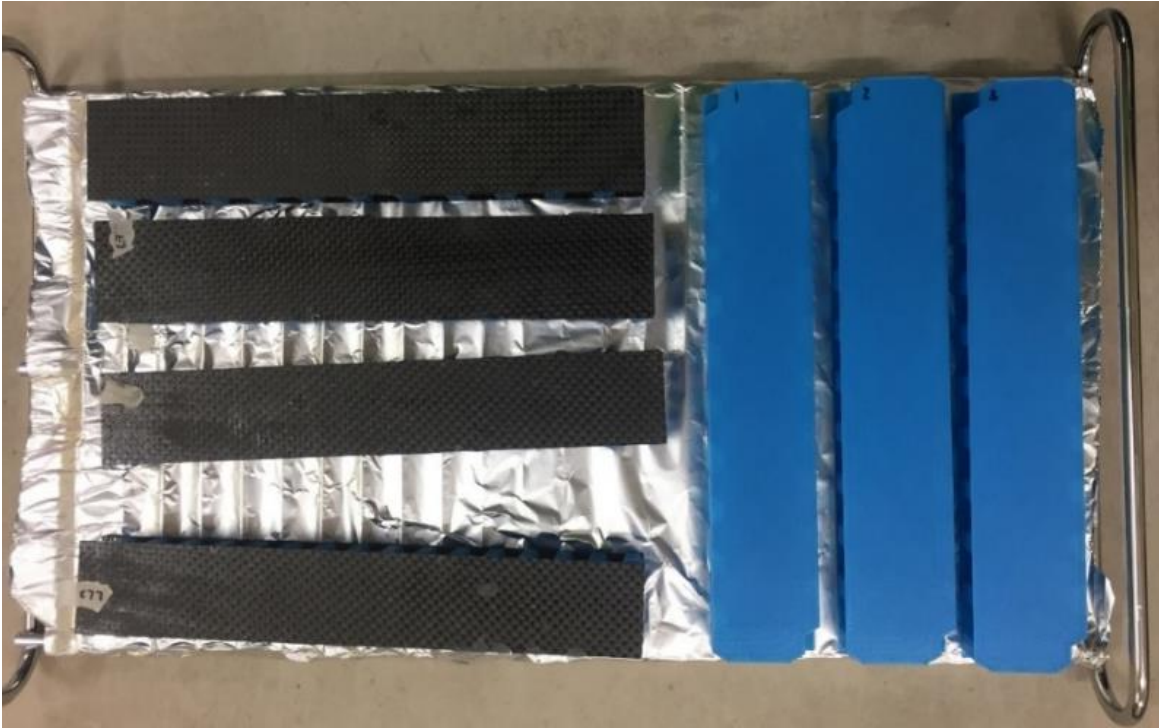


Figura 35. Núcleos y probetas previos a la entrada a la cámara de calor.

Fuente: Autores.

Para llevar un mejor control de la temperatura del horno se determinó la curva tanto de calentamiento como de enfriamiento con el fin de determinar los tiempos de cada etapa del proceso de curado de las probetas, obteniendo así un tiempo de 20 minutos para lograr alcanzar la temperatura sugerida por el fabricante del pegamento para el curado de 50 °C (Figura 36. Curva de calentamiento Binder E28.) dentro del horno permitiendo así el inicio del proceso de curado que tardó un tiempo total de 310 minutos incluyendo los 60 minutos de curado la cámara de calor y los 230 minutos de enfriamiento (Figura 37. Curva de enfriamiento Binder E28).

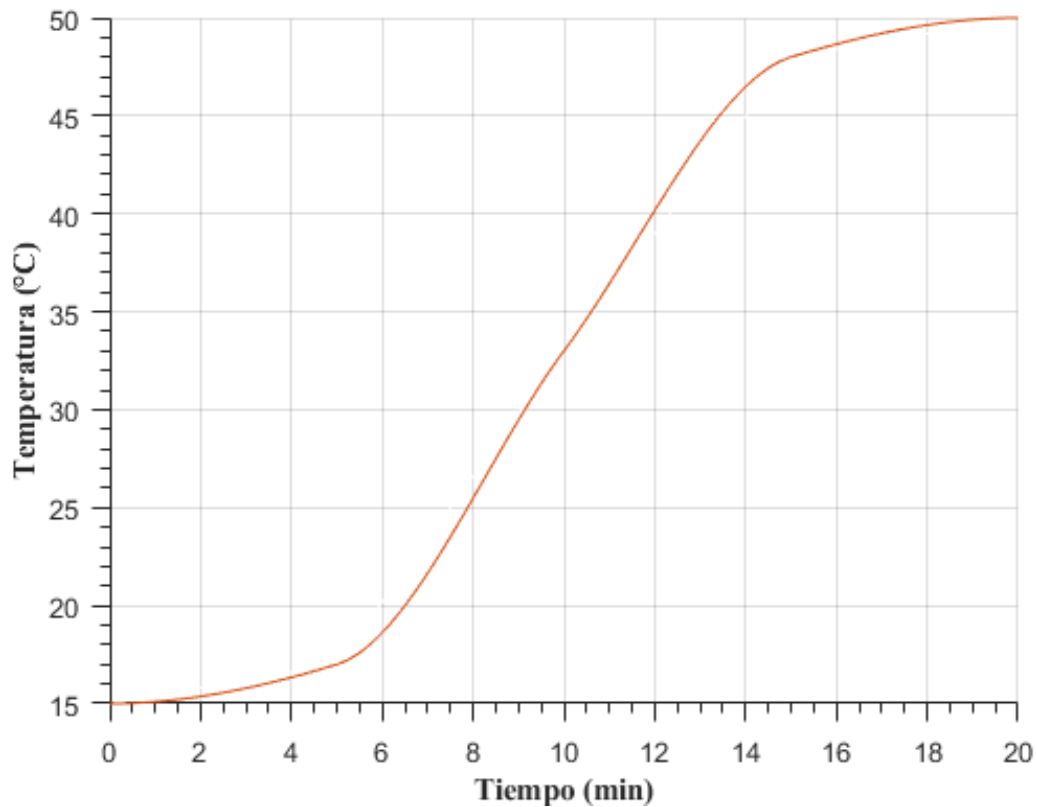


Figura 36. Curva de calentamiento Binder E28.

Fuente: Autores.

Durante el proceso de enfriamiento (Figura 37. Curva de enfriamiento Binder E28.) se evidenció que la temperatura del horno lo igualaba la temperatura inicial de la curva de calentamiento (Figura 36. Curva de calentamiento Binder E28.), sin embargo, al ser tan pequeña la diferencia entre la temperatura ambiente (22°C) y la de la cámara de calor (23°C) se optó por despreciar cualquier fenómeno que pueda afectar las propiedades mecánicas de los especímenes, finalizando así el proceso de curado con la extracción de las probetas de la cámara de calor.

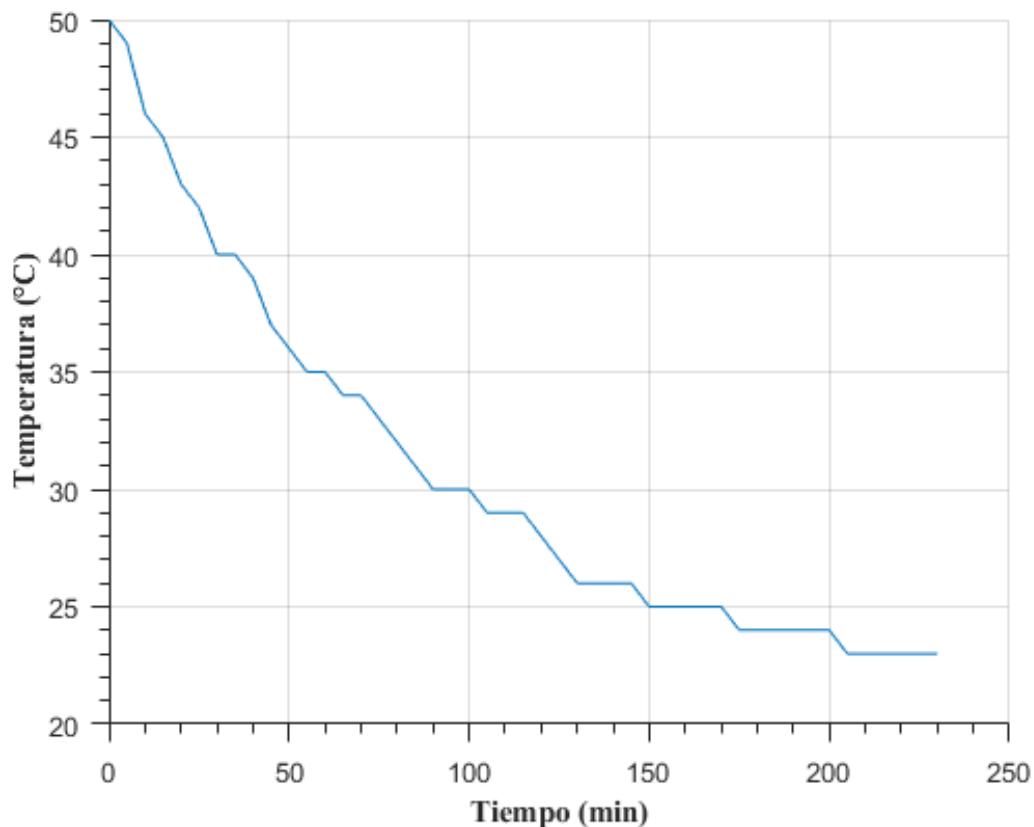


Figura 37. Curva de enfriamiento Binder E28.

Fuente: Autores.

A la cámara de calor en total fueron llevados dos lotes de probetas, el primero de ellos con seis probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA, y el segundo lote con cinco núcleos de 3/8" con laminados orientados a $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$. El primer lote de probetas laminadas culminó satisfactoriamente el proceso de temperatura post-fabricación al interior del horno, por el contrario, el segundo lote presentó un problema considerable al finalizar el tiempo de curado de las probetas.

La falla en las probetas del segundo lote consistía en una deformación del núcleo que no permitía la adhesión del laminado con el núcleo (Figura 38. Deformación de probetas en cámara de calor.); este inconveniente genera incertidumbre en la investigación, razón por la cual se plantean las siguientes posibles causas que afectaron el proceso de curado de las probetas:

- Tiempo de almacenamiento de las probetas: los núcleos se almacenaron por 4 meses en cajas plásticas con sobres de gel silica evitando la exposición solar de la caja, hasta el momento de la adhesión de los laminados de fibra de carbono, sin embargo, al transportar los núcleos en ocasiones se golpeaban con las paredes de la caja debido al movimiento del desplazamiento.
- Rigidez de los núcleos: debido a que inicialmente se sometieron a temperatura post-fabricación seis probetas fabricadas completamente en PLA y no se presentó ninguna anomalía se determinó que los núcleos al no estar laminados presentaban una menor rigidez que les permitía deformarse al estar dentro del horno a una temperatura de 50°C.
- Temperatura de transición vítrea (T_g): es la temperatura a la cual la estructura molecular presenta movimientos macromoleculares afectando así las propiedades mecánicas de un material. (Marek & Verney, 2016)

En polímeros y especialmente en termoplásticos la temperatura de transición vítrea puede oscilar entre los 50°C y los 60°C generando movimientos en las cadenas poliméricas que contribuyen a un comportamiento elástico del material generando así deformaciones plásticas; en caso de exponer el material a temperaturas muy inferiores a T_g el polímero presentará un comportamiento rígido convirtiéndolo así en un material frágil (Yu, Wang, Ferraris, & Zhang, 2019).

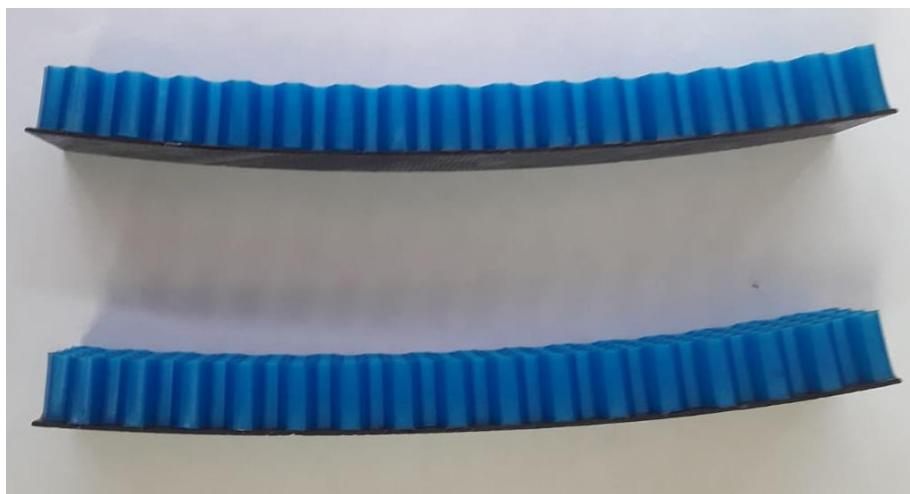


Figura 38. Deformación de probetas en cámara de calor.

Fuente: Autores.

Estas probetas al presentar fallas fueron desechadas debido a que no se determinó ningún método para corregir la curvatura del núcleo y de los laminados, adicional a esto en caso de ser corregida la curvatura era posible alterar el espécimen de tal manera que al momento de realizar las pruebas destructivas se obtuviera como resultado información errónea del material.

Por lo anterior, se procedió a fabricar nuevamente el lote de núcleos de 3/8", sin embargo, para evitar el problema mencionado anteriormente se optó por efectuar el curado del pegamento entre los laminados de fibra de carbono y el núcleo en PLA a temperatura ambiente durante aproximadamente 30 horas tomando como referencia la Tabla 6. Temperatura de curado y tiempo en cámara de calor para el pegamento Scotch-Weld DP420. del documento, realizando el procedimiento en dos etapas iniciando con el laminado inferior y por último el laminado superior, procedimiento explicado al detalle en el anexo 5.

5.5.Pruebas mecánicas a flexión.

Una vez finalizado el proceso de manufactura de las probetas fue posible proceder con las pruebas destructivas en la máquina universal de ensayos, las cuales se realizaron en la siguiente secuencia:

- Pruebas destructivas de las probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA.
- Pruebas destructivas de las probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA.
- Pruebas destructivas de las probetas de 3/8" sometidas a 50°C y fabricadas completamente en PLA.
- Pruebas destructivas de las probetas de 3/8" reforzadas en fibra de carbono.

5.5.1. Configuración de la máquina universal de ensayos.

Para iniciar las pruebas destructivas a flexión fue necesario configurar la máquina universal de ensayos, en primera instancia se realizó el montaje de los accesorios para la prueba de flexión, es decir el soporte ubicado en la parte inferior y el cabezal de desplazamiento en la parte superior como se evidencia en la Figura 39. Cabezal superior e inferior de máquina

universal de ensayos.

Fuente: Autores.. Estos dos accesorios debían estar completamente alineados para asegurar una carga en la dirección y ubicación apropiada para la probeta, de lo contrario se habría generado una toma de datos invalida puesto que la carga al no estar aplicada de forma perpendicular a la sección transversal del espécimen una vez se proceda con el cálculo de las propiedades de la probeta como resultado se obtendrán datos poco fiables.

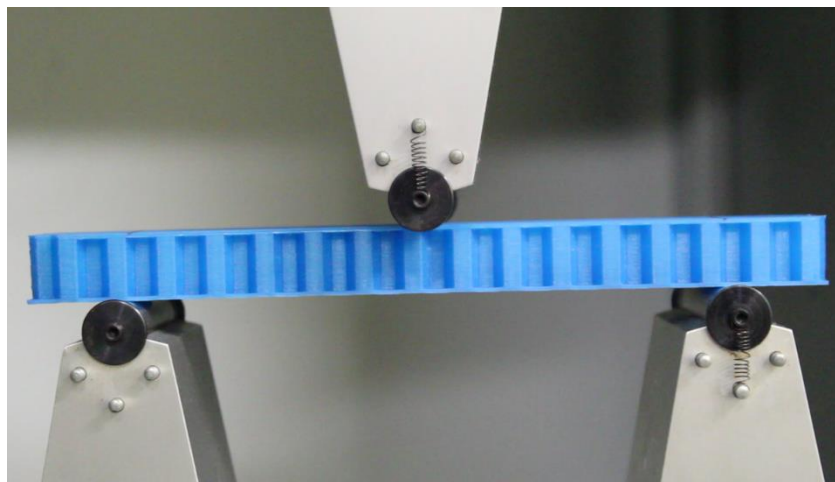


*Figura 39. Cabezal superior e inferior de máquina universal de ensayos.
Fuente: Autores.*

El proceso de alineamiento del cabezal de la máquina con el soporte inferior se realizó con una escuadra, y adicional a esto para asegurar la posición adecuada de la probeta en la máquina durante la prueba (Figura 45. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente: Autores.) se realizaron dos líneas sobre el espécimen que debían coincidir con los soportes cilíndricos inferiores.

Una vez finalizado el montaje descrito anteriormente se procedió a ingresar los parámetros correspondientes a sección transversal de la probeta (Tabla 7. Parámetros para generar reporte en la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.) en el software TiniusOlsen, y seguido de esto se ingresó la velocidad .La norma ASTM C393 sugiere una velocidad de 6mm/min sin embargo, al ser esta la

velocidad empleada en caracterización de metales y aceros se realizaron las pruebas a una velocidad de 2mm/min, estando así en el rango estipulado por la norma y cumpliendo con el mínimo de datos tomados por segundo a lo largo del desarrollo del ensayo, obteniendo así la Tabla 7. Parámetros para generar reporte en la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores. en la que se compilan todos los datos ingresados en el *software* para el desarrollo de la prueba destructiva.



*Figura 40. Montaje de probeta en la máquina universal de ensayos.
Fuente: Autores.*

Por otra parte, es fundamental obtener en el reporte final entregado por la máquina universal de ensayos datos que sean requeridos según la norma, para este caso los valores requeridos son fuerza [N] y desplazamiento. [mm]. Con estos dos datos se realizó la gráfica de fuerza vs. desplazamiento para cada prueba realizada, obteniendo así la carga máxima soportada por el espécimen con su máximo desplazamiento.

*Tabla 7. Parámetros para generar reporte en la máquina universal de ensayos.
Fuente: Autores.*

Velocidad de prueba	2 mm/min
Altura de la probeta	17 mm
Ancho de la probeta	32,76mm@1/4" – 36,72mm@3/8"
	Fuerza.

Variables a reportar.	Desplazamiento. Tiempo
-----------------------	---------------------------

5.5.2. Cálculo de propiedades.

La norma ASTM C393 en el numeral 13 hace referencia a las propiedades a calcular una vez finaliza la prueba de cada probeta; para este caso debido a que la prueba destructiva realizada fue a tres puntos lo correspondiente es calcular las siguientes propiedades (ASTM, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016):

➤ **Esfuerzo cortante último del núcleo:**

$$F_s^{ult} = \frac{P_{max}}{(m + k)w} \quad (3)$$

➤ **Esfuerzo cortante de fluencia del núcleo:**

$$F_s^{yield} = \frac{P_{yield}}{(m + k)w} \quad (4)$$

➤ **Esfuerzo en la cara:**

$$\sigma_f = \frac{P_{max}S}{2t(m + k)w} \quad (5)$$

En donde m es el espesor del sándwich, k es el espesor del núcleo, w es el ancho del sándwich, t es el espesor de las caras, S es la separación entre soportes de la máquina universal de ensayos, F_s^{ult} es el esfuerzo cortante último del núcleo, P_{max} es la fuerza máxima antes de la falla, F_s^{yield} es el esfuerzo cortante de fluencia del núcleo, P_{yield} es la fuerza al 2% de la deflexión máxima y σ_f es el esfuerzo en la cara.

El resultado de las propiedades calculadas para las probetas sometidas a las pruebas destructivas se encuentra en las tablas presentadas en análisis de datos y resultados, y las gráficas de cada una de las probetas con el *offset* del 2% correspondiente a P_{yield} están ubicadas el anexo 6

5.5.3. Manejo estadístico.

La norma ASTM C393 en la sección 13.5 indica el manejo estadístico que se debe emplear a las propiedades calculadas anteriormente con el fin de tener un control del valor obtenido a partir de los datos de prueba, para esto se emplean las siguientes ecuaciones: valor promedio (6), desviación estándar (7) y el coeficiente de variación (8) (ASTM, Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure, 2016).

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (6)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n - 1)} \quad (7)$$

$$CV = 100 * S_{n-1} / \bar{x} \quad (8)$$

En donde \bar{x} es el valor promedio, x_i es la propiedad medida, n es el número de especímenes sometidos a pruebas destructivas, S_{n-1} es la desviación estándar y CV es el coeficiente de variación.

5.6. Diseño de experimentos.

Al iniciar el desarrollo del diseño experimental se determinó en primera instancia el valor correspondiente a el número de variables del primer factor (**a**) y el número de variables del denominador (**b**) según las condiciones en las cuales se desarrollará el experimento, como se puede evidenciar en la Figura 41. Variables a controlar en el desarrollo estadístico.

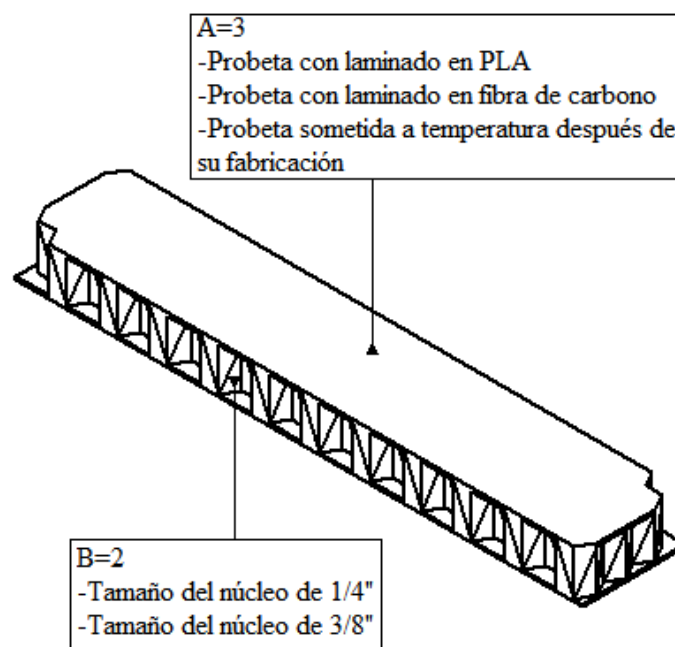


Figura 41. Variables a controlar en el desarrollo estadístico.
Fuente: Autores.

Teniendo **a** y **b** como las variables propuestas es posible proceder a determinar la interrelación entre las variables del primer factor y las correspondientes al denominador, para esto se emplea la Figura 42. Gráfica de interrelación entre variables. Fuente: Autores., en la que se observa que existen dos intersecciones por cada variable de **a** con las variables de **b**, como indica la enumeración de la gráfica, esto quiere decir que se requiere realizar las seis combinaciones encontradas para así determinar las propiedades mecánicas del material bajo diferentes configuraciones.

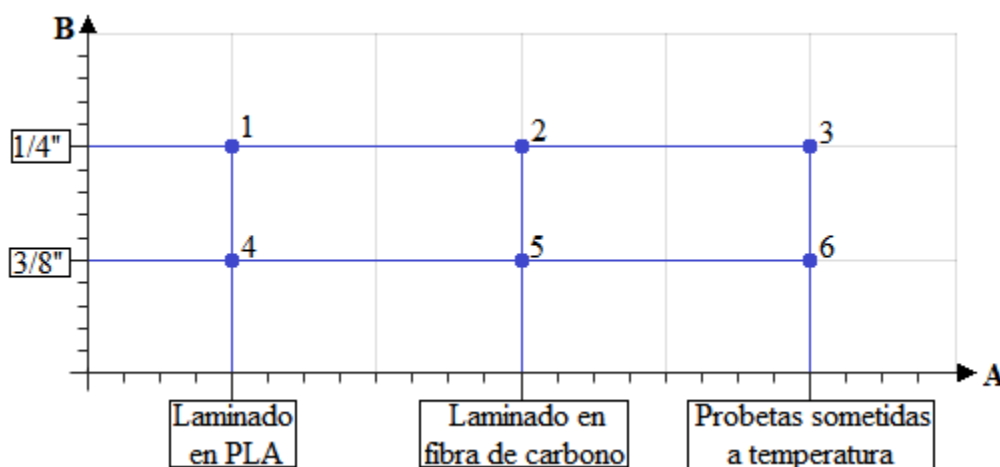


Figura 42. Gráfica de interrelación entre variables.
Fuente: Autores.

Al desarrollar las pruebas mecánicas iniciales se determinó que la configuración de tamaño de celda de 1/4" presentaba valores muy bajos correspondientes a la carga máxima soportada y a las propiedades mecánicas determinadas; teniendo en cuenta la enumeración indicada en la figura anterior, es decir, **1** representa las probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA, **2** representa los núcleos de 1/4" con laminados en fibra de carbono, **3** representa las probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación, **4** representa las probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA, **5** representa los núcleos de 3/8" con laminados en fibra de carbono y por último **6** representa las probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación, se procedió a realizar la siguiente interrelación de variables

tomando como referente el lote **1**, es decir, probetas con tamaño de celda de 1/4" fabricado completamente en PLA:

- **Relación entre 1 y 4:** los valores obtenidos en el lote **4** presentan mejores propiedades mecánicas a comparación del lote **1** no solo en la carga máxima soportada sino también en las propiedades mecánicas calculadas.
- **Relación entre 1 y 5:** en cuanto al lote **5** correspondiente a las probetas con laminado en fibra de carbono los datos obtenidos de las propiedades mecánicas se encuentran por debajo a comparación del lote **1**, sin embargo, es importante recalcar la importancia del pegamento en este lote debido a que los núcleos presentaron un comportamiento aceptable en las pruebas destructivas, razón por la cual los bajos valores de carga soportada y propiedades mecánicas se obtienen por efectos del pegamento.
- **Relación entre 1 y 6:** al igual que en la primera comparación realizada, los valores obtenidos en el lote **6** presentan mejores características que el lote **1**, debido a que el lote **4** y **6** presentaron valores similares en cuanto a sus propiedades mecánicas.

Por las relaciones realizadas anteriormente se determinó descartar el lote **2** y **3** puesto que no eran viables para el experimento las configuraciones con tamaño de celda de 1/4" debido a que la carga máxima soportada por estas probetas no representaba una diferencia significativa a comparación de la configuración de 3/8" y en cuanto a la fabricación, los especímenes de 1/4" requerían de más material y tiempo de impresión a comparación de los de 3/8", de esta manera al descartar los lotes mencionados se obtuvo como resultado cuatro combinaciones restantes para someter a las pruebas destructivas.

Para comprobar la validez de los resultados obtenidos a partir de las pruebas destructivas bajo el estándar ASTM 393, es común desarrollar un proceso relacionado al de diseño de experimentos, en donde a partir de variables que interfieren en el proceso de manufactura de las probetas, se procede a determinar la cantidad de réplicas necesarias para obtener resultados confiables en el trabajo de investigación.

En primera instancia, para el caso de este experimento, se empleó un modelo factorial mixto puesto que este modelo permite un mejor estudio del comportamiento de los factores

debido a que se debe tener en cuenta más de uno, además de esto el modelo contempla el análisis con la interacción de diferentes factores con el fin de obtener como resultado la combinación óptima basada en los factores empleados para el desarrollo del análisis.

Para este caso al fijar el factor A como la condición de la probeta y B como el tamaño de celda del honeycomb se procedió a determinar los niveles para cada factor teniendo así 3 niveles para el factor A y dos para el factor B representados, es importante aclarar que la nomenclatura para los niveles es la misma del factor en letra minúscula, teniendo así para este experimento $a=3$ y $b=2$.

En cuanto al número de tratamientos, es decir, la combinación niveles se obtiene del producto de a y b , logrando un resultado de 6, valor coherente puesto que coincide con las combinaciones determinadas en la Figura 42. Gráfica de interrelación entre variables. Fuente: Autores.; de esta manera siguiendo el referente teórico por D.C, Montgomery, en el que se plantea que para experimentos mixtos el número mínimo de pruebas debe ser igual al tamaño de combinaciones existentes en el experimento, es posible determinar que el número mínimo de probetas requeridas para cada lote es de 6.

Una vez destruidas las probetas fue necesario calcular la desviación estándar ya que este es el dato de partida para calcular la diferencia entre medias (D^2) y la cantidad relacionada con el parámetro de no centralidad (Φ) para así obtener los datos correspondientes a la Tabla 8. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 1/4" completamente PLA. Fuente: Autores., Tabla 9. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA.

Fuente: Autores. y Tabla 10. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.

Para el diseño de experimentos desarrollado en este trabajo de investigación se empleó un $\alpha = 0.05$ debido a que este valor es la probabilidad de rechazar la hipótesis, y utilizando las curvas de operación característica fue hallado β que es la probabilidad de aceptar la hipótesis. (Montgomery, 2004)

Con el fin de determinar el parámetro de no centralidad se empleó la siguiente ecuación para hallar su valor:

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} \quad (9)$$

En donde Φ es el parámetro de no centralidad, n es el número de repeticiones, a es el número de variables del primer factor, b es el número de variables del denominador, D es la diferencia entre las medias (1.5 para este caso puesto que con este valor se asegura una alta fiabilidad de los datos calculados, tomando como referente el modelo experimental desarrollado por Pérez Cepeda), v_1 es el grado de libertad del primer factor, v_2 es el grado de libertad del segundo factor. (Pérez Cepeda, 2011)

Tabla 8. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 1/4" completamente PLA.
Fuente: Autores.

Φ^2	Φ	n	a	b	D^2	σ^2	v_1	v_2	β
3,37499618	1,83711627	2	3	2	5289,22	2350,7671	2	6	0,48
5,06249427	2,24999873	3	3	2	5289,22	2350,7671	2	12	0,14
6,74999236	2,59807474	4	3	2	5289,22	2350,7671	2	18	0,035
8,43749045	2,90473587	5	3	2	5289,22	2350,7671	2	24	0,01
10,1249885	3,18197872	6	3	2	5289,22	2350,7671	2	30	0
11,8124866	3,43692983	7	3	2	5289,22	2350,7671	2	36	0
13,4999847	3,67423254	8	3	2	5289,22	2350,7671	2	42	0

Tabla 9. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA.
Fuente: Autores.

Φ^2	Φ	n	a	b	D^2	σ^2	v_1	v_2	β
3,37499884	1,83711699	2	3	2	22374,8	9944,34565	2	6	0,48
5,06249825	2,24999961	3	3	2	22374,8	9944,34565	2	12	0,14
6,74999767	2,59807576	4	3	2	22374,8	9944,34565	2	18	0,035
8,43749709	2,90473701	5	3	2	22374,8	9944,34565	2	24	0,01
10,1249965	3,18197997	6	3	2	22374,8	9944,34565	2	30	0
11,8124959	3,43693118	7	3	2	22374,8	9944,34565	2	36	0

13,4999953	3,67423398	8	3	2	22374,8	9944,34565	2	42	0
------------	------------	---	---	---	---------	------------	---	----	---

Tabla 10. Diseño de experimentos para el lote de probetas de 3/8" completamente PLA sometidas a temperatura post-fabricación.

Fuente: Autores.

Φ^2	Φ	n	a	b	D^2	σ^2	$v1$	$v2$	β
3,375	1,83711731	2	3	2	9539,11	4239,6064	2	6	0,48
5,0625	2,25	3	3	2	9539,11	4239,6064	2	12	0,12
6,75	2,59807621	4	3	2	9539,11	4239,6064	2	18	0,035
8,4375	2,90473751	5	3	2	9539,11	4239,6064	2	24	0,01
10,125	3,18198052	6	3	2	9539,11	4239,6064	2	30	0

Con el desarrollo del diseño de experimentos se determinó que la cantidad de probetas requeridas para realizar las pruebas destructivas a flexión era de seis especímenes por lote, adicional a eso al obtener un valor de $n = 5$ se establece que para el desarrollo estadístico planteado es necesario de cinco replicas por lote para así obtener un valor óptimo de β para los tres lotes, razón por la cual en la tabla 8, 9 y 10 se encuentran resaltadas estas casillas; por otra parte al tener como referente la norma ASTM C 393, en la que se especifica en el capítulo 8, numeral 8.1, que el número de probetas para realizar la prueba es de al menos 5 especímenes, se optó por esta variante debido a los largo tiempos de impresión de cada uno de los especímenes, sin embargo, para futuras réplicas de este experimento se sugiere tomar el diseño de experimentos planteado.

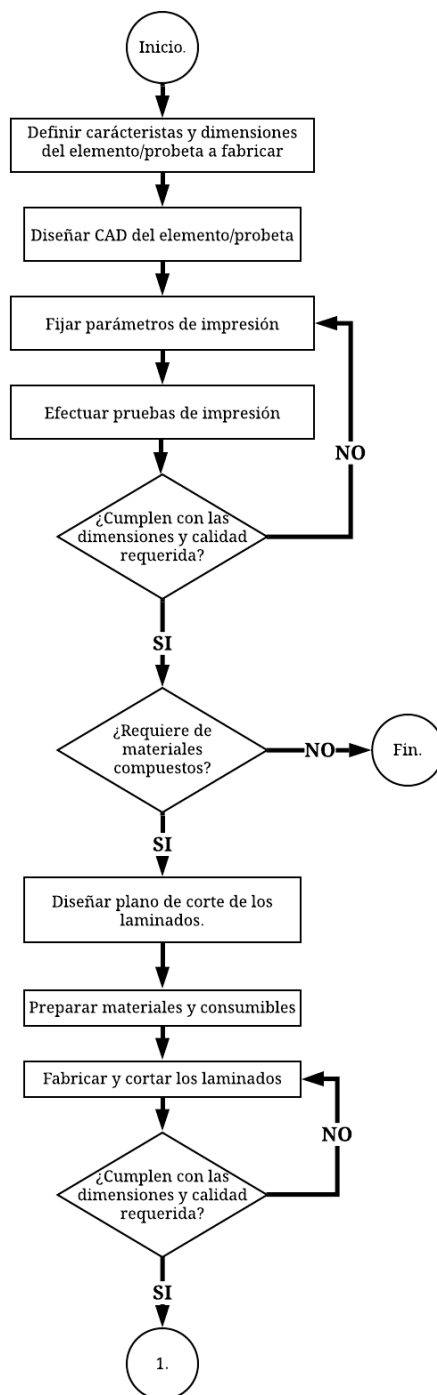
5.7. Metodología de fabricación de estructuras tipo sándwich con un núcleo fabricado mediante técnica de manufactura aditiva y reforzado en materiales compuestos.

Compilando los procedimientos desarrollados para la realización de las probetas y a su vez dando cumplimiento al objetivo específico número tres, se plantea la siguiente metodología de fabricación de probetas o elementos fabricados mediante técnicas de manufactura aditiva con refuerzo en material compuesto condensado en el diagrama de flujo (Figura 43. Diagrama de flujo de la metodología de fabricación de probetas realizadas mediante técnicas de manufactura aditiva reforzadas con materiales compuestos.

Fuente: Autores.) que puede ser empleado hasta el control dimensional del elemento fabricado completamente mediante manufactura aditiva o hasta el control dimensional relacionado a los materiales compuestos.

Este diagrama se presenta una vez finalizados los procedimientos satisfactorios empleados en la metodología de la investigación para facilitar futuras réplicas del experimento o para fabricar especímenes de condiciones similares mediante impresión 3D en las que se puede incluir el uso de materiales compuestos.

En primera instancia es necesario determinar la norma o referente con el cual se determinarán las medidas adecuadas para la fabricación de cada probeta, seguido de esto es necesario fabricar la geometría en un programa de diseño asistido por computador para así mediante un *software* de impresión 3D sea posible la generación de un *G-code* modificando los parámetros de impresión pertinentes para obtener la geometría sin imperfecciones, en caso de presentar alguna anomalía en el proceso de impresión de pruebas de sugiere al igual que en el desarrollo de este documento desechar el elemento y modificar parámetros hasta obtener los adecuados para la fabricación sin defectos de las probetas.



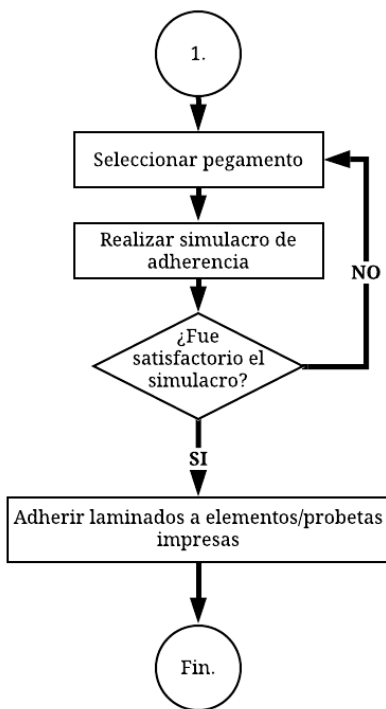


Figura 43. Diagrama de flujo de la metodología de fabricación de probetas realizadas mediante técnicas de manufactura aditiva reforzadas con materiales compuestos.

Fuente: Autores.

En caso de requerir materiales compuestos para los elementos impresos se debe realizar el plano de corte para así fijar las medidas exactas de material necesarias para la fabricación de los laminados, y una vez preparados los consumibles e insumos se debe proceder a la fabricación del laminado teniendo en cuenta todos los cuidados mencionados en el desarrollo de ingeniería del documento.

Para finalizar, la adherencia entre la fibra de carbono y los núcleos debe ser rigurosa en cuanto a las cantidades de pegamento empleadas y la uniformidad de la capa de pegamento aplicada en cada laminado; para controlar la cantidad de pegamento se sugiere pesar los laminados una vez es aplicado el pegamento para así aplicar la misma cantidad en cada uno de los mencionados.

6. Presentación y análisis de resultados.

En este capítulo se presentarán las propiedades calculadas según la norma ASTM para los especímenes destruidos en el desarrollo de la investigación, presentándolos en el orden en el que los lotes fueron sometidos a las pruebas a flexión y sus características correspondientes a los cálculos estadísticos; adicional a esto, es pertinente describir a continuación el procedimiento empleado para la extrapolación de las gráficas obtenidas por medio de la máquina universal de ensayos debido a que es común encontrar en la primera sección de la gráfica un comportamiento erróneo en forma de curva (Figura 44. Gráfica con perturbaciones debido a la máquina universal de ensayos. Fuente: Autores.), razón por la por medio de pendientes (ecuación (10)) se logró la aproximación obteniendo así el valor correspondiente a la deformación inicial (e_0) y restándolo a los valores para lograr el desplazamiento del eje vertical.

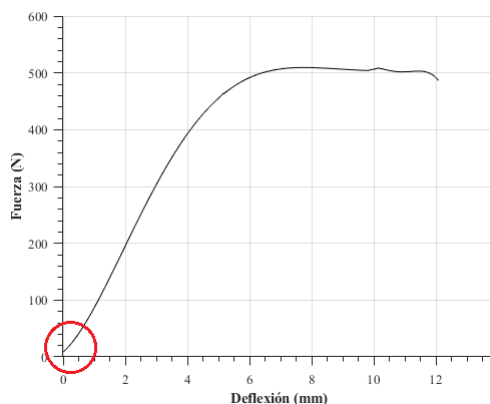


Figura 44. Gráfica con perturbaciones debido a la máquina universal de ensayos.
Fuente: Autores.

$$\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{e_2 - e_1} = \frac{\sigma_1 - 0}{e_1 - e_0} \quad (10)$$

En la ecuación (10) se realiza una igualación de pendientes tomando dos puntos de la gráfica actual en los que la pendiente sea constante para así por medio de despeje de ecuaciones se determine el valor correspondiente a (e_0) como se indica en la ecuación(11),

de esta manera para finalizar la corrección de la gráfica, el procedimiento realizado para las gráficas que presentaron este comportamiento se encuentra en el anexo 6 correspondiente a la presentación de las gráficas obtenidas.

$$e_0 = e_1 - \frac{\sigma_1 * (e_2 - e_1)}{\sigma_2 - \sigma_1} \quad (11)$$

Por otra parte, el tipo de falla de las probetas debe ser codificado para así tener conocimiento de lo ocurrido una vez finalizaba cada prueba destructiva asignando una letra al tipo de falla presentada y su ubicación en el espécimen, de acuerdo con la Tabla 1 del presente documento, adicional a esto, en esta sección se presentan algunas imágenes de las probetas una vez finalizada la prueba destructiva con su respectivo análisis de falla para facilitar la comprensión de la falla visualmente, en el anexo 7 se encuentran todas las fotografías correspondientes a las probetas reportadas en este documento.

6.1.Probetas fabricadas en PLA.

A continuación, se presenta el análisis de las gráficas obtenidas al realizar las pruebas destructivas, además de la comparación entre las probetas sometidas al ensayo de flexión y la descripción de falla con la nomenclatura estipulada por la norma.

6.1.1. Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4".

De los 8 especímenes sometidos a las pruebas destructivas a flexión se obtuvo la Figura 45. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente: Autores. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en la que se evidencia que algunas probetas se encuentran fuera de tendencia en comparación de las demás, y teniendo en cuenta que la norma indica que es necesario de 5 probetas, se procedió a descartar 3 probetas. El procedimiento de descarte se realizó mediante un análisis

preliminar de la gráfica de tal manera que al discriminar las curvas fuera de tendencia se obtuviera una reducción en la desviación estándar; para este caso se aislaron las probetas 2, 5 y 6, obteniendo como resultado la Figura 46. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente Autores. y la reducción de la desviación estándar en un porcentaje como se evidencia en la tabla 11.

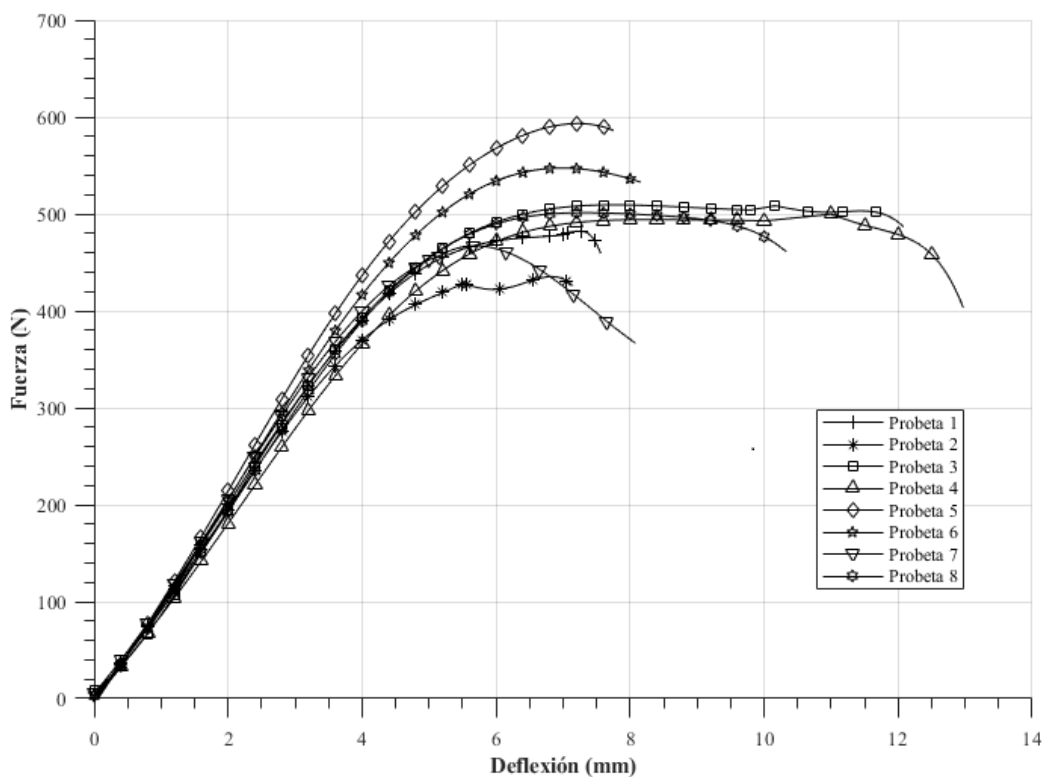


Figura 45. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

Tabla 11. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Número de Probetas		Porcentaje de reducción de la desviación estándar
8 probetas	5 probetas	

Desviación estándar	48,48 N	17,05 N	64,81%
----------------------------	---------	---------	--------

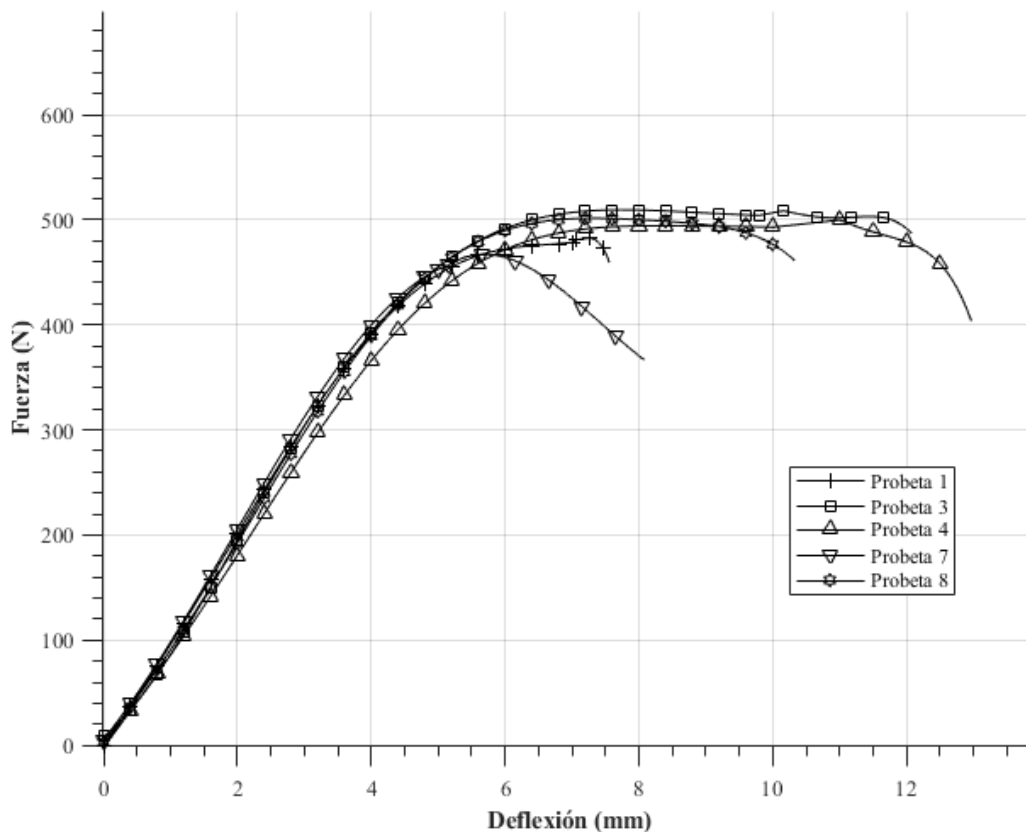


Figura 46. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4".

Fuente Autores.

Como se evidencia en la Figura 46. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 1/4". Fuente Autores., las curvas correspondientes a las probetas tienen un comportamiento muy similar en la región elástica, sin embargo, en la región plástica la probeta 7 presenta un comportamiento diferente a los 4 especímenes restantes debido a su modo de falla. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los valores correspondientes a las propiedades calculadas según la normativa ASTM C393 para las probetas 1, 3, 4, 7 y 8, con su modo de falla respectivo.

Tabla 12. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 1/4" fabricadas completamente en PLA.
Fuente: Autores.

Probeta	P_{max} [N]	F_s^{ult} [MPa]	F_s^{yield} [MPa]	σ_f [Mpa]	Código de Falla
1	482,305	0,46007	0,39349	34,50556	X-A-F
3	509,368	0,48588	0,44135	36,44173	X-A-F
4	499,709	0,47667	0,41059	35,75071	M-A-B
7	467,0597	0,44553	0,39989	33,41487	M-A-B
8	501,3314	0,47822	0,43813	35,86677	X-A-F
Promedio simple	491,95462	0,46927	0,41669	35,19592	-
Desviación estándar	17,05983	0,01627	0,02194	1,22051	-
Coefficiente de variación (%)	3,46776	3,46776	5,26608	3,46776	-

En cuanto al modo de falla de las probetas, se evidencia que el área de falla en todas las pruebas fue en el cabezal de carga y en ninguna prueba se reportó falla imprevista, razón por la cual es posible afirmar que la ubicación de la probeta sobre los apoyos y la distancia entre los mismos fue la adecuada; por otra parte, se evidenció que el tipo de falla está relacionado con la ubicación de la misma puesto que las probetas que presentaron falla explosiva era debido a la rotura simultanea de los laminados superior e inferior, a diferencia de la falla múltiple en la que únicamente se rompía el laminado inferior.

Con respecto a las propiedades calculadas se evidencia un bajo coeficiente de variación y datos muy similares correspondientes al esfuerzo cortante último de los núcleos.

Al evidenciar que las fallas presentadas en este lote son "M-A-B" y "X-A-F", a continuación se presentan las imágenes correspondientes a este tipo de fallas, la Figura 47.

Probeta de 1/4" con tipo de falla M-A-B.

Fuente: Autores. para el tipo de falla mencionado en primera instancia y la Figura 48.

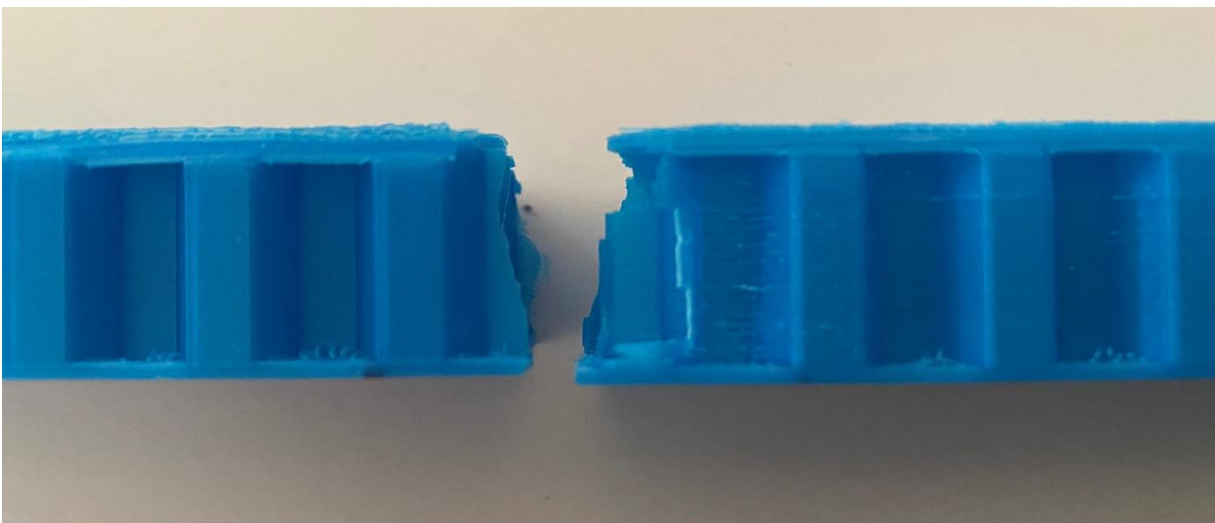
Probeta de 1/4" con tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores. para el siguiente tipo de falla; cabe resaltar que la probeta 7 al tener un comportamiento diferente a las demás es la empleada para el reporte correspondiente a la falla "M-A-B" en la que se puede evidenciar que la probeta presenta falla en la laminado inferior y en el núcleo, sin embargo no pertenece a tipo de falla "X-A-F" debido a que el laminado superior no logra una rotura completa.

Se puede determinar que la probeta 7 presentó menor deflexión debido a que la falla ocurrió por el medio de las celdas del honeycomb, teniendo así menor resistencia a la carga y mayor facilidad de rotura, a diferencia de la probeta 3 ilustrada en la figura 48 en la que se observa que la falla del núcleo ocurre a lo largo de las paredes del mencionado y no por la mitad de las celdas.



*Figura 47. Probeta de 1/4" con tipo de falla M-A-B.
Fuente: Autores.*



*Figura 48. Probeta de 1/4" con tipo de falla X-A-F.
Fuente: Autores.*

6.1.2. Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8".

En este lote de probetas también fue necesario realizar el procedimiento de descarte mencionado anteriormente para pasar de 8 probetas (Figura 49. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8".

Fuente: Autores.) a 5 (Figura 50. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8".) como lo indica la norma ASTM C-393; adicional a esto se presenta la Tabla 13. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA., en la que se evidencia la reducción de la desviación estándar luego de descartar 3 curvas fuera de tendencia.

Tabla 13. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA.

Fuente: Autores.

	Número de Probetas		Porcentaje de reducción de la desviación estándar
	8 probetas	5 probetas	
Desviación estándar	99,72 N	15,41 N	84,58%

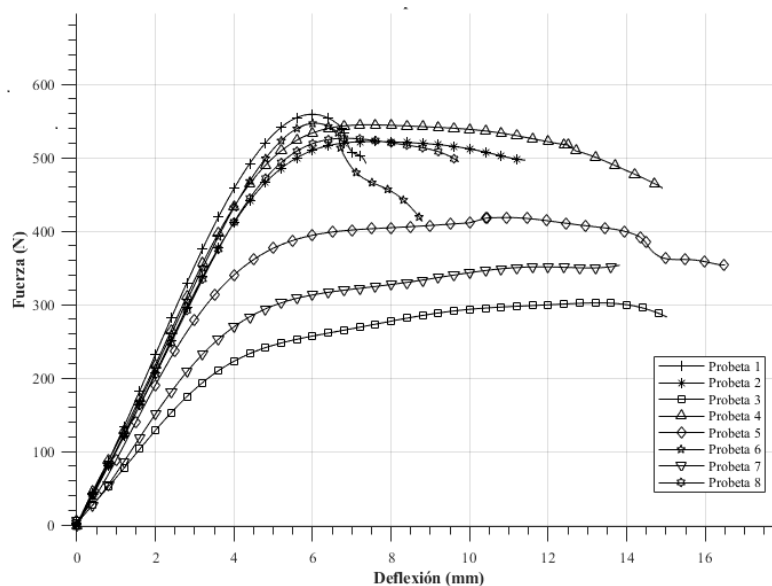


Figura 49. Gráfica inicial de Fuerza vs. Deflexión para las 8 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

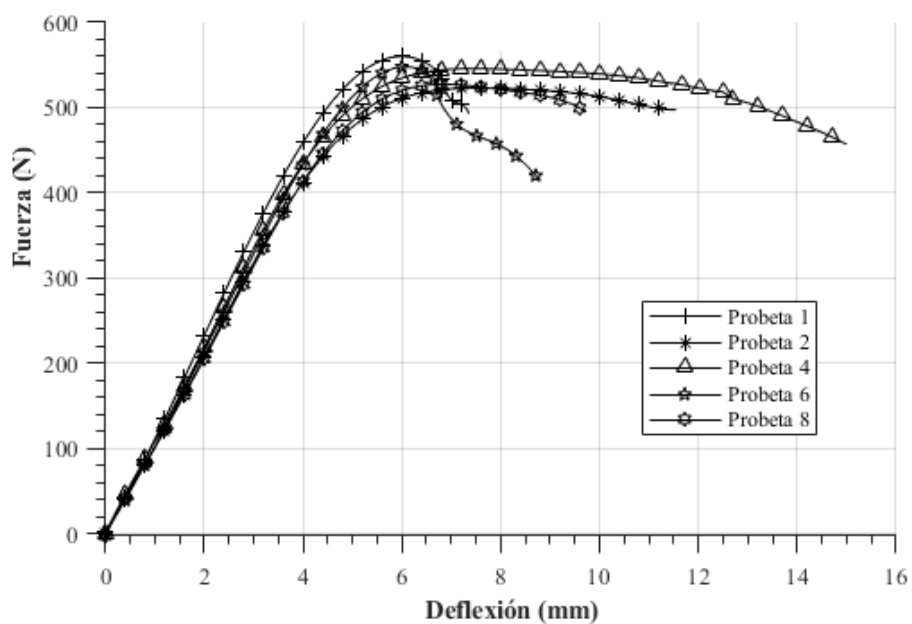


Figura 50. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

Tabla 14. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA.
Fuente: Autores.

Probeta	P_{max} [N]	F_s^{ult} [MPa]	F_s^{yield} [MPa]	σ_f [Mpa]	Código de Falla
1	559.2079	0,47591	0,37301	35,69291	M-A-B
2	522.0875	0,44431	0,39759	33,32359	X-A-F
4	544,8417	0,46367	0,41383	34,77594	X-A-F
6	546,9607	0,46548	0,40341	34,91119	M-A-B
8	526,4729	0,44804	0,39531	33,60351	X-A-F
Promedio simple	539,91414	0,45948	0,39663	34,46143	-
Desviación estándar	15,36749	0,01307	0,01502	0,98087	-
Coefficiente de variación (%)	2,84628	2,84628	3,78788	2,84628	-

En la Figura 50. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8". Fuente: Autores. se puede evidenciar que el comportamiento en la región elástica de todas las probetas es muy similar, sin embargo, en la región plástica la probeta 1 y 6 presentan una caída abrupta en la zona final de la curva ya que no presentaron una falla explosiva como el resto de las probetas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por otra parte, los valores correspondientes al esfuerzo cortante último del núcleo son muy similares a comparación del esfuerzo en la cara que presenta mayor diferencia.

En este lote a comparación del anterior la carga máxima promedio aumento en 47 N aproximadamente, evidenciando así que el tamaño de celda empleado en este lote de probetas presenta mejor comportamiento bajo cargas de flexión, en cuanto a los tipos de fallas, ambos lotes presentan similitud obteniendo así la Figura 51. Probeta de 3/8" con tipo de falla "M-A-B" Fuente: Autores, para el tipo de falla "M-A-B" de la probeta 6 y la Figura 52. Probeta de 3/8" con tipo de falla "X-A-F"

Fuente: Autores. para el tipo de falla "X-A-F" presentado en la mayoría de especímenes de este lote.

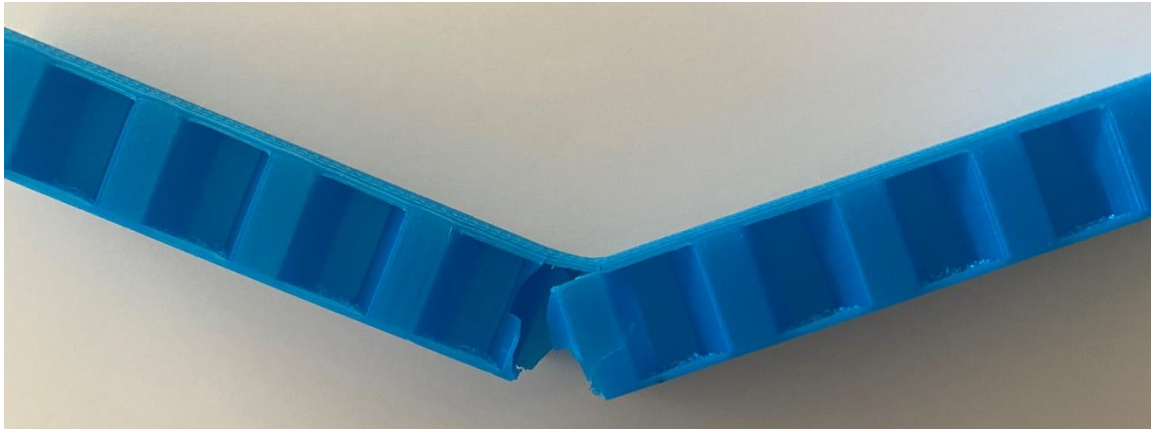


Figura 51. Probeta de 3/8" con tipo de falla "M-A-B"
Fuente: Autores,

De la figura anterior se puede evidenciar que la falla del núcleo ocurre a lo largo de la pared izquierda de la celda y no por la mitad, razón por la cual este espécimen logró obtener un valor elevado de carga soportada (546 N) a comparación del mismo tipo de falla presentado en lote correspondiente a las probetas de 1/4".

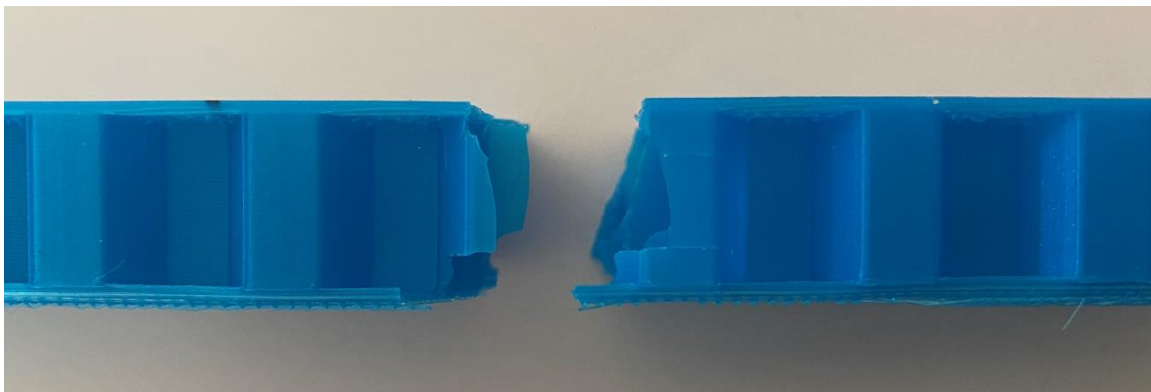


Figura 52. Probeta de 3/8" con tipo de falla "X-A-F"
Fuente: Autores.

6.1.3. Probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8" sometidas a temperatura post fabricación.

Para el lote de probetas sometido a las pruebas destructivas únicamente fue necesario descartar una curva puesto que se probaron seis especímenes; la probeta 1 fue la descartada debido a ser el espécimen con el menor valor de carga máxima soportada, logrando así una disminución de la desviación estándar como se ilustra en la Tabla 15. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación.
Fuente: Autores..

Tabla 15. Reducción de desviación estándar para el lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación.
Fuente: Autores.

	Número de Probetas		Porcentaje de reducción de la desviación estándar
	6 probetas	5 probetas	
Desviación estándar	65,11226735	44,17297255	32,158755%

En cuanto a las curvas de este lote de probetas (Figura 53. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8" sometidas a temperatura post-fabricación. Fuente: Autores.) se evidencia una diferencia en cuanto a la deflexión a comparación de los dos lotes presentados anteriormente debido a que el proceso de temperatura post-fabricación fragilizó las probetas evitando así que estas logaran valores altos de deflexión antes de la falla estructural, además de esto, las curvas de todos los especímenes presentaron falla tipo explosiva en todas las probetas como se aprecia en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, por otra parte, según la tabla mencionada es posible observar que la diferencia en cuanto al esfuerzo cortante de fluencia a comparación los lote presentados anteriormente es del 85% aproximadamente.

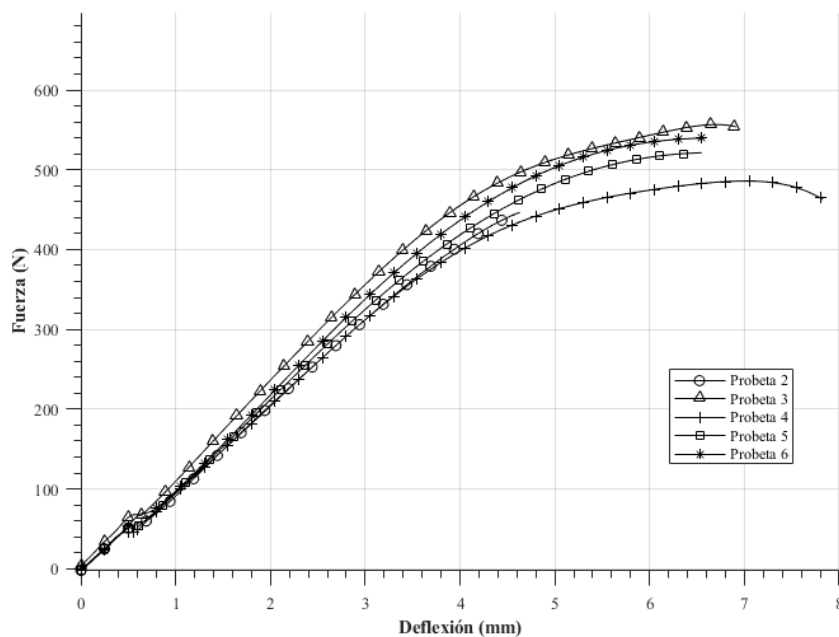


Figura 53. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas completamente en PLA con diámetro de celda de 3/8" sometidas a temperatura post-fabricación.

Fuente: Autores.

En la figura 53 se evidencia un comportamiento irregular en el eje correspondiente a la deflexión entre el valor de 0 y 1 para todos los especímenes, esto debido a que al momento de realizar las pruebas destructivas en ese punto los especímenes presentaban pequeñas nucleaciones debido a la temperatura aplicada después de su fabricación; cabe resaltar que en ese punto ninguna probeta presentó una falla visible, sin embargo, si era evidente el cambio en la rigidez a comparación de las otras probetas fabricadas completamente en PLA sin exposición a temperatura debido a que ninguna presentó este comportamiento ni emitió ningún ruido previo a la fractura como si se presentó con todos los especímenes de este lote.

Tabla 16. Propiedades mecánicas del lote de probetas de 3/8" fabricadas completamente en PLA y sometidas a temperatura post-fabricación.

Fuente: Autores.

Probeta	P_{max} [N]	F_s^{ult} [MPa]	F_s^{yield} [MPa]	σ_f [Mpa]	Código de Falla
2	485.8872	0,41351	0,03851	31,01301	X-A-F
3	556.6535	0,47373	0,05711	35,52986	X-A-F
4	446,4779	0,37996	0,05461	28,49761	X-A-F
5	521,2892	0,44363	0,05251	33,27264	X-A-F
6	539,741	0,45933	0,05941	34,45038	X-A-F
Promedio simple	510,00976	0,43403	0,05243	32,55271	-
Desviación estándar	44,17297	0,03759	0,00821	2,81945	-
Coefficiente de variación (%)	8,66121	8,66121	15,64527	8,66121	-

6.1.4. Núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8” reforzados con laminados de fibra de carbono.

Al tener como referente la norma ASTM C-393, se realizó la cantidad de probetas exactas (cinco) en este lote para así determinar las propiedades mecánicas.

La diferencia de comportamiento entre los especímenes destruidos en este lote es alta puesto el modo de falla en los especímenes presentó variaciones a causa del pegamento incorporado entre los laminados en fibra de carbono y el núcleo en PLA.

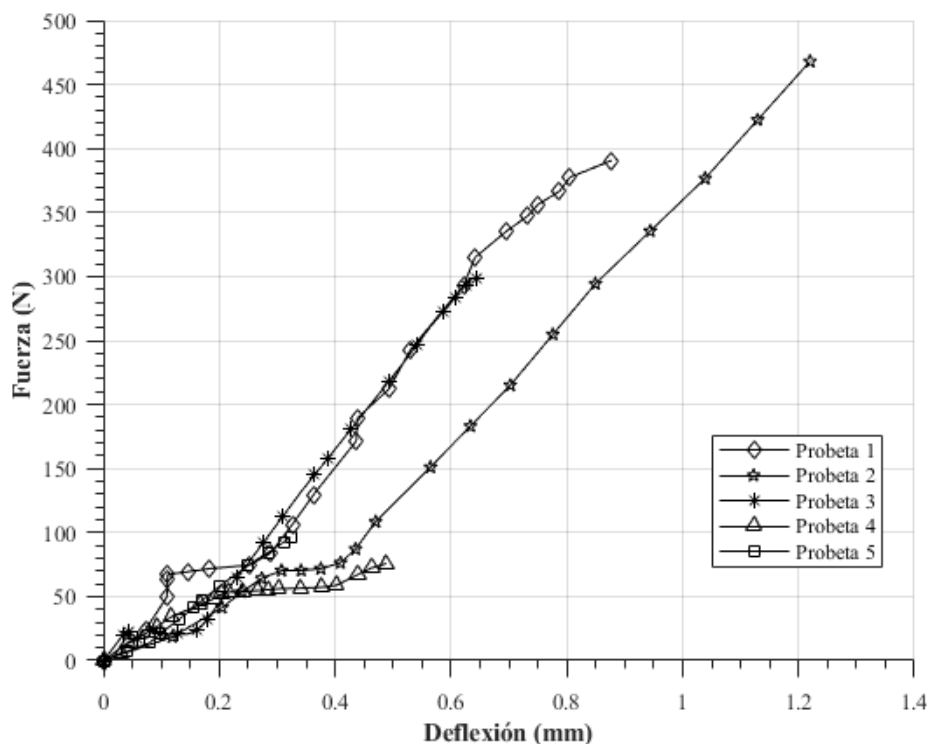
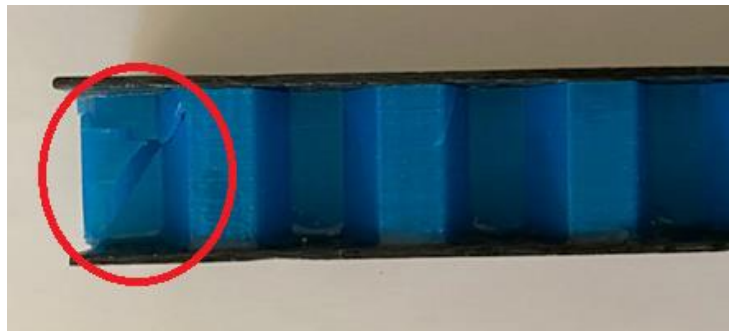


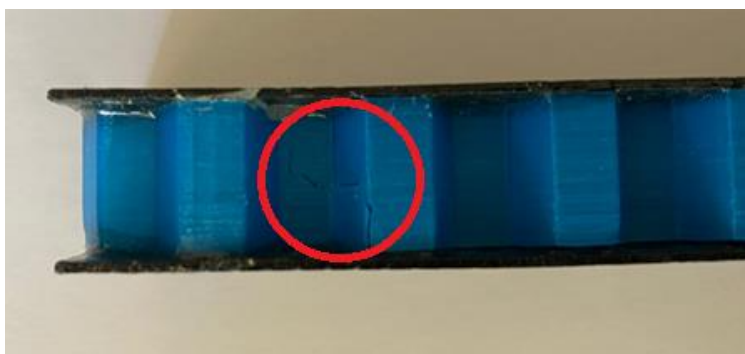
Figura 54. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas con núcleo en PLA y laminados en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Como se puede evidenciar en la Figura 54. Gráfica final de Fuerza vs. Deflexión para las 5 probetas fabricadas con núcleo en PLA y laminados en fibra de carbono. Fuente: Autores., únicamente tres probetas lograron soportar una carga superior a los 300 N; la probeta 1 y 2 fueron las únicas del lote que no fallaron por delaminación, para estos dos especímenes la falla presentada fue ruptura del núcleo (Figura 55. Falla de núcleo de la probeta 1 del lote. Fuente: Autores. y Figura 56. Falla de núcleo de la probeta 2 del lote. Fuente: Autores.) sin delaminación total; esto quiere decir que la adherencia entre la fibra de carbono y el núcleo en PLA fue la adecuada, sin embargo el espécimen 3 alcanzó un valor alto de fuerza máxima a pesar de haber fallado por delaminación.



*Figura 55. Falla de núcleo de la probeta 1 del lote.
Fuente: Autores.*



*Figura 56. Falla de núcleo de la probeta 2 del lote.
Fuente: Autores.*

En cuanto a las probetas 4 y 5 los valores de fuerza máxima fueron muy bajos, no obstante al cumplir con los mismos procedimientos y metodología de aplicación del pegamento (anexo 5) se generó incertidumbre en la investigación, razón por la cual se desprendió manualmente el laminado que presentó falla en la prueba para observar lo sucedido en la cara en la cual fue aplicado el pegamento; de esta manera se encontró que la zona de falla estaba relacionada con la capa de pegamento puesto que en algunas zonas como se indica en color verde en la Figura 57. Zonas de adherencia profunda y superficial en los laminados. Fuente: Autores., el laminado si presentaba adherencia con el núcleo, por el contrario de la zona demarcada con rojo en la que se evidencia que el laminado no tiene marcas del honeycomb demostrando así la adherencia superficial entre el núcleo y la fibra de carbono causando así la delaminación principal en esa zona durante las pruebas destructivas.



Figura 57. Zonas de adherencia profunda y superficial en los laminados.
Fuente: Autores.

En lo que a las propiedades mecánicas para esta configuración de probetas concierne, se presenta la Tabla 17. Propiedades mecánicas del lote de núcleos de 3/8" fabricados en PLA con laminados en fibra de carbono. Fuente: Autores., en la que se evidencian códigos de falla diferentes a los lotes anteriores y coeficientes de variación más elevados debido al diferente comportamiento que tomaron las probetas del lote.

Todas las propiedades determinadas en este lote de probetas presentan gran diferencia a comparación de los lotes anteriores puesto que la carga máxima es el valor base para calcular el resto de las propiedades y al tener un promedio de 266,12 N para este lote a comparación de 491,95 N que es el valor mínimo presentado en el lote 1, las propiedades tendrán una reducción considerable determinando así la configuración más viable bajo cargas de flexión.

Tabla 17. Propiedades mecánicas del lote de núcleos de 3/8" fabricados en PLA con laminados en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Probeta	P_{max} [N]	F_s^{ult} [MPa]	F_s^{yield} [MPa]	σ_f [Mpa]	Código de Falla
1	390,645	0,33245	0,06321	24,93393	C-O-C
2	468	0,39828	0,05981	29,87132	C-O-C
3	300,023	0,25533	0,01764	19,14975	D-A-B
4	75,7563	0,06447	0,04644	4,83534	D-M-B
5	96,2025	0,08187	0,01163	6,14037	D-M-B
Promedio simple	266,12536	0,22648	0,03975	16,98614	-
Desviación estándar	175,01551	0,14894	0,02386	11,17082	-
Coefficiente de variación (%)	152,05815	65,76431	60,02796	65,76431	-

Como se mencionó inicialmente, dos especímenes presentaron el tipo de falla ideal para esta configuración de probetas ya que el objetivo de incorporar laminados de refuerzo en materiales compuestos es evitar la falla de los mencionados de tal manera que sea el núcleo el primer afectado ante la presencia de una carga, por esta razón se presenta para la probeta 1 y 2 el tipo de falla “C-O-C”, que indica un aplastamiento del núcleo fuera de la zona de la celda de carga.

7. Conclusiones.

- El lote de probetas sometidas a temperatura post-fabricación presentó en todos sus especímenes falla tipo “X” (explosiva), es decir que someter las probetas a 50°C durante una hora con un proceso de enfriamiento controlado luego de ser fabricadas, tiene influencia en el modo de falla puesto que el tipo presentado en los tres lotes restantes variaba entre X, M, D y C.
- El valor más alto de carga máxima y el promedio más alto correspondiente a la carga soportada por las probetas se encuentra en el lote de probetas con tamaño de celda de 3/8”, determinado así que las probetas de 3/8” son más resistentes a la flexión que las probetas de 1/4”.
- Los valores correspondientes al esfuerzo cortante último de los núcleos (F_s^{ult}) son similares para los tres lotes de probetas fabricadas completamente en PLA, al igual que el esfuerzo en las caras de las probetas (σ_f), sin embargo, la diferencia más amplia entre los tres lotes de probetas se encuentra en el esfuerzo cortante de fluencia de los núcleos (F_s^{yield}).
- La estructura celular tipo honeycomb con tamaño de celda de 3/8” presenta mejores valores en todas sus propiedades mecánicas que las probetas con tamaño de celda de 1/4”.
- La carga soportada está relacionada con el modo de falla debido a que los especímenes que soportaron cargas más bajas presentaron la ruptura del núcleo en la sección media del honeycomb a comparación de las probetas que fallaron por las paredes de la estructura celular obteniendo así valores más altos de carga soportada.
- Las probetas de núcleo de 3/8” son fabricados en menor tiempo que los especímenes de 1/4”, esto combinado con las mejores propiedades mecánicas reportadas, sugiere que la primera configuración es recomendada sobre la segunda al usuario.

- Para futuras pruebas mecánicas, los pegamentos empleados para adherir los laminados y núcleos deben tener un debido proceso de caracterización estandarizada para así asegurar la adherencia entre los componentes de la probeta.
- La fabricación de núcleos en PLA con laminados en fibra de carbono no es viable empleando el pegamento y procedimiento de adherencia descrito en este documento, puesto que los valores de carga máxima y demás propiedades del material presentaron valores muy inferiores a los determinados con los tres lotes de probetas fabricadas completamente en PLA.
- Al comparar el comportamiento mecánico de los especímenes en las gráficas obtenidas se evidenció que los tres lotes de probetas fabricadas completamente en PLA tienen comportamiento similar en la región elástica, sin embargo, el modo de falla de las probetas está relacionado al comportamiento de las curvas en la región plástica y la exposición a procesos de temperatura post-fabricación.
- El PLA, al ser un material sin trazabilidad y con las propiedades mecánicas determinadas en el trabajo de investigación, se encontró que no es viable su implementación en componentes sometidos a grandes cargas en la industria mecánica y aeroespacial.
- Las estructuras celulares tipo honeycomb fabricadas mediante técnicas de manufactura aditiva pueden ser empleadas en pequeñas aplicaciones como drones en las que en promedio la carga no sea superior a 490 N para 1/4" y 539 N para 3/8" sin procesos de temperatura post-fabricación a 50°C o más.

8. Recomendaciones.

- Para desarrollar el proceso de impresión se sugiere en primera instancia realizar pruebas con una sección del sólido a fabricar para así determinar que los parámetros configurados son los apropiados para la fabricación del elemento, de lo contrario corregir las fallas presentadas en la pieza.
- El almacenamiento de las probetas debe tener un control riguroso referente a la humedad y temperatura, preferiblemente evitando almacenar las probetas después de ser fabricadas durante largos periodo de tiempo, procurando desarrollar las pruebas destructivas una vez finaliza el proceso de impresión.
- En caso de transportar las probetas se debe evitar al máximo el roce y choque de los especímenes entre ellos o con el recipiente en el cual estén contenidas.
- Después de ser fabricados los especímenes debe evitarse la exposición a temperaturas mayores a 50°C ya que el elemento puede verse afectado macromolecularmente debido a la temperatura de transición vítrea.
- Para adherir los laminados de fibra de carbono a los núcleos se sugiere incorporar los laminados a los núcleos durante el proceso de curado del material compuesto.
- Durante las pruebas destructivas se recomienda marcar las probetas en la ubicación de los dos apoyos inferiores (para ensayos a flexión) para así alinearlas y ubicarlas de manera exacta en la máquina universal de ensayos.
- La velocidad de prueba empleada para la destrucción de las probetas debe ser baja ya que el PLA al ser un material más frágil que los metales y por lo tanto requiere de bajas velocidades para la obtención de puntos en la curva de fuerza vs. deflexión.
- En caso de replicar el experimento realizado en esta investigación se sugiere tomar el diseño de experimentos planteado en este documento como referente para determinar el número de probetas y fabricar.

9. Bibliografía

- 3M Scotch-Weld. (8 de Diciembre de 2019). *3M Scotch-Weld*. Obtenido de Scotch-Weld: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/All-3M-Products/?N=5002385+3293242436&preselect=8700101+8711017+3294857497&rt=rud
- Agudelo, D., Ibarra Hernández, A. F., Cruel Restrepo, C. A., Díaz Castaño, D. R., Montoya, M., & Hernandez, C. (2019). Caracterización de las propiedades mecánicas de probetas fabricadas bajo la técnica de modelado por deposición fundida. En E. Serna M, *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* (págs. 479-507). Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación.
- Agudelo, D., Merchan, F., Nieto, S., & Rodríguez, S. (2019). *Caracterización de las propiedades mecánicas a compresión de estructuras tipo sándwich con núcleo celular manufacturadas bajo técnica de deposición fundida*. Medellín: Editorial IAI.
- Albuquerque, A. J. (2014). *Optimización y caracterización de piezas de PLA fabricadas mediante técnicas aditivas*. Madrid.
- ASTM. (2016). *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM. (28 de Septiembre de 2018). *ASTM*. Obtenido de https://www.astm.org/ABOUT/full_overview.html
- ASTM, I. (2016). *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. Philadelphia: ASTM International.
- Baich, L., Manogharan, G., & Marie, H. (2015). *Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts*. Youngstown.
- Calle Guamantario, W. P. (2014). *Influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo coste*. Valencia.
- Cedillo, A. R. (2016). *Caracterización mecánica de piezas de PLA fabricadas mediante impresión 3D*. Ciudad de México.
- Costa, S., Duarte, F., & Covas, J. (2014). *Thermal conditions affecting heat transfer in FDM/FFE: a contribution towards the numerical modelling of the process*. Londres.
- Hedayati, R. (2016). *Mechanical properties of additively manufactured*. TUDelft.
- Hussain, M., Khan, R., & Abbas, N. (2019). *Experimental and computational studies on honeycomb sandwich structures under static and fatigue bending load*. Journal of King Saud University.
- Juárez, D., Balart, R., Peydró, M. Á., & Ferrándiz, S. (2012). *Estudio y Análisis del Moldeo por Inyección de Materiales Poliméricos Termoplásticos*. Valencia.
- Kover, A. (19 de Noviembre de 2018). *GE Reports*. Obtenido de <https://www.ge.com/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines/>
- Li, Q., Meisel, N., Williams, C., Batra, R., & Druschitz, A. (2015). *Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds*. Virginia.

- Luzanin, O., Guduric, V., Ristic, I., & Muhic, S. (2017). *Investigating impact of five build parameters on the maximum flexural force in FDM specimens—a definitive screening design approach*. Rapid Prototyping Journal.
- Marek, A., & Verney, V. (2016). *Photochemical reactivity of PLA at the vicinity of glass transition temperature. The photo-rheology method*. European Polymer Journal.
- Montgomery, D. (2004). Curvas de operación característica para el análisis de varianza del modelo con efectos aleatorios. En D. Montgomery, *Diseño de Experimentos* (pág. 656). México D.F.: Limusa Wiley.
- Muedra, A. N., & Segovia López, E. F. (2015). *Influencia del Ciclo de Curado en las Características a Cizalladura de Composites de Alto Gramaje con Resinas Vinil-uretano*. Valencia.
- Paczos, P., Wichniarek, R., & Magnucki, K. (2018). *Three-point bending of sandwich beam with special structure of the core*. Composite Structures.
- Pérez Cepeda, J. A. (2011). *Influencia de la microestructura en el comportamiento a desgaste abrasivo evaluado bajo la norma ASTM G 65 de depósitos de soldadura antidesgaste aplicados sobre sustratos de acero de baja aleación y bajo carbono*. Bogotá.
- Prusa, J. (18 de Agosto de 2018). *Prusa Research*. Obtenido de <https://www.prusa3d.com/about-us/>
- Rainer Christoph, R. M. (2016). *Manufactura Aditiva*. San Salvador: Realidad y reflexión.
- Rajpurohit, S., & Harshit, D. (2018). *Flexural strength of fused filament fabricated (FFF) PLA parts on an open-source 3D printer*. Shanghai : Advances in Manufacturing.
- Ryan, J., Espera, A., Chen, Q., & Advincula, R. (2018). *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Cleveland.
- Simplify3D. (18 de Agosto de 2018). Obtenido de <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- Simplify3D. (19 de Mayo de 2019). *Print Quality Troubleshooting Guide*. Obtenido de Simplify 3D: <https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>
- Torres, J., Cotelo, J., Karl, J., & Gordon, A. (2015). *Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear*. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society.
- Xiong, J., Ma, L., Pan, S., Papadopoulos, J., & Vaziri, A. (2012). *Shear and bending performance of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores*. Cambridge: Acta Materialia.
- Yu, W., Wang, X., Ferraris, E., & Zhang, J. (2019). *Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication*. Materials & Design.

ANEXO 1

Código para Generación de *Honeycomb* Hexagonal en OpenSCAD.

```
cellrad = 6; //Tamaño de celda en mm.
cellheight = 20; //Altura de la celda de honeycomb.
cellthick = 0.8; //Espesor de la pared del honeycomb.
rows = 6; //Número de filas.
cols = 5; //Número de columnas.
//Generación de geometría.
module closedcell(radius,height,thickness) {
    difference() {
        cylinder(r=radius,h=height,$fn=6);
        for (i=[-1:1]) {
            translate([0,0,height]) rotate([0,-30,i*120])
            flatcube(cellrad*3,cellrad*3,10);
        }
        translate([0,0,-1])
        difference() {
            cylinder(r=radius-thickness,h=height-thickness,$fn=6);
            for (i=[-1:1]) {
                translate([0,0,height-thickness]) rotate([0,-30,i*120])
                flatcube(cellrad*3,cellrad*3,10);
            }
        }
    }
}
```

ANEXO 2

Planos Dimensionales de Probetas Fabricadas Mediante Técnicas de Manufactura Aditiva.

ANEXO 3

Tablas de Control Dimensional para Elementos Fabricados Mediante Impresión 3D.

Con el fin de tener un mayor control dimensional de las probetas fabricadas se determinó cierta de cantidad de toma de medidas para cada espécimen para así obtener las dimensiones generales de las probetas fabricadas. Para las probetas de tamaño de celda de 1/4" fabricadas completamente en PLA se realizó la toma de medida once veces por espécimen como se indica en la figura 1 (cuadros rojos) para el ancho y dos para el largo como se ilustra con los cuadros azules de la misma figura.

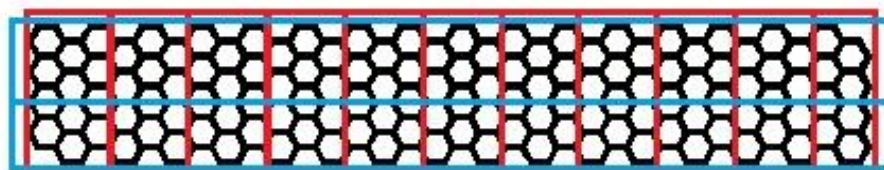


Figura 1. Secciones de control dimensional para los especímenes de 1/4".

Fuente: Autores.

En lo que a lo especímenes de 3/8" concierne, la división de las probetas para el control dimensional se realizó de tal manera que la toma de medida horizontal se realizó dos veces igual que con el tamaño de celda anterior, sin embargo, estas probetas al estar compuestas por una cantidad de celdas menor, se realizaron siete medidas para así determinar el ancho correspondiente de las probetas como se evidencia en la figura 2.

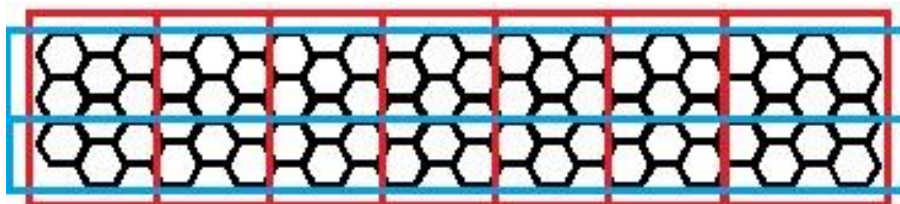


Figura 2. Secciones de control dimensional para los especímenes de 3/8".

Fuente: Autores.

Finalmente, para el control dimensional de los laminados de las probetas fabricadas completamente en PLA se realizó la toma de medida del espesor en cada una de sus

esquinas; a continuación, se presentan las tablas correspondientes a la toma de las medidas mencionadas anteriormente para cada una de las probetas.

Tabla 2. Toma de medidas para los espécimenes 1, 2 y 3 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	32,76	17	200,89	32,75	17	200,89	32,75	17	200,89
2	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89	32,74	17	200,89
3	32,76	17	-	32,76	17	-	32,76	17	-
4	32,77	17	-	32,77	17	-	32,77	17	-
5	32,76	17	-	32,78	17	-	32,76	17	-
6	32,76	17	-	32,76	17	-	32,76	17	-
7	32,75	17	-	32,77	17	-	32,76	17	-
8	32,76	17	-	32,78	17	-	32,78	17	-
9	32,76	17	-	32,75	17	-	32,75	17	-
10	32,76	17	-	32,76	17	-	32,77	17	-
11	32,76	17	-	32,72	17	-	32,76	17	-
Medida promedio	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89

Tabla 2. Toma de medidas para los especímenes 4, 5 y 6 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

	Probeta 4			Probeta 5			Probeta 6		
Sección	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	32,76	17	200,89	32,75	17	200,89	32,74	17	200,89
2	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89
3	32,76	17	-	32,77	17	-	32,76	17	-
4	32,77	17	-	32,76	17	-	32,77	17	-
5	32,76	17	-	32,76	17	-	32,76	17	-
6	32,76	17	-	32,75	17	-	32,76	17	-
7	32,75	17	-	32,78	17	-	32,77	17	-
8	32,76	17	-	32,76	17	-	32,76	17	-
9	32,76	17	-	32,77	17	-	32,76	17	-
10	32,76	17	-	32,76	17	-	32,77	17	-
11	32,76	17	-	32,74	17	-	32,75	17	-
Medida promedio [mm]	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89

Tabla 3. Toma de medidas para los especímenes 7 y 8 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 7			Probeta 8		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89
2	32,76	17	200,89	32,77	17	200,89
3	32,76	17	-	32,77	17	-
4	32,77	17	-	32,74	17	-
5	32,76	17	-	32,76	17	-
6	32,76	17	-	32,76	17	-
7	32,75	17	-	32,74	17	-
8	32,76	17	-	32,76	17	-
9	32,76	17	-	32,75	17	-
10	32,76	17	-	32,78	17	-
11	32,76	17	-	32,77	17	-
Medida promedio [mm]	32,76	17	200,89	32,76	17	200,89

Tabla 4. Toma de medidas para los especímenes 1,2 y 3 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,69	17	200,37	36,73	17	200,37	36,74	17	200,37
2	36,72	17	200,37	36,76	17	200,37	36,72	17	200,37
3	36,75	17	-	36,61	17	-	36,68	17	-
4	36,73	17	-	36,78	17	-	36,67	17	-
5	36,69	17	-	36,71	17	-	36,73	17	-
6	36,73	17	-	36,72	17	-	36,76	17	-
7	36,73	17	-	36,73	17	-	36,74	17	-
Medida promedio	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37

Tabla 5. Toma de medidas para los especímenes 4,5 y 6 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 4			Probeta 5			Probeta 6		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,74	17	200,37	36,72	17	200,37	36,69	17	200,37
2	36,69	17	200,37	36,76	17	200,37	36,72	17	200,37
3	36,72	17	-	36,75	17	-	36,69	17	-
4	36,71	17	-	36,72	17	-	36,73	17	-
5	36,71	17	-	36,71	17	-	36,75	17	-
6	36,74	17	-	36,68	17	-	36,74	17	-
7	36,73	17	-	36,7	17	-	36,72	17	-
Medida promedio	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37

Tabla 6. Toma de medidas para los especímenes 7 y 8 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 7			Probeta 8		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,72	17	200,37	36,68	17	200,37
2	36,7	17	200,37	36,74	17	200,37
3	36,73	17	-	36,72	17	-
4	36,69	17	-	36,68	17	-
5	36,72	17	-	36,74	17	-
6	36,74	17	-	36,75	17	-
7	36,74	17	-	36,73	17	-
Medida promedio	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37

Tabla 7. Toma de medidas para los especímenes 1, 2 y 3 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,7	17	200,37	36,69	17	200,37	36,72	17	200,37
2	36,73	17	200,37	36,73	17	200,37	36,73	17	200,37
3	36,72	17	-	36,74	17	-	36,76	17	-
4	36,74	17	-	36,71	17	-	36,78	17	-
5	36,72	17	-	36,7	17	-	36,71	17	-
6	36,74	17	-	36,74	17	-	36,72	17	-
7	36,69	17	-	36,73	17	-	36,62	17	-
Medida promedio	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37

Tabla 8. Toma de medidas para los especímenes 4, 5 y 6 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 4			Probeta 5			Probeta 6		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,73	17	200,37	36,74	17	200,37	36,73	17	200,37
2	36,72	17	200,37	36,74	17	200,37	36,69	17	200,37
3	36,71	17	-	36,72	17	-	36,7	17	-
4	36,7	17	-	36,68	17	-	36,73	17	-
5	36,73	17	-	36,67	17	-	36,73	17	-
6	36,72	17	-	36,76	17	-	36,73	17	-
7	36,73	17	-	36,73	17	-	36,73	17	-
Medida promedio	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37	36,72	17	200,37

Tabla 9. Toma de medidas para los especímenes 1, 2 y 3 del lote de 3/8" núcleos para lamando fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,75	15	200,37	36,71	15	200,37	36,75	15	200,37
2	36,74	15	200,37	36,74	15	200,37	36,68	15	200,37
3	36,61	15	-	36,68	15	-	36,74	15	-
4	36,78	15	-	36,72	15	-	36,71	15	-
5	36,73	15	-	36,72	15	-	36,68	15	-
6	36,72	15	-	36,74	15	-	36,73	15	-
7	36,71	15	-	36,73	15	-	36,75	15	-
Medida promedio	36,72	15	200,37	36,72	15	200,37	36,72	15	200,37

Tabla 10. Toma de medidas para los especímenes 4 y 5 del lote de 3/8" núcleos para lamiando fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Sección	Probeta 4			Probeta 5		
	Ancho	Alto	Largo	Ancho	Alto	Largo
1	36,72	15	200,37	36,7	15	200,37
2	36,7	15	200,37	36,73	15	200,37
3	36,69	15	-	36,72	15	-
4	36,73	15	-	36,69	15	-
5	36,73	15	-	36,74	15	-
6	36,75	15	-	36,72	15	-
7	36,72	15	-	36,74	15	-
Medida promedio	36,72	15	200,37	36,72	15	200,37

Tabla 13. Control dimensional del primer espécimen del lote de 1/4".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		29 de noviembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 25 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		1 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 14. Control dimensional del segundo espécimen del lote de 1/4".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		3 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 26 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		2 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 13.. Control dimensional del tercer espécimen del lote de 1/4”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		4 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 26 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		3 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 15. Control dimensional del cuarto espécimen del lote de 1/4”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		10 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 24 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		4 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 16. Control dimensional del quinto espécimen del lote de 1/4”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		12 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 25 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		5 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 17. Control dimensional del sexto espécimen del lote de 1/4".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		13 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 24 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		6 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 18. Control dimensional del séptimo espécimen del lote de 1/4".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		19 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 25 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		7 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 19. Control dimensional del octavo espécimen del lote de 1/4”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		20 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		8 horas y 25 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	X	-
Peso del elemento	29,47 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		8 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 110. Control dimensional del primer espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		7 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		1 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 20. Control dimensional del segundo espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		11 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		2 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 21. Control dimensional del tercer espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		20 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		3 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 22. Control dimensional del cuarto espécimen del lote de 3/8”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		3 de febrero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		4 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 23. Control dimensional del quinto espécimen del lote de 3/8”.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		15 de febrero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4”	3/8”
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4” 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4” 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8” 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4” 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4” 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8” 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		5 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 24. Control dimensional del sexto espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		21 de febrero del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 1 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		6 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 25. Control dimensional del séptimo espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		3 de marzo del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		7 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 26. Control dimensional del octavo espécimen del lote de 3/8".

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		5 de marzo del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		8 de 8	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía.			

Tabla 27. Control dimensional del primer espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		1 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		1 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 28. Control dimensional del segundo espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		3 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 1 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		2 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 211. Control dimensional del tercer espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		4 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		3 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 30. Control dimensional del cuarto espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		8 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		4 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 31. Control dimensional del quinto espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		9 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 0 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		5 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 32. Control dimensional del sexto espécimen del lote de 3/8" sometido a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		20 de abril del 2019	
Tiempo de impresión		7 horas y 2 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
-	X	-	X
Peso del elemento	29,42 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		6 de 6	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Este espécimen fue sometido a tratamiento térmico y sus dimensiones no presentaron variación con a la temperatura empleada en el proceso.			

Tabla 33. Control dimensional del primer núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		21 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		1 de 5	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Al finalizar el proceso de curado del pegamento el espécimen presentó una deformación (curvatura) razón por la cual de desechó.			

Tabla 34. Control dimensional del segundo núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		22 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		2 de 5	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Al finalizar el proceso de curado del pegamento el espécimen presentó una deformación (curvatura) razón por la cual de desechó.			

Tabla 35. Control dimensional del tercer núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		27 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		-	X
Cantidad		No aplica.	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía, sin embargo, al realizar el control calidad de la probeta y evidenciar la falla el espécimen fue desechado.			

Tabla 36. Control dimensional del cuarto núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		28 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		6 horas y 9 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		3 de 5	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Al finalizar el proceso de curado del pegamento el espécimen presentó una deformación (curvatura) razón por la cual de desechó.			

Tabla 37. Control dimensional del quinto núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		30 de diciembre del 2018	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		-	X
Cantidad		No aplica.	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía, sin embargo, al realizar el control calidad de la probeta y evidenciar la falla el espécimen fue desechado.			

Tabla 38. Control dimensional del sexto núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		3 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		6 horas y 9 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 36,72mm (± 0,254mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm (± 0,254mm)		X	-
@3/8" 200,37mm (± 0,254mm)			
Alto			
@1/4" 15mm (± 0,25mm)		X	-
@3/8" 15mm (± 0,25mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm (± 0,25mm)		-	-
@3/8" 1mm (± 0,25mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		4 de 5	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Al finalizar el proceso de curado del pegamento el espécimen presentó una deformación (curvatura) razón por la cual de desechó.			

Tabla 39. Control dimensional del séptimo núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		4 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		-	X
Cantidad		No aplica.	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía, sin embargo, al realizar el control calidad de la probeta y evidenciar la falla el espécimen fue desechado.			

Tabla 40. Control dimensional del séptimo núcleo del lote de 3/8" laminado con fibra de carbono y curado en horno a 50°C.

Fuente: Autores.

Fecha de impresión		5 de enero del 2019	
Tiempo de impresión		6 horas y 8 minutos	
Tipo de impresión		Diámetro de celda	
Núcleo	Núcleo laminado	1/4"	3/8"
X	-	-	X
Peso del elemento	16,23 gr		
Características dimensionales		SI	NO
Ancho			
@1/4" 32,76 mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)			
Largo			
@1/4" 200,89mm ($\pm 0,254$ mm)		X	-
@3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)			
Alto			
@1/4" 15mm ($\pm 0,25$ mm)		X	-
@3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)			
Espesor del laminado			
@1/4" 1mm ($\pm 0,25$ mm)		-	-
@3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)			
Cara superior plana		X	-
Cara inferior plana		X	-
Cantidad		5 de 5	
Notas:			
La remoción de la pieza de la cama de impresión no presentó ninguna anomalía. Al finalizar el proceso de curado del pegamento el espécimen presentó una deformación (curvatura) razón por la cual de desechó.			

ANEXO 4

Tablas de Control dimensional de Laminados Fabricados En Fibra de Carbono

Tabla 1. Control dimensional del primer laminado en fibra de carbono

.Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	1 de 10	

Tabla 2. Control dimensional del segundo laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	2 de 10	
Notas: El laminado uno y dos se destinaron para la probeta número 1 del lote.		

Tabla 3. Control dimensional del tercer laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,05 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	3 de 10	

Tabla 4. Control dimensional del cuarto laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	4 de 10	
Notas: El laminado tres y cuatro se destinaron para la probeta número 2 del lote.		

Tabla 5. Control dimensional del quinto laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,07 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm (± 0,254mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm (± 0,254mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm (± 0,25mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm (± 0,25mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	5 de 10	

Tabla 6. Control dimensional del sexto laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	6 de 10	
Notas: El laminado cinco y seis se destinaron para la probeta número 3 del lote.		

Tabla 7. Control dimensional del séptimo laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	7 de 10	

Tabla 8. Control dimensional del octavo laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,07 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	8 de 10	
Notas: El laminado siete y ocho se destinaron para la probeta número 4 del lote.		

Tabla 9. Control dimensional del noveno laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,05 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	9 de 10	

Tabla 10. Control dimensional del décimo laminado en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Peso del laminado	11,06 gr	
Características dimensionales	SI	NO
Ancho 3/8" 36,72mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Largo @3/8" 200,37mm ($\pm 0,254$ mm)	X	-
Alto @3/8" 15mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Espesor del laminado @3/8" 1mm ($\pm 0,25$ mm)	X	-
Cara superior plana	X	-
Cara inferior plana	X	-
Cantidad	10 de 10	
Notas: El laminado nueve y diez se destinaron para la probeta número 5 del lote.		

ANEXO 5

Tablas de Control dimensional de la Adherencia Entre los Laminados Fabricados En Fibra de Carbono y los Núcleos Fabricados en PLA.

El procedimiento de adherencia entre laminados y núcleos inicio con una limpieza a los laminados removiendo así cualquier posible suciedad o residuo producto del corte de los mencionados; seguido de eso se procedió a realizar la mezcla del pegamento Scotch-Weld DP 420, el cual se mezcla en las proporciones entregadas por el dispensador, razón por la cual no es necesario calcular la cantidad de resina ni endurecedor a emplear, sin embargo, si es necesario tener un control de la cantidad a emplear para el proceso de adherencia, razón por la cual se decidió mesar los laminados cada vez que se aplicara la capa de pegamento con el fin de aplicar la misma cantidad de pegamento en los laminados superiores e inferiores como se evidencia en las tablas presentadas a continuación. Una vez era aplicada la cantidad exacta de pegamento se distribuía a lo largo del laminado de manera uniforme con el aplicador del pegamento, obteniendo una capa continua en la superficie del laminado que era verificada mediante una inspección visual observando así de perfil el laminado con el fin de identificar zonas en las que no estuviera distribuido el pegamento uniformemente y lograr así la cobertura total, procediendo así a la incorporación del núcleo hasta finalizar el tiempo de curado del pegamento y por último incorporar el laminado restante como se indica en los tiempos de las tablas de este anexo.

Tabla 1. Control dimensional de la adherencia entre núcleo y laminados de la probeta 1.

Fuente: Autores.

Probeta 1	
Fecha de: inicio de adherencia del laminado inferior	21 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado inferior	22 de noviembre del 2019
Peso de: núcleo + laminado + pegamento	29,69 gr.
Fecha de: inicio de adherencia del laminado superior	23 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado superior	24 de noviembre del 2019
Peso total	43,09 gr

Tabla 2. Control dimensional de la adherencia entre núcleo y laminados de la probeta 2.

Fuente: Autores.

Probeta 2	
Fecha de: inicio de adherencia del laminado inferior	21 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado inferior	22 de noviembre del 2019
Peso de: núcleo + laminado + pegamento	29,69 gr.
Fecha de: inicio de adherencia del laminado superior	23 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado superior	24 de noviembre del 2019
Peso total	43,08 gr

Tabla 3. Control dimensional de la adherencia entre núcleo y laminados de la probeta 3.

Fuente: Autores.

Probeta 3	
Fecha de: inicio de adherencia del laminado inferior	25 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado inferior	26 de noviembre del 2019
Peso de: núcleo + laminado + pegamento	29,68 gr.
Fecha de: inicio de adherencia del laminado superior	27 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado superior	28 de noviembre del 2019
Peso total	43,09 gr

Tabla 4. Control dimensional de la adherencia entre núcleo y laminados de la probeta 4.

Fuente: Autores.

Probeta 4	
Fecha de: inicio de adherencia del laminado inferior	25 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado inferior	26 de noviembre del 2019
Peso de: núcleo + laminado + pegamento	29,7 gr.
Fecha de: inicio de adherencia del laminado superior	27 de noviembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado superior	28 de noviembre del 2019
Peso total	43,07 gr

Tabla 5. Control dimensional de la adherencia entre núcleo y laminados de la probeta 5.

Fuente: Autores.

Probeta 5	
Fecha de: inicio de adherencia del laminado inferior	1 de diciembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado inferior	2 de diciembre del 2019
Peso de: núcleo + laminado + pegamento	29,69 gr.
Fecha de: inicio de adherencia del laminado superior	3 de diciembre del 2019
Fecha de: fin de adherencia del laminado superior	4 de diciembre del 2019
Peso total	43,09 gr

ANEXO 6

Gráficas Correspondientes al *Offset* del 2% para cada Probeta y Tablas de Datos para Propiedades Mecánicas.

Lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4”.

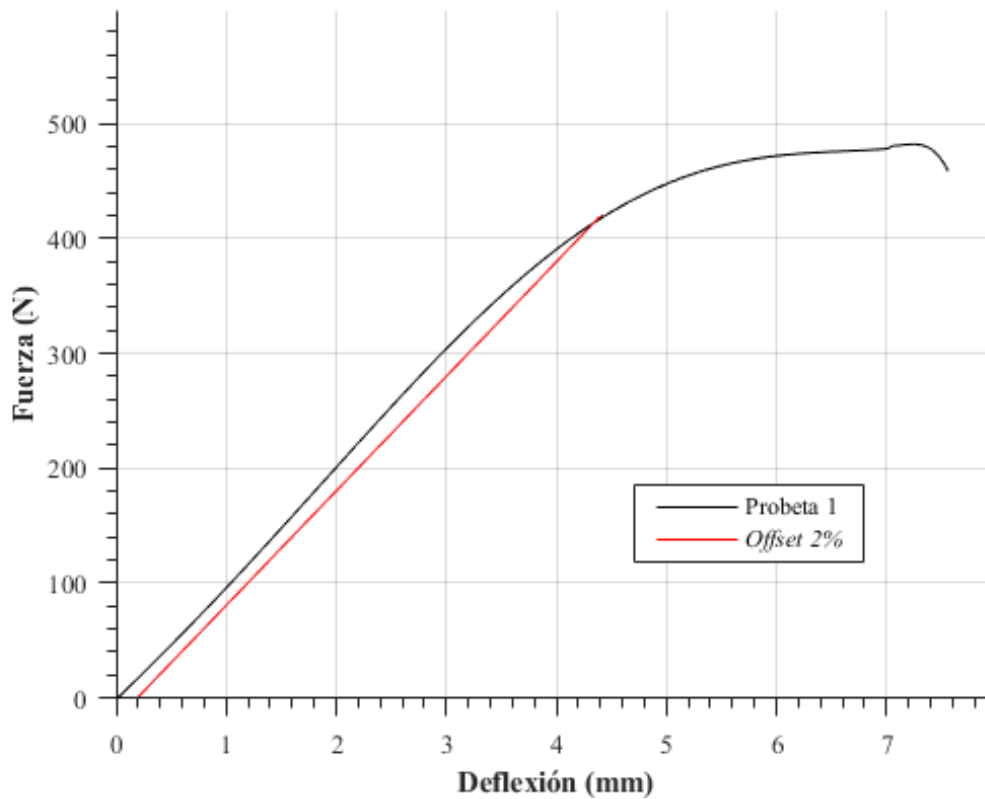


Figura 1. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 1 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4”.

Fuente: Autores.

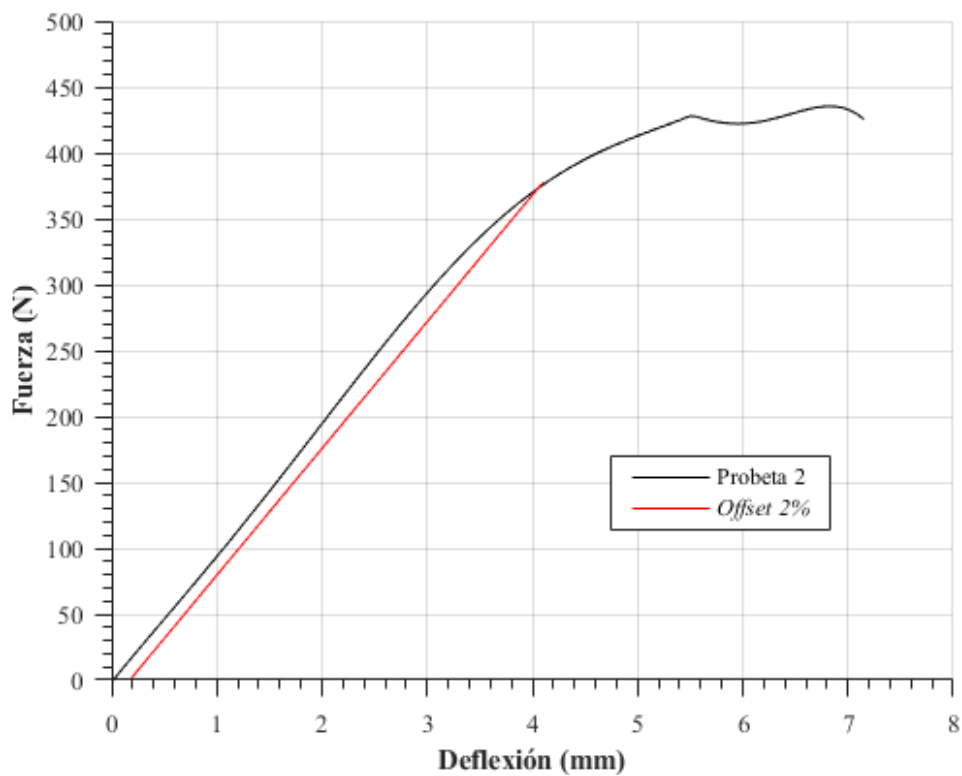


Figura 2. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 2 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

La siguiente gráfica (figura 3) correspondiente a la probeta número 3 del lote de 1/4" fabricada completamente en PLA presenta en la sección inicial un comportamiento erróneo, razón por la cual fue necesario emplear el procedimiento descrito en el capítulo 6 del documento, obteniendo, así como resultado la tabla 1 de este anexo.

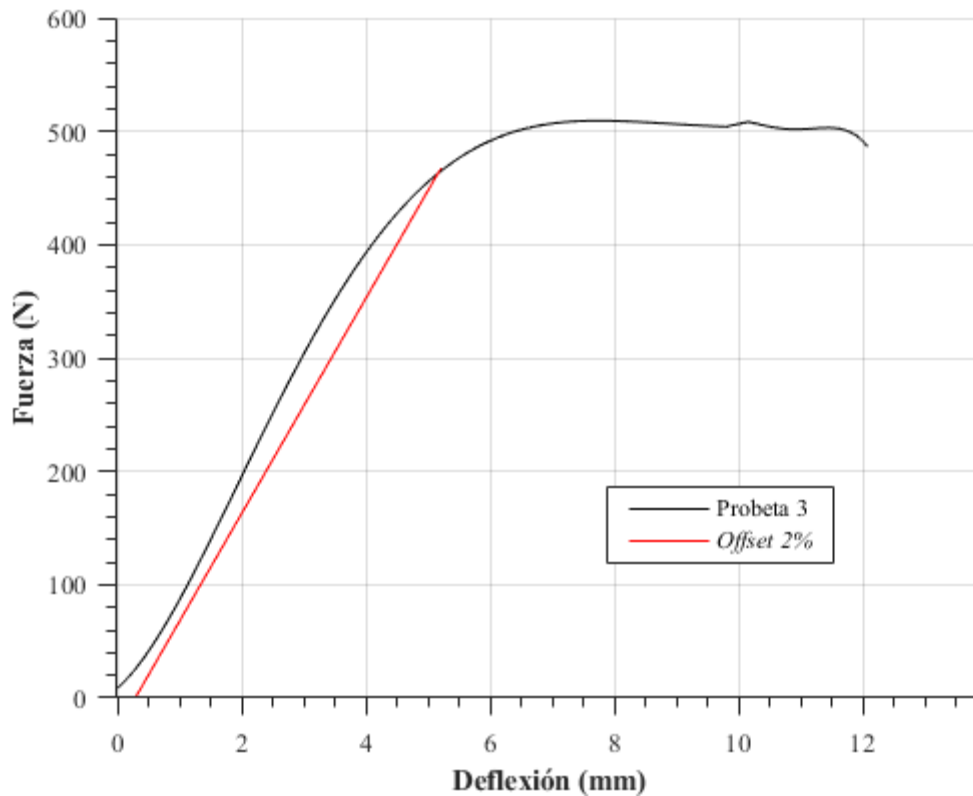


Figura 3. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión no válida la probeta 3 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

Tabla 1. Datos para la corrección de la gráfica de la probeta 3 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

	e	σ
Punto 2	3	307,908
Punto 1	2	195,427
Punto 0	0,2625777	0

Empleando el factor de corrección determinado en la tabla 1, es decir ϵ_0 , se procedió a restar ese valor a los demás de la gráfica logrando así el desplazamiento del eje y como resultado la figura 4.

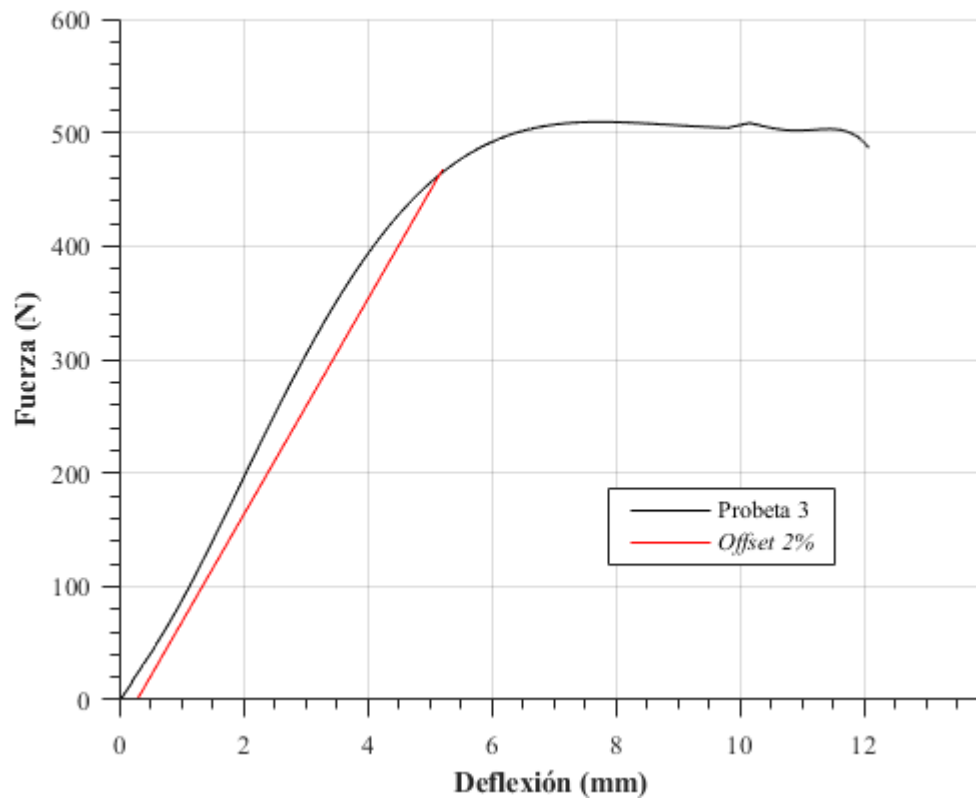


Figura 4. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 3 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

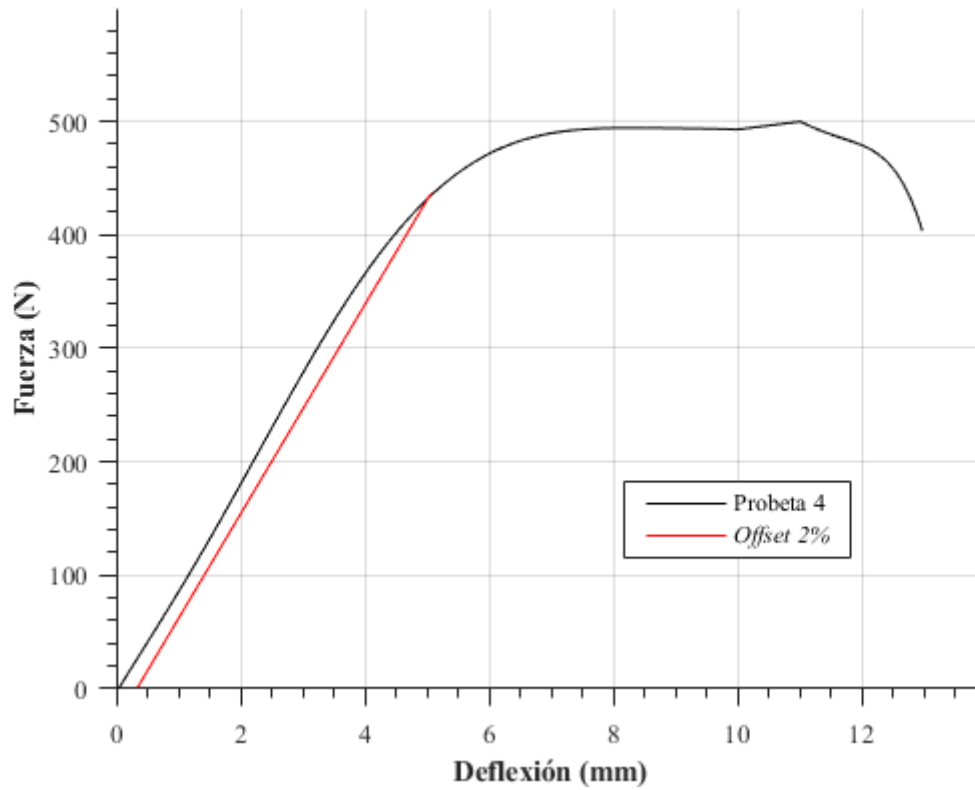


Figura 5. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 4 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

Al igual que con la probeta tres, en este caso para la cinco, fue necesario realizar corrección de la gráfica obteniendo la tabla dos para así finalmente corregir la figura 6 obteniendo como resultado la figura 7.

Tabla 2. Datos para la corrección de la gráfica de la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

	e	σ
Punto 2	3	331,868
Punto 1	1	98,901
Punto 0	0,1509441	0

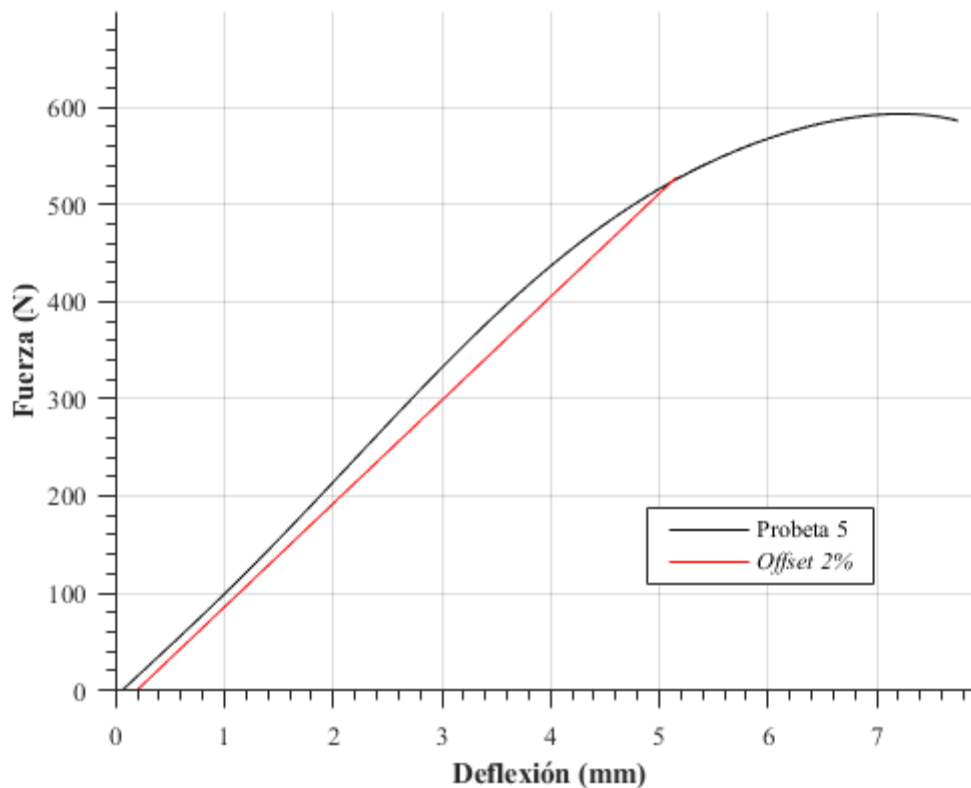


Figura 6. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión no válida la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

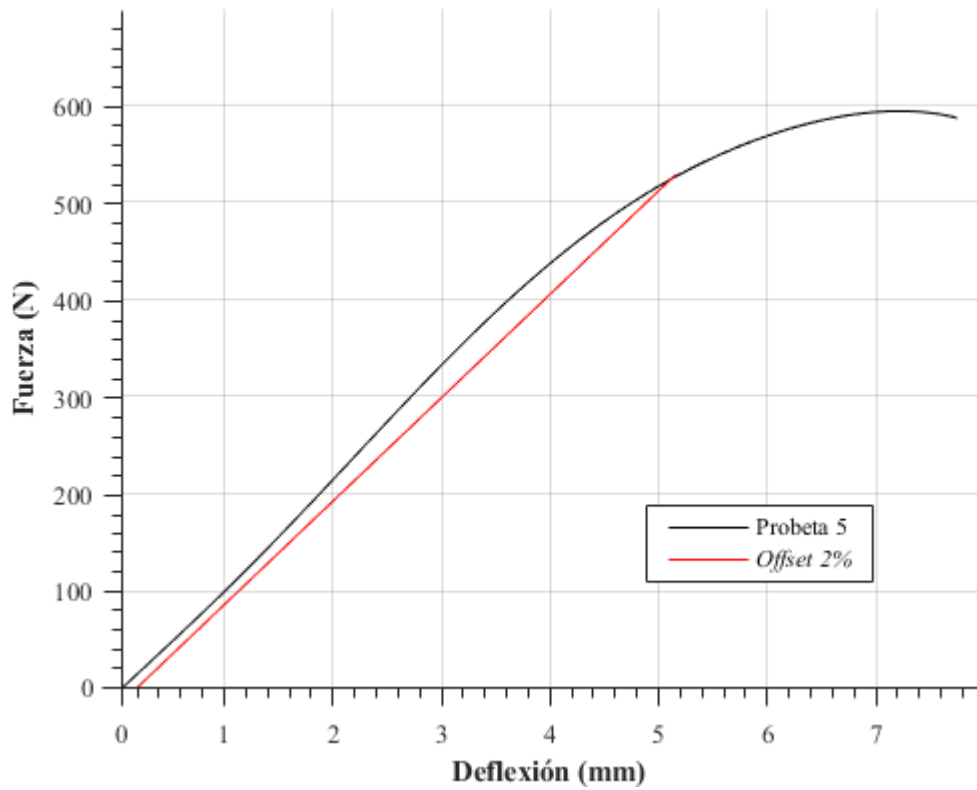


Figura 7. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

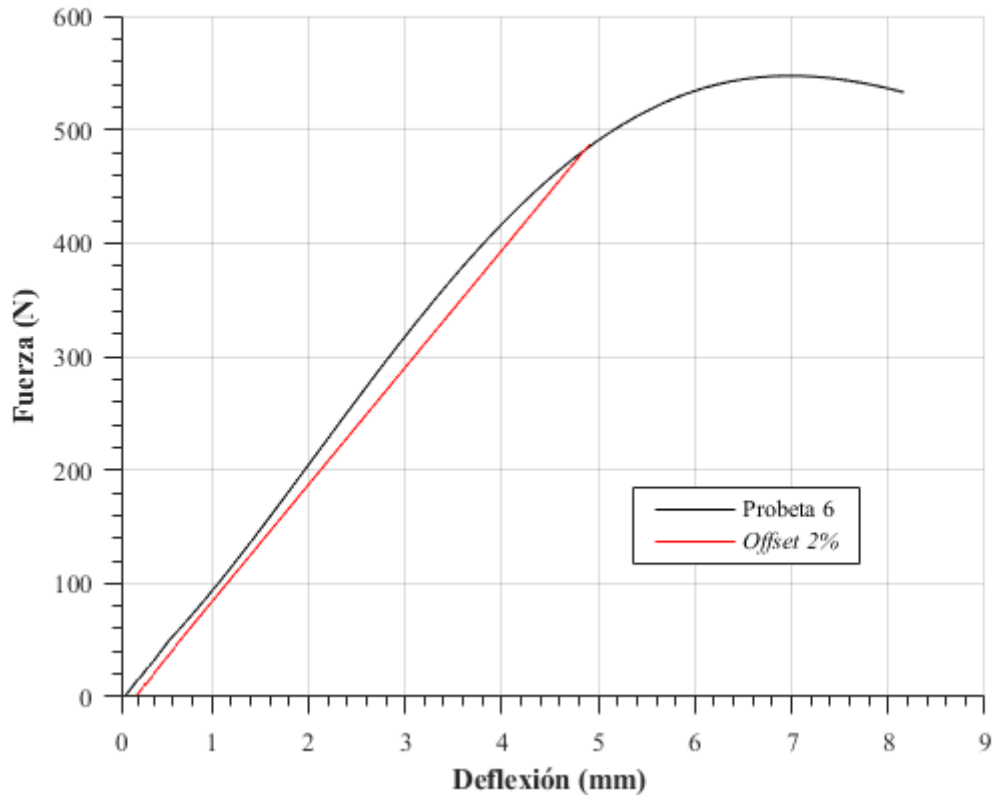


Figura 8. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 6 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

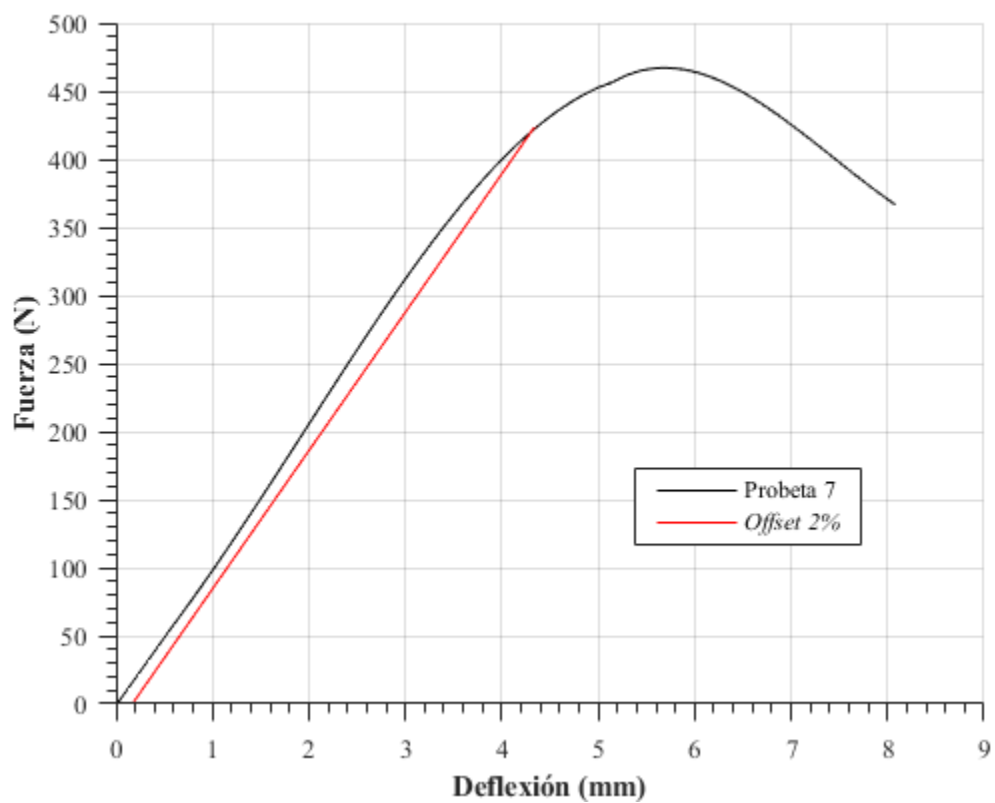


Figura 9. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 7 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4".

Fuente: Autores.

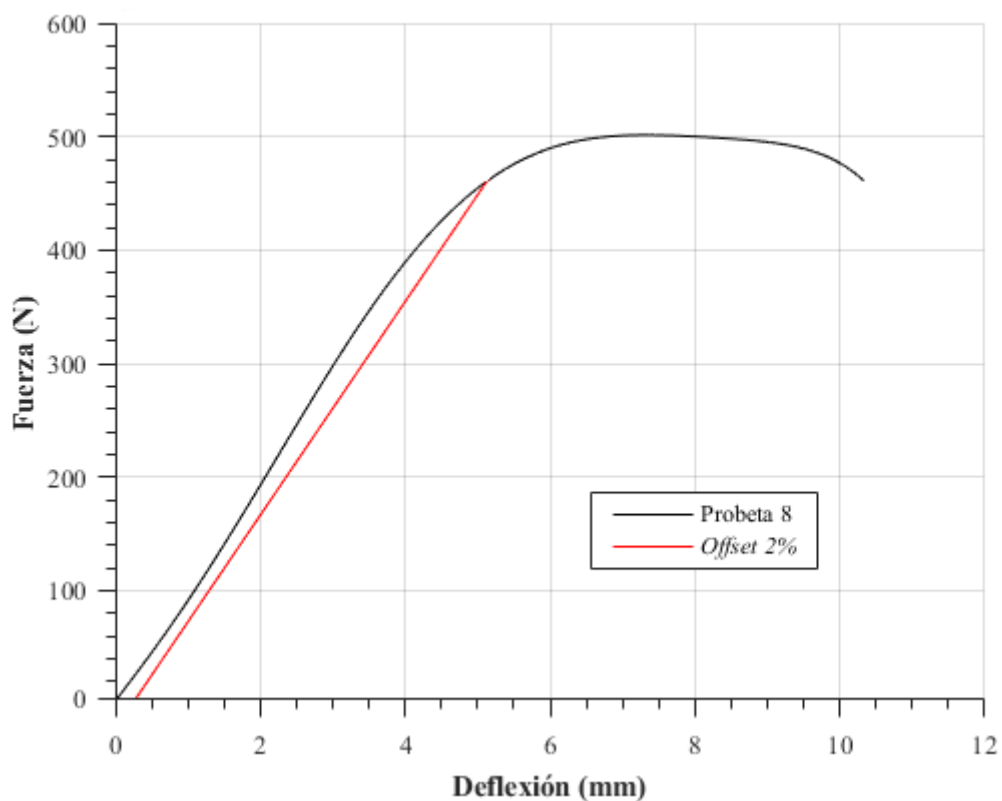


Figura 10. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 8 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4”.

Fuente: Autores.

Tabla 3. Datos de propiedades mecánicas de fuerza de aplastamiento y offset del 2% para el lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 1/4”.

Fuente: Autores

Probeta	Offset 2% [mm]	P_{yield} [N]
1	0,1512	412,5045
2	0,143	371,1428
3	0,2416	462,6859
4	0,2594	430,4337
5	0,155	521,7561
6	0,1632	480,0164
7	0,1616	419,2176
8	0,2066	459,3099

Lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

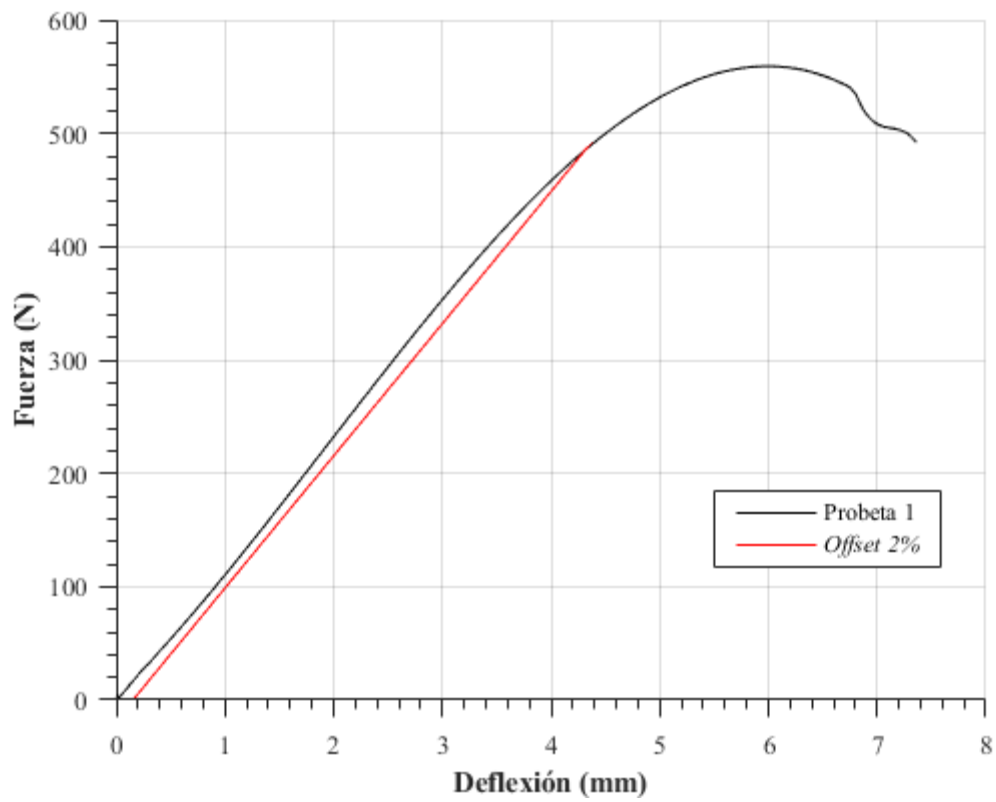


Figura 11. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 1 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

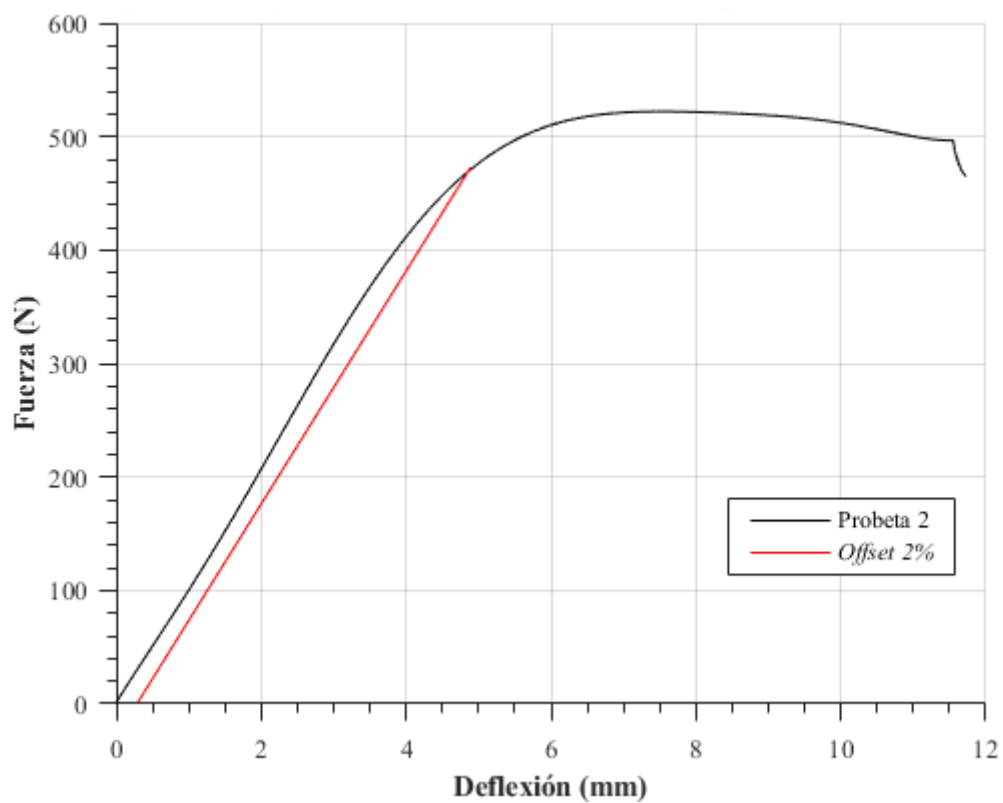


Figura 12. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 2 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

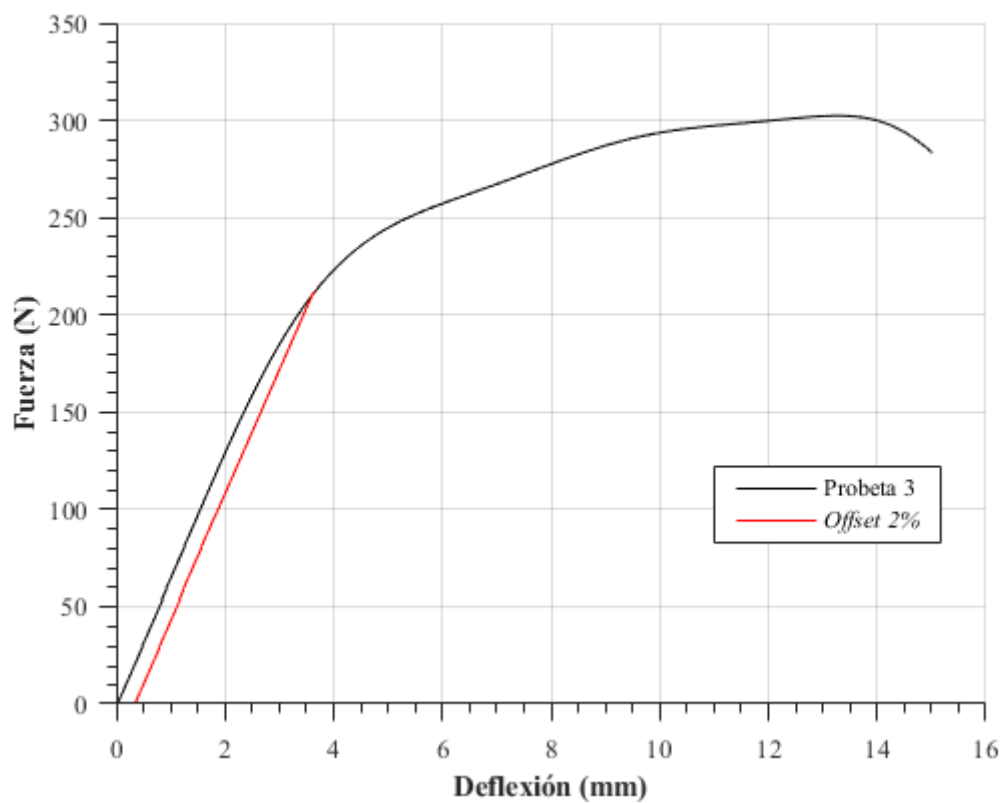


Figura 13. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 3 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

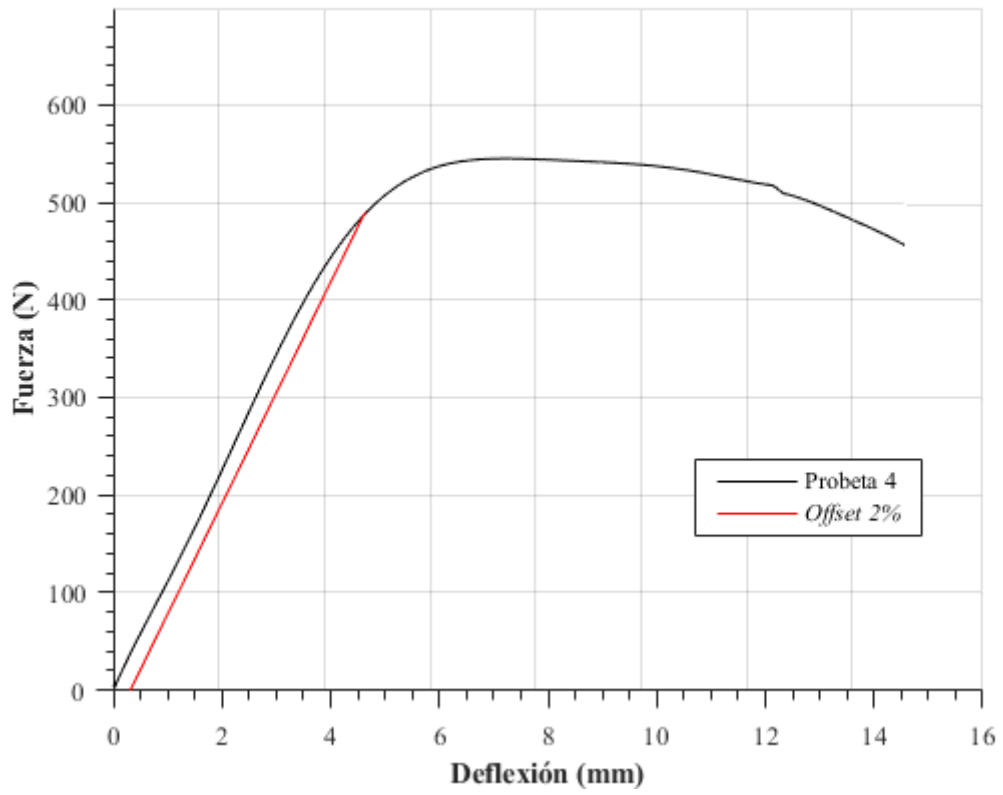


Figura 14. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 4 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

Para la gráfica obtenida de esta probeta es necesario realizarle el mismo proceso de corrección mencionado anteriormente obteniendo así la siguiente tabla:

Tabla 4. Datos para la corrección de la gráfica de la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

	e	σ
Punto 2	2	191,673
Punto 1	1	85,698
Putno 0	0.1913376	0

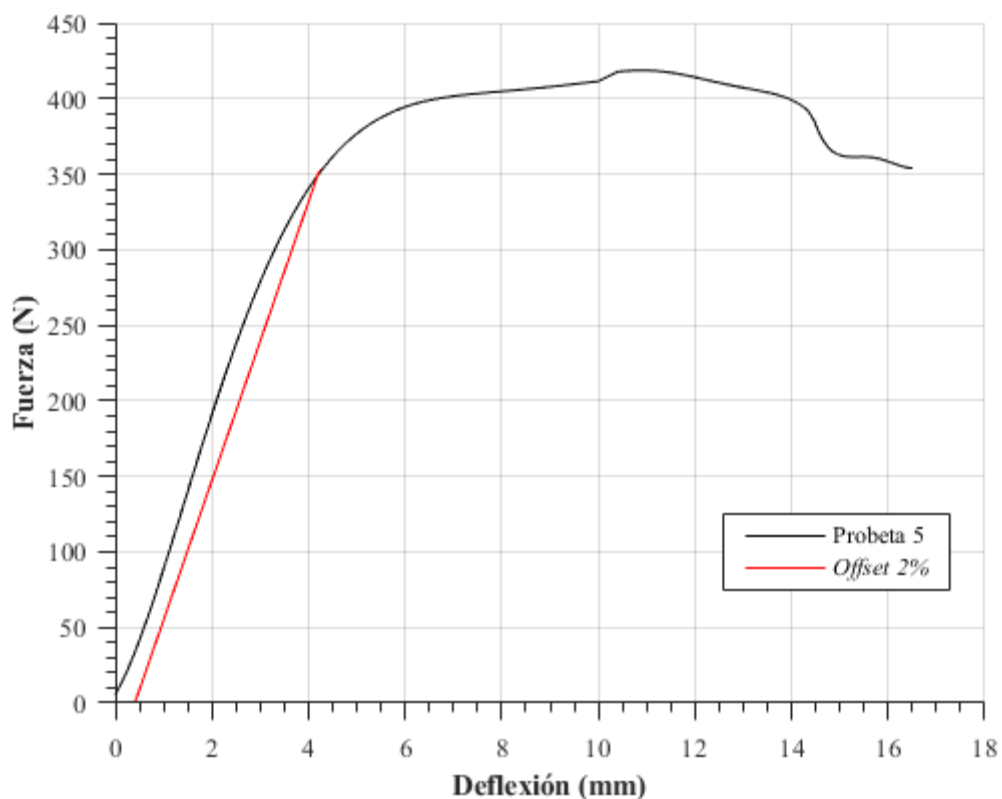


Figura 15. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

Ya con el valor de corrección es posible pasar de la figura 15 que no es válida, a la figura 16, que será la empleada para los cálculos y determinar así las propiedades mecánicas de ese espécimen.

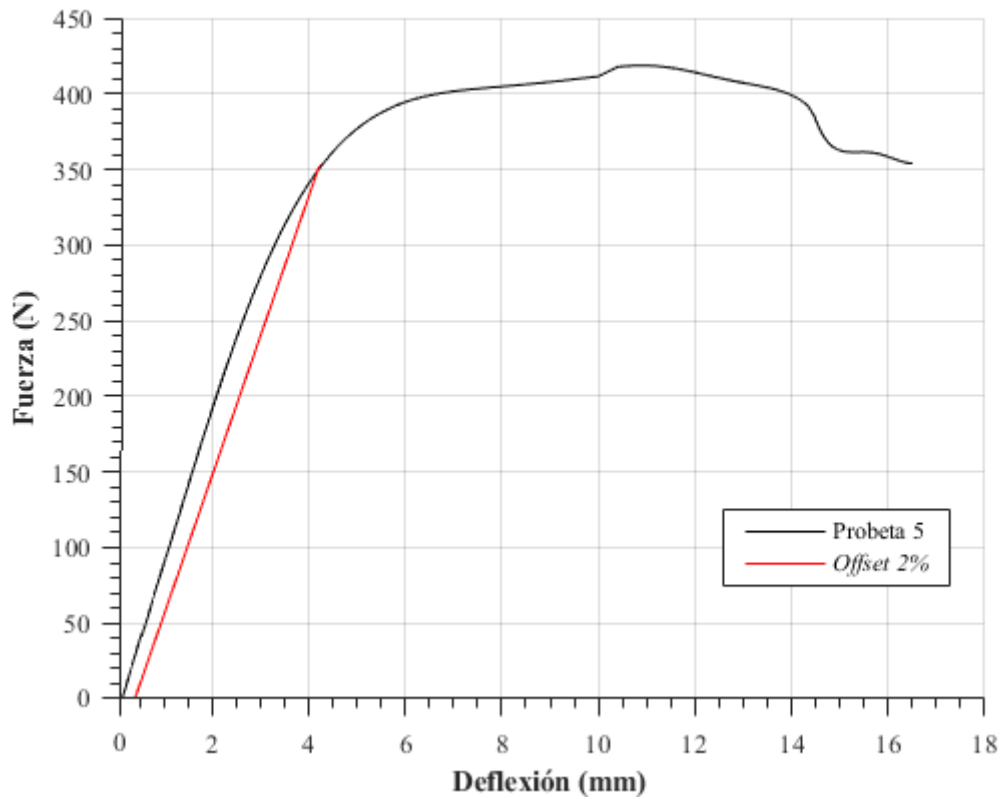


Figura 16. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 6 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

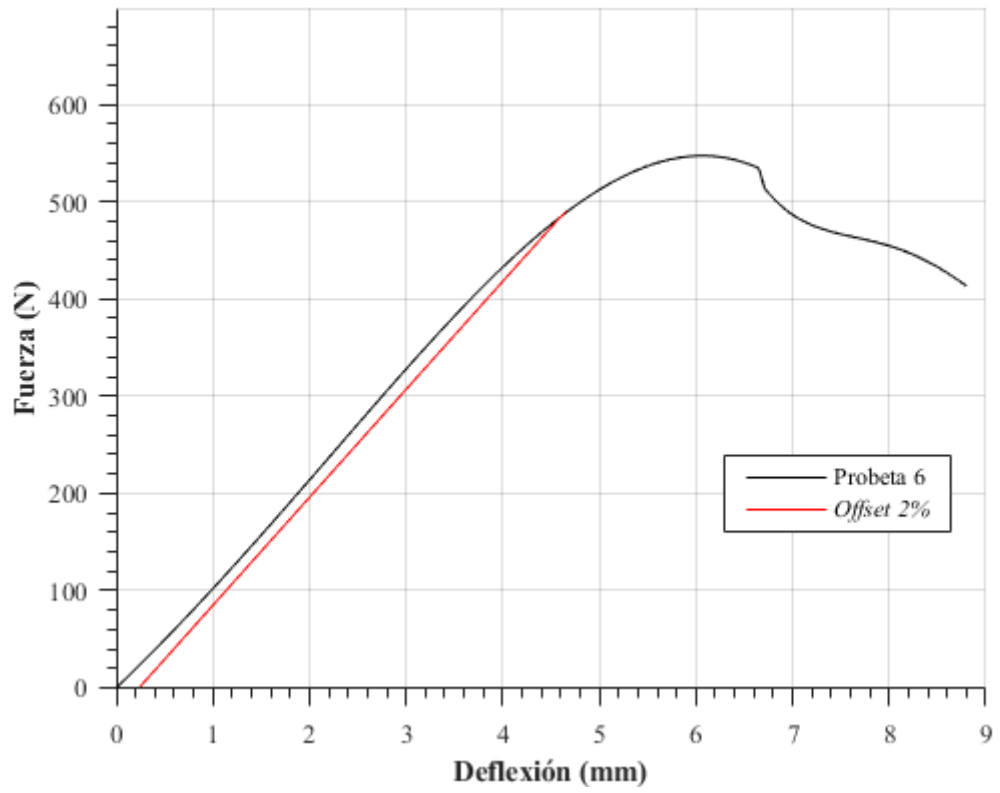


Figura 17. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 6 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

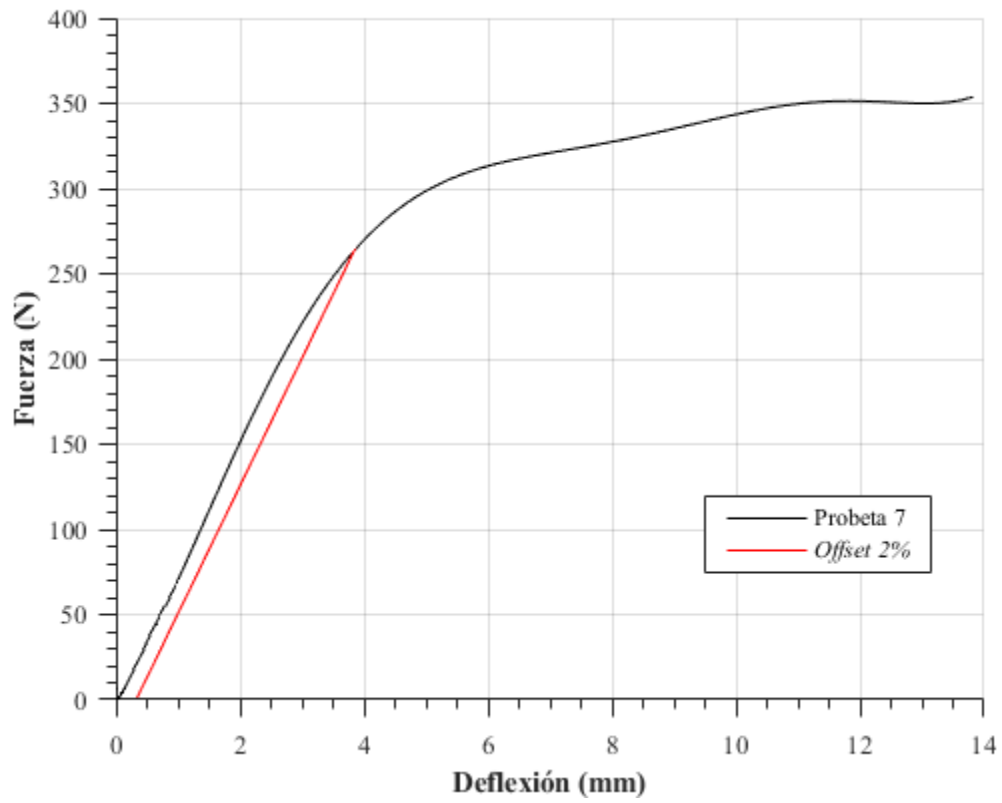


Figura 18. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 7 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8".

Fuente: Autores.

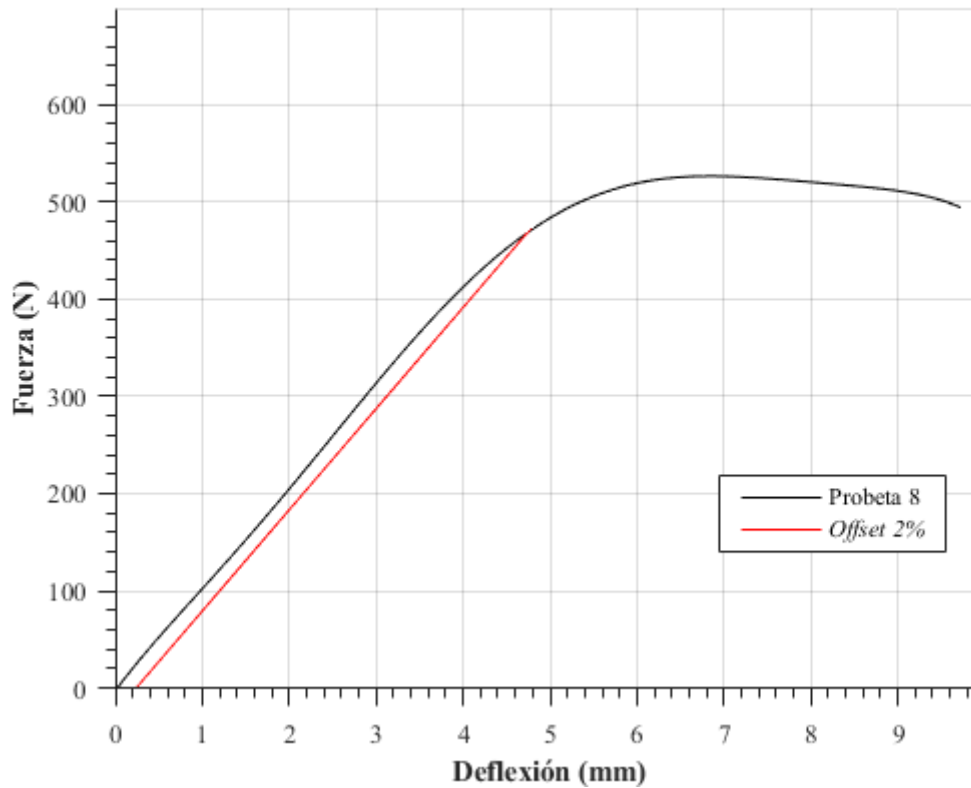


Figura 19. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 8 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8”.

Fuente: Autores.

Tabla 5. Datos de propiedades mecánicas de fuerza de aplastamiento y offset del 2% para el lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8”.

Fuente: Autores

Probeta	Offset 2% [mm]	P_{yield} [N]
1	0,1512	483,2983
2	0,143	467,1938
3	0,2416	208,0642
4	0,2594	486,277
5	0,155	354,0935
6	0,1632	474,0265
7	0,1616	262,1926
8	0,2066	464,5003

**Lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8”
sometidas a tratamiento térmico.**

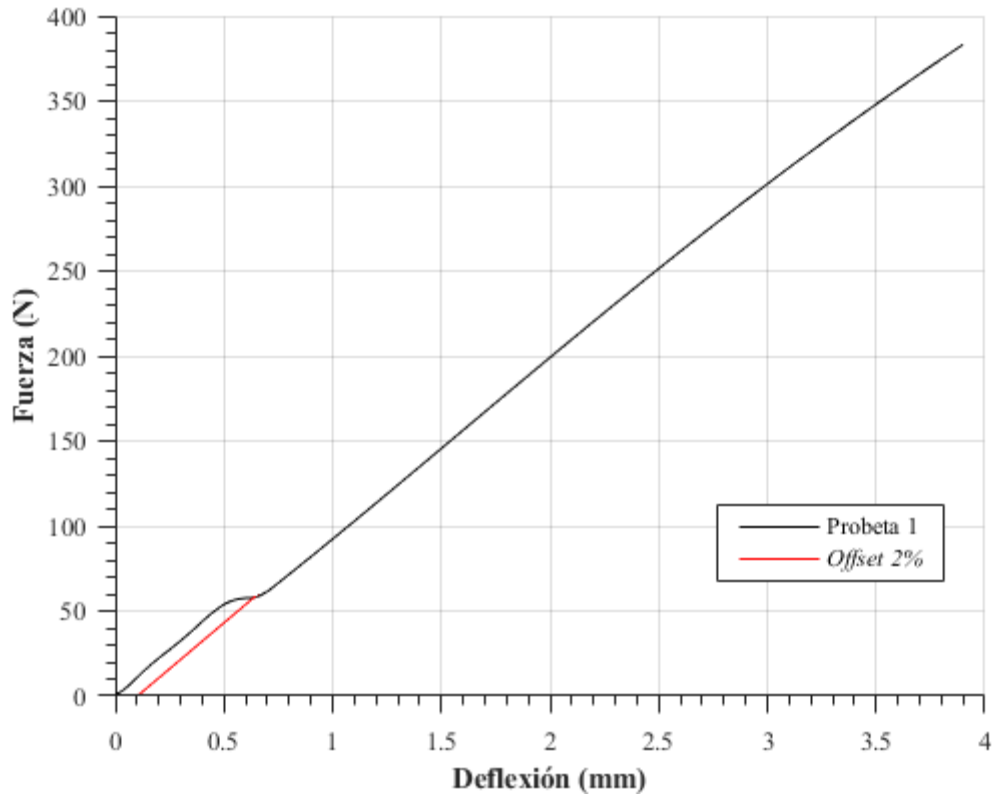


Figura 20. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 1 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8” sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

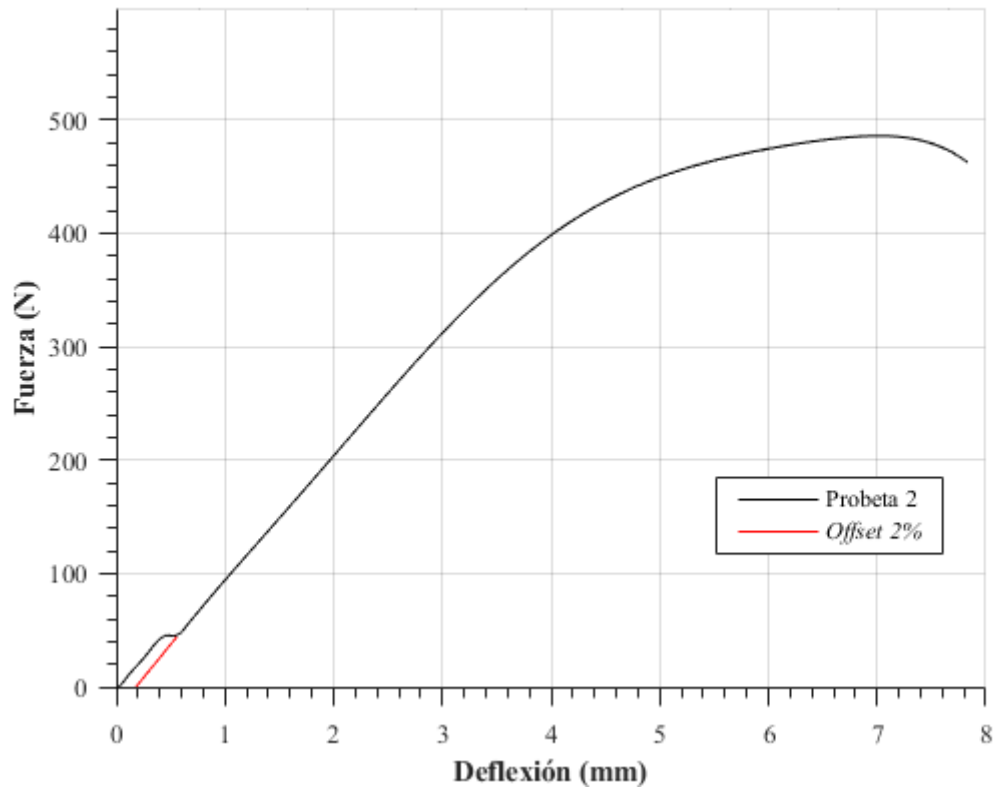


Figura 21. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 2 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

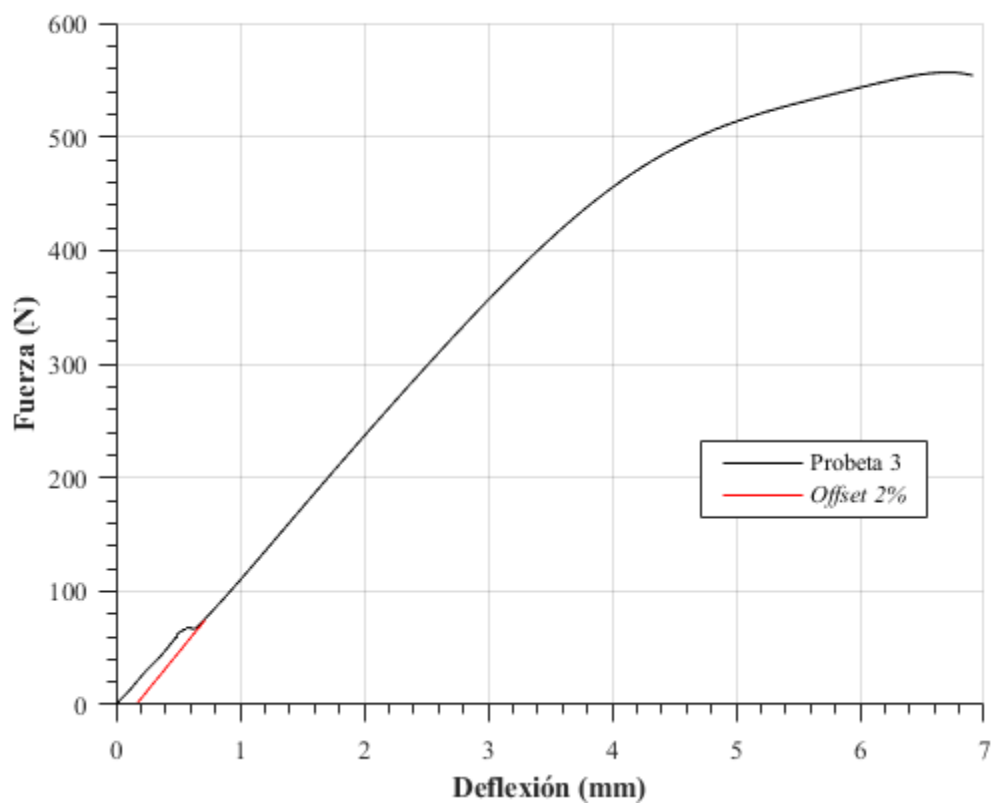


Figura 22. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 3 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

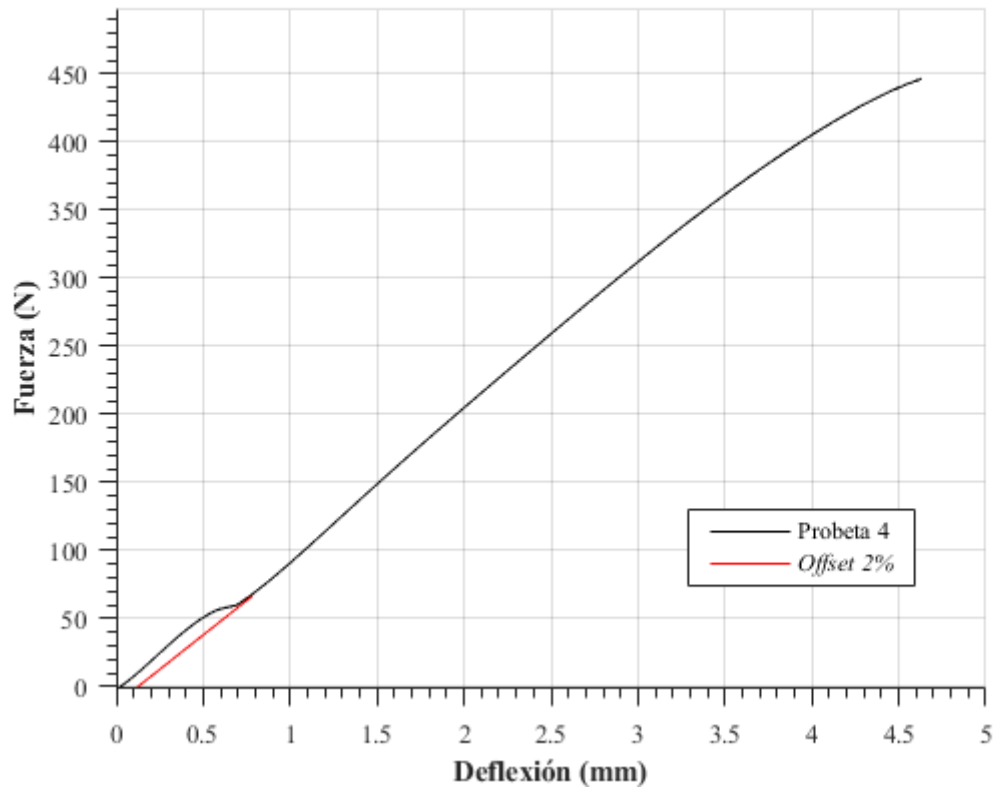


Figura 23. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 4 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

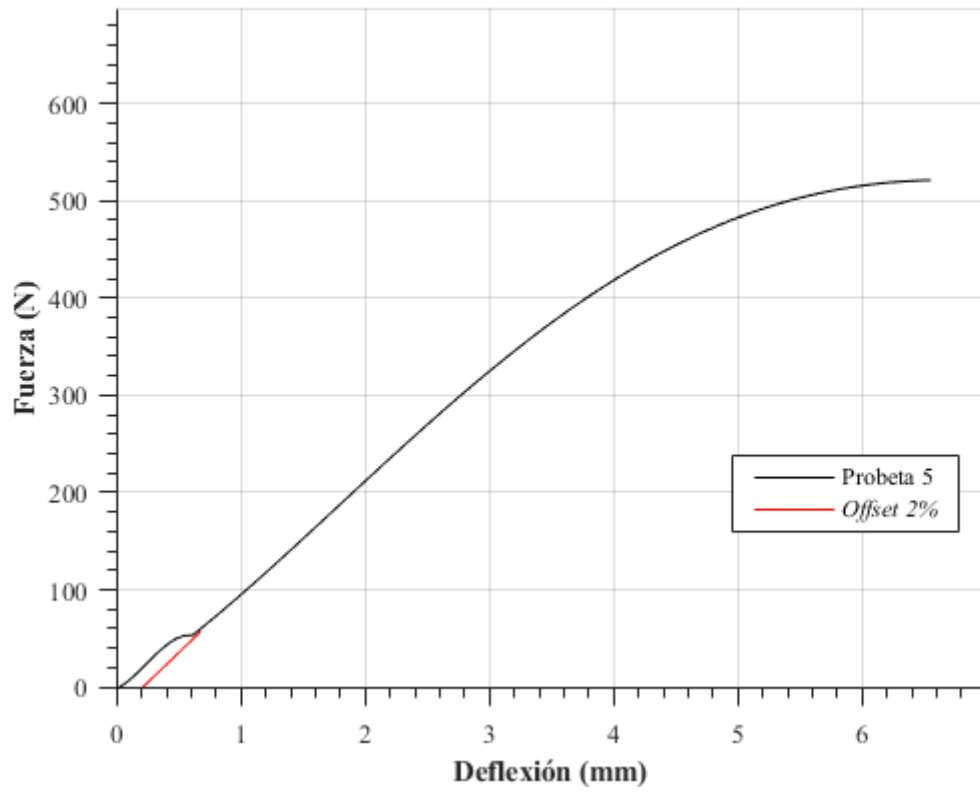


Figura 24. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 5 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

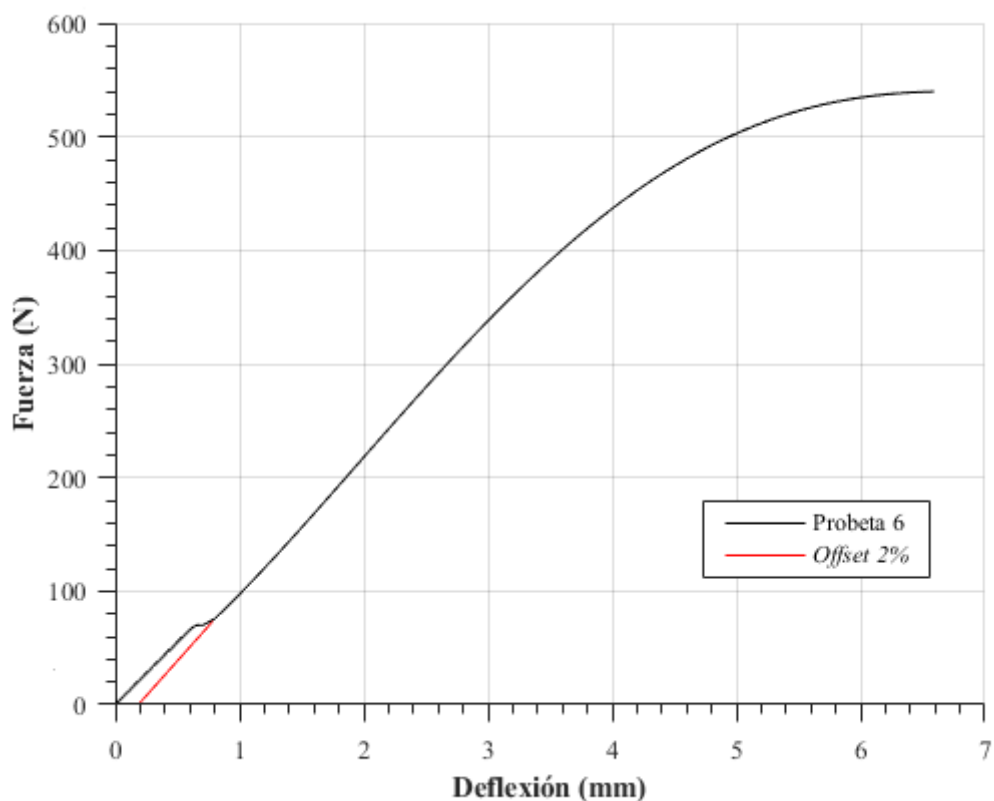


Figura 25. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 6 del lote de especímenes fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidos a tratamiento térmico.

Fuente: Autores.

Tabla 6. Datos de propiedades mecánicas de fuerza de aplastamiento y offset del 2% para el lote de probetas fabricadas completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" sometidas a tratamiento térmico.

Fuente: Autores

Probeta	Offset 2% [mm]	P_{yield} [N]
1	0,078	57,7208
2	0,1566	45,2509
3	0,13823	67,115
4	0,0926	64,1787
5	0,131	61,6977
6	0,1318	69,8014

Lote de probetas núcleos completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" con laminados en fibra de carbono.

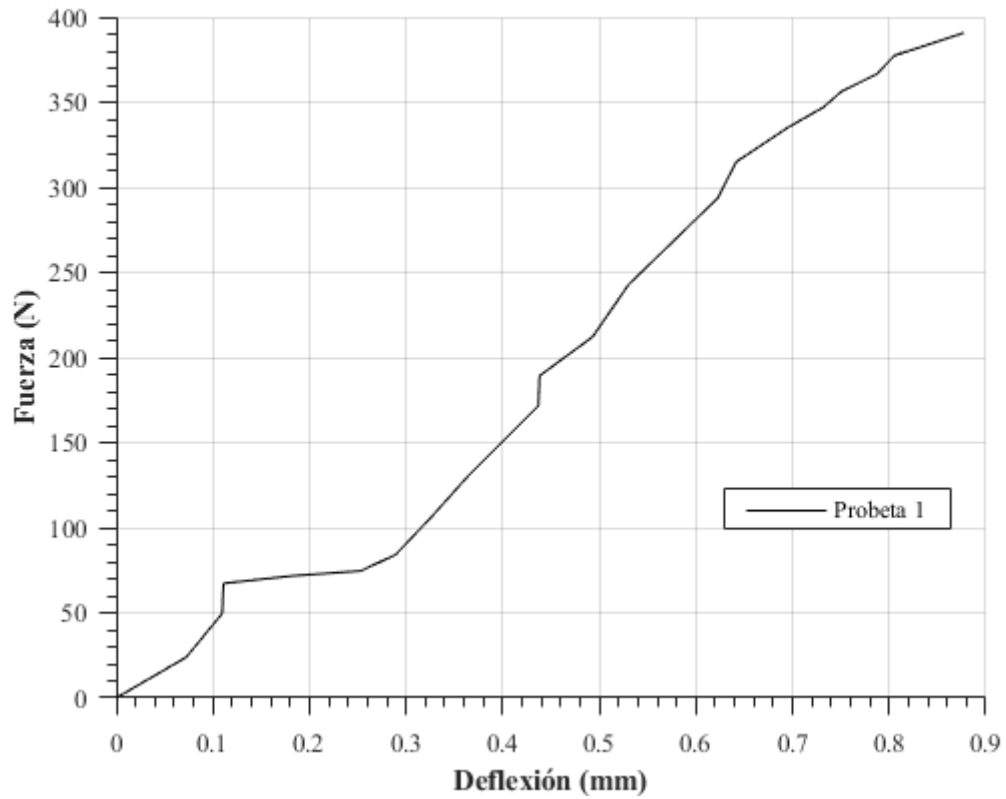


Figura 26. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 1 del lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" y laminados de refuerzo en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

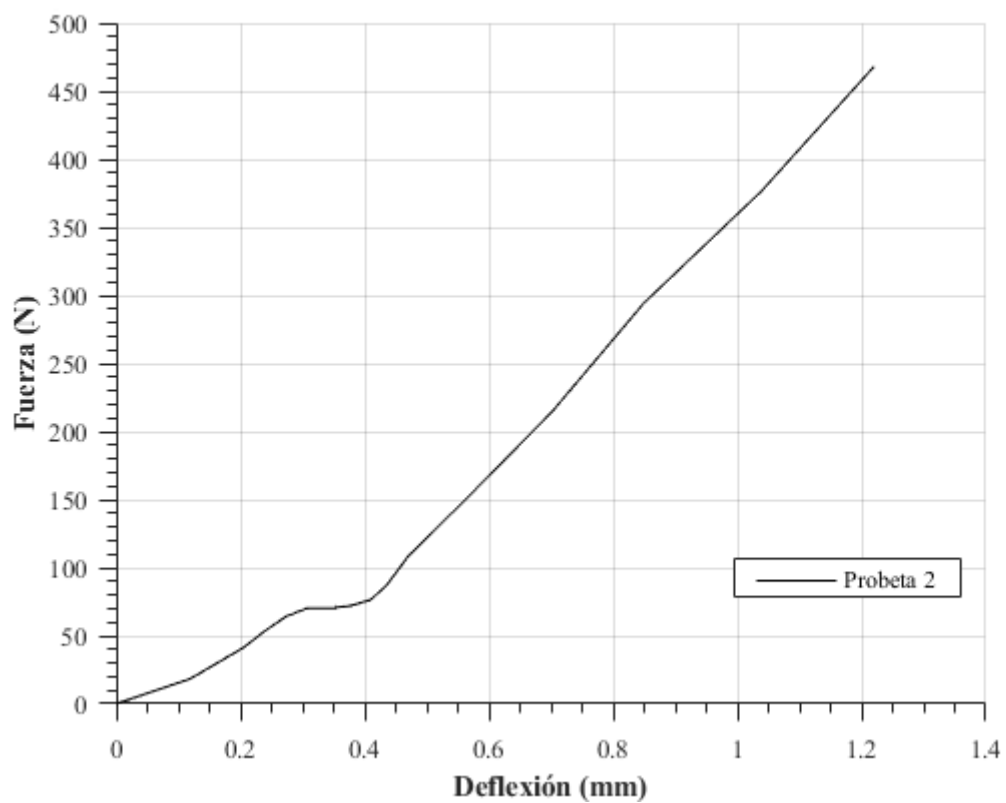


Figura 27. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 2 del lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" y laminados de refuerzo en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

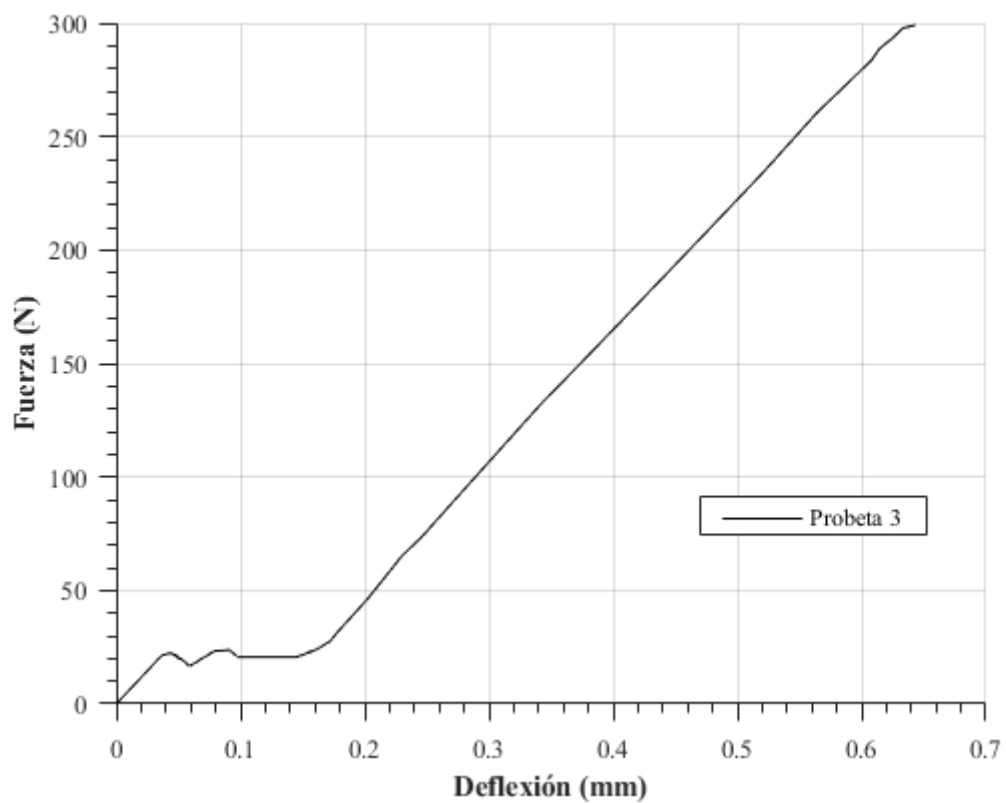


Figura 28. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 3 del lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" y laminados de refuerzo en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

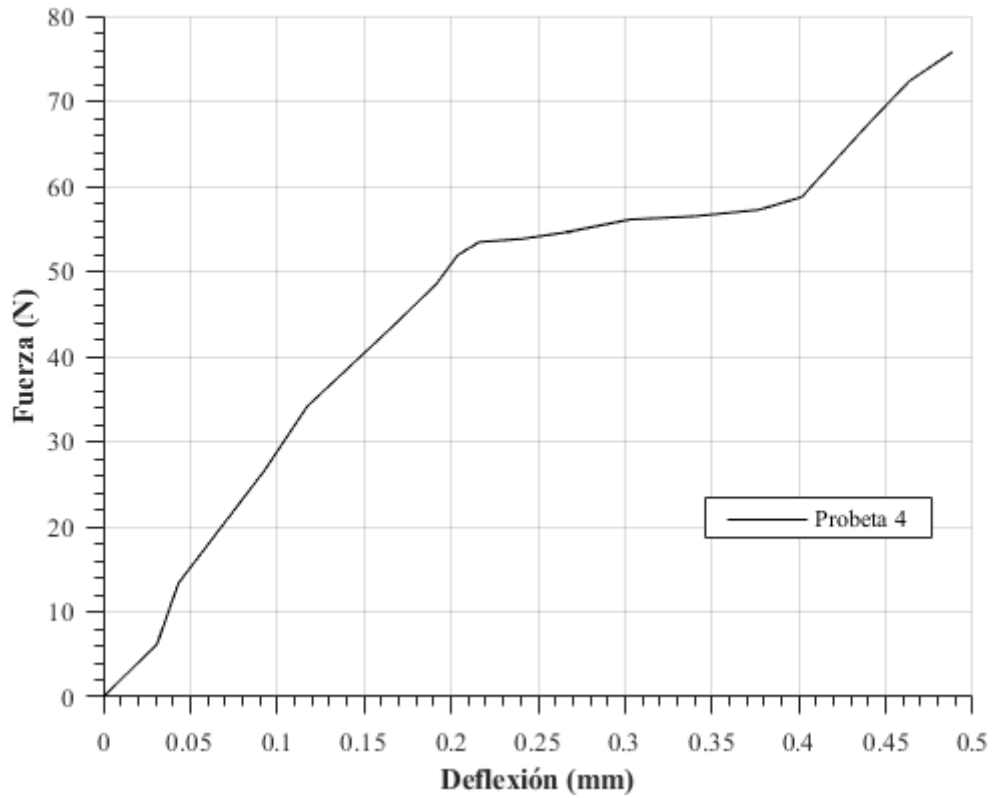


Figura 29. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 4 del lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" y laminados de refuerzo en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

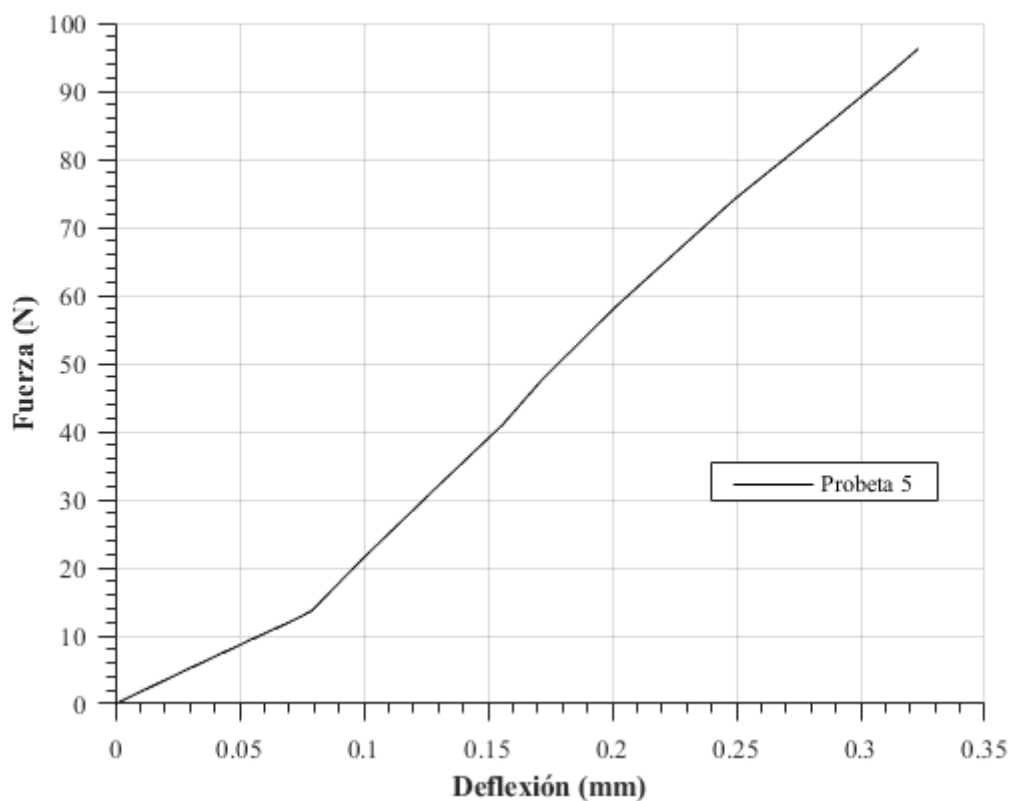


Figura 30. Gráfica de esfuerzo vs. deflexión con offset del 2% para la probeta 5 del lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" y laminados de refuerzo en fibra de carbono.

Fuente: Autores.

Tabla 7. Datos de propiedades mecánicas de fuerza de aplastamiento y offset del 2% para el lote de núcleos fabricados completamente en PLA con tamaño de celda de 3/8" reforzados con laminados en fibra de carbono.

Fuente: Autores

Probeta	Offset 2% [mm]	P_{yield} [N]
1	0,0175	74,2832
2	0,0243	70,2857
3	0,0128	20,7278
4	0,0097	54,5798
5	0,0064	13,6709

ANEXO 7

Fotografía de las probetas después de las pruebas destructivas.

Figura 1. Espécimen 1 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

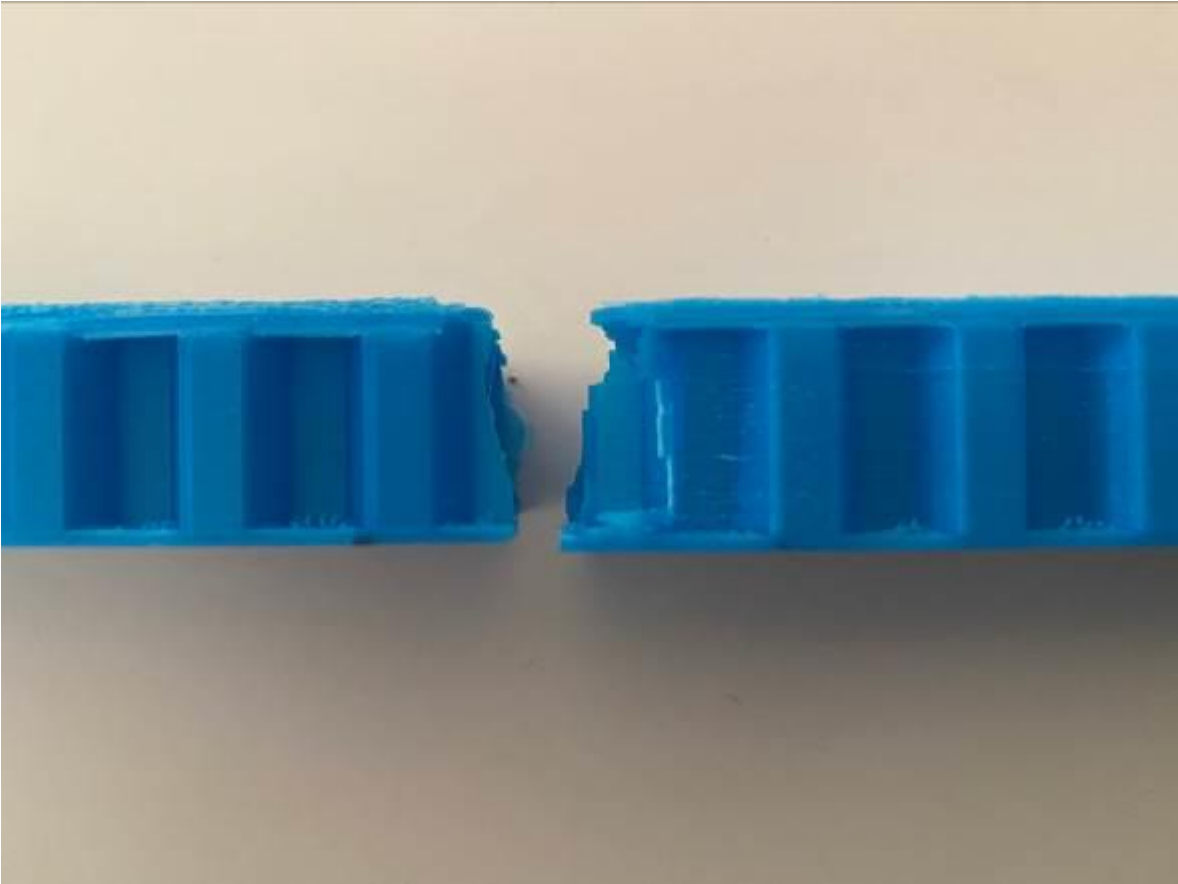


Figura 2. Espécimen 3 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.



Figura 3. Espécimen 4 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA; tipo de falla M-A-B.

Fuente: Autores.



Figura 4. Espécimen 7 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA; tipo de falla M-A-B.

Fuente: Autores.



Figura 5. Espécimen 8 del lote de 1/4" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.



Figura 6. Espécimen 1 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA; tipo de falla M-A-B.

Fuente: Autores.



Figura 7. Espécimen 2 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

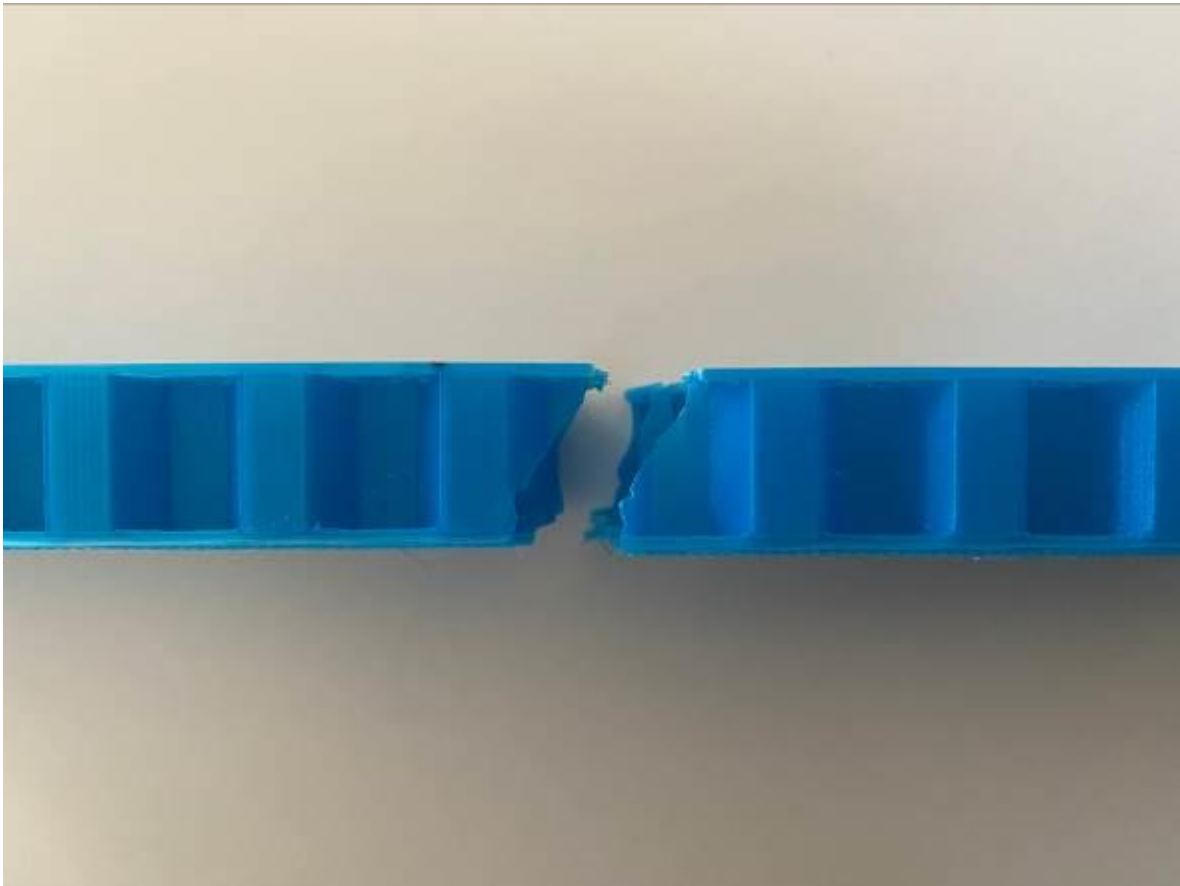


Figura 8. Espécimen 4 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.



Figura 9. Espécimen 6 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA; tipo de falla M-A-B.

Fuente: Autores.



Figura 10. Espécimen 6 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA; tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

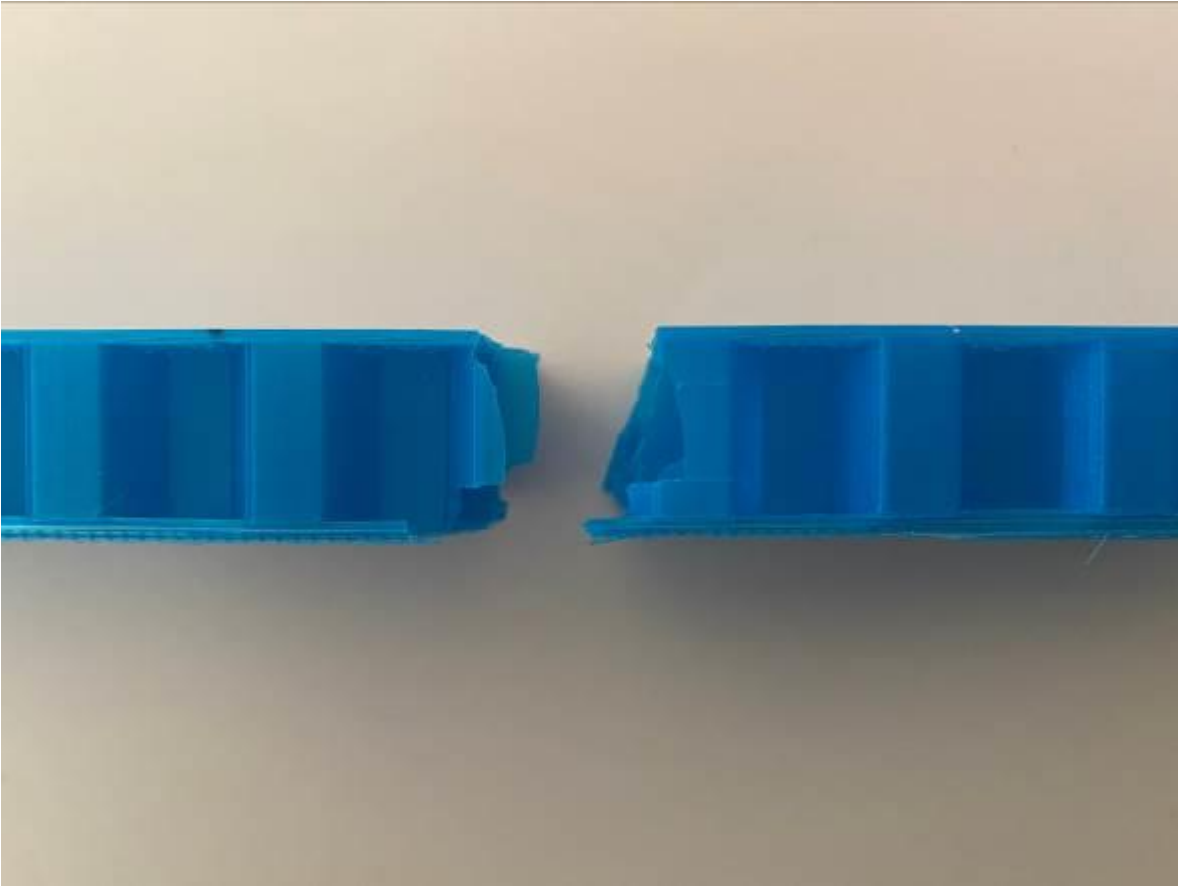


Figura 11. Espécimen 2 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico, tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

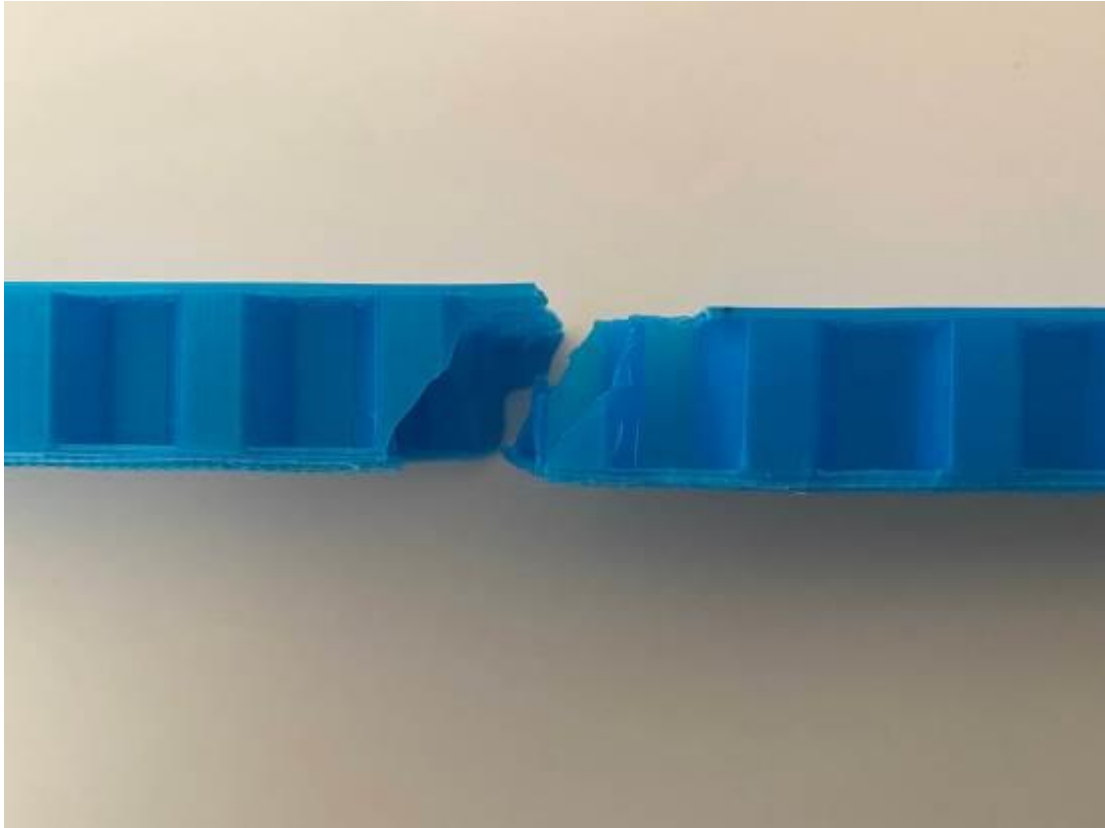


Figura 12. Espécimen 3 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico, tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

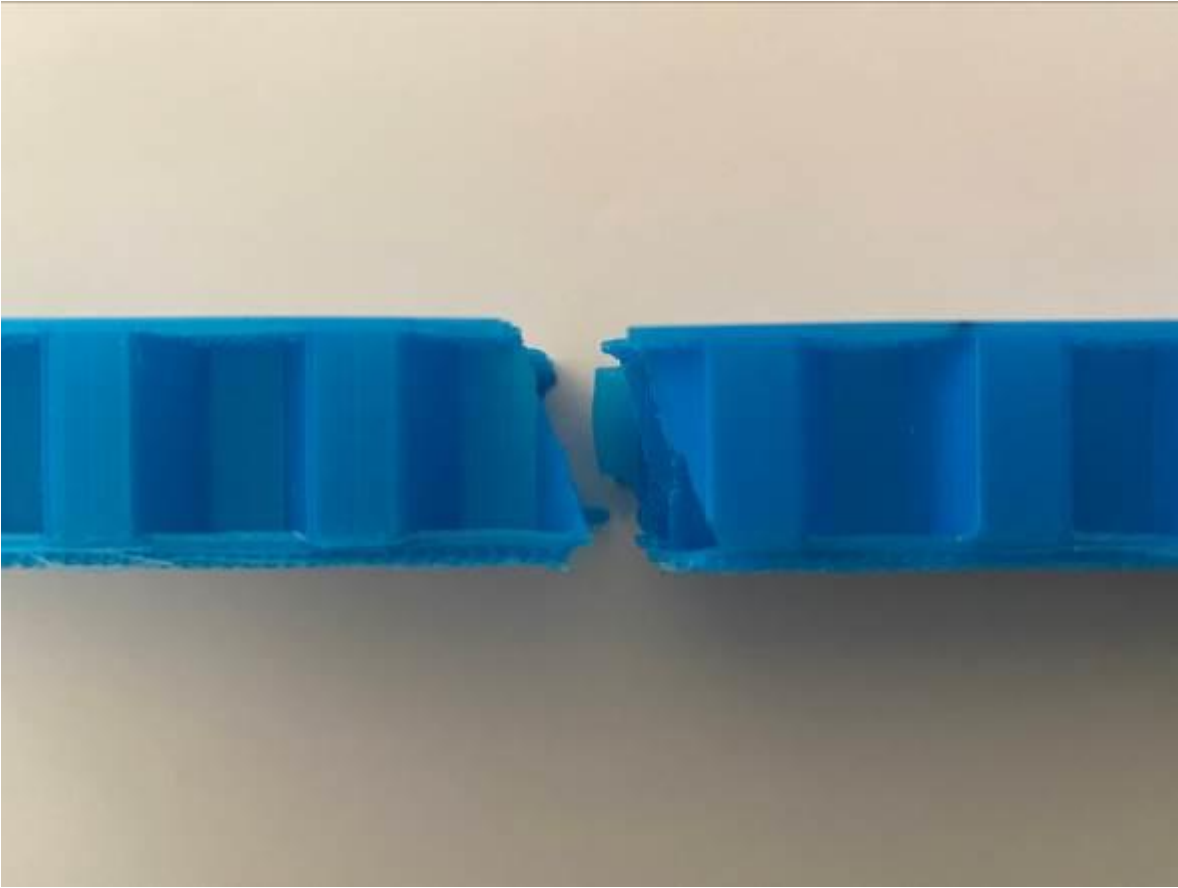


Figura 13. Espécimen 4 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico, tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.



Figura 14. Espécimen 5 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico, tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

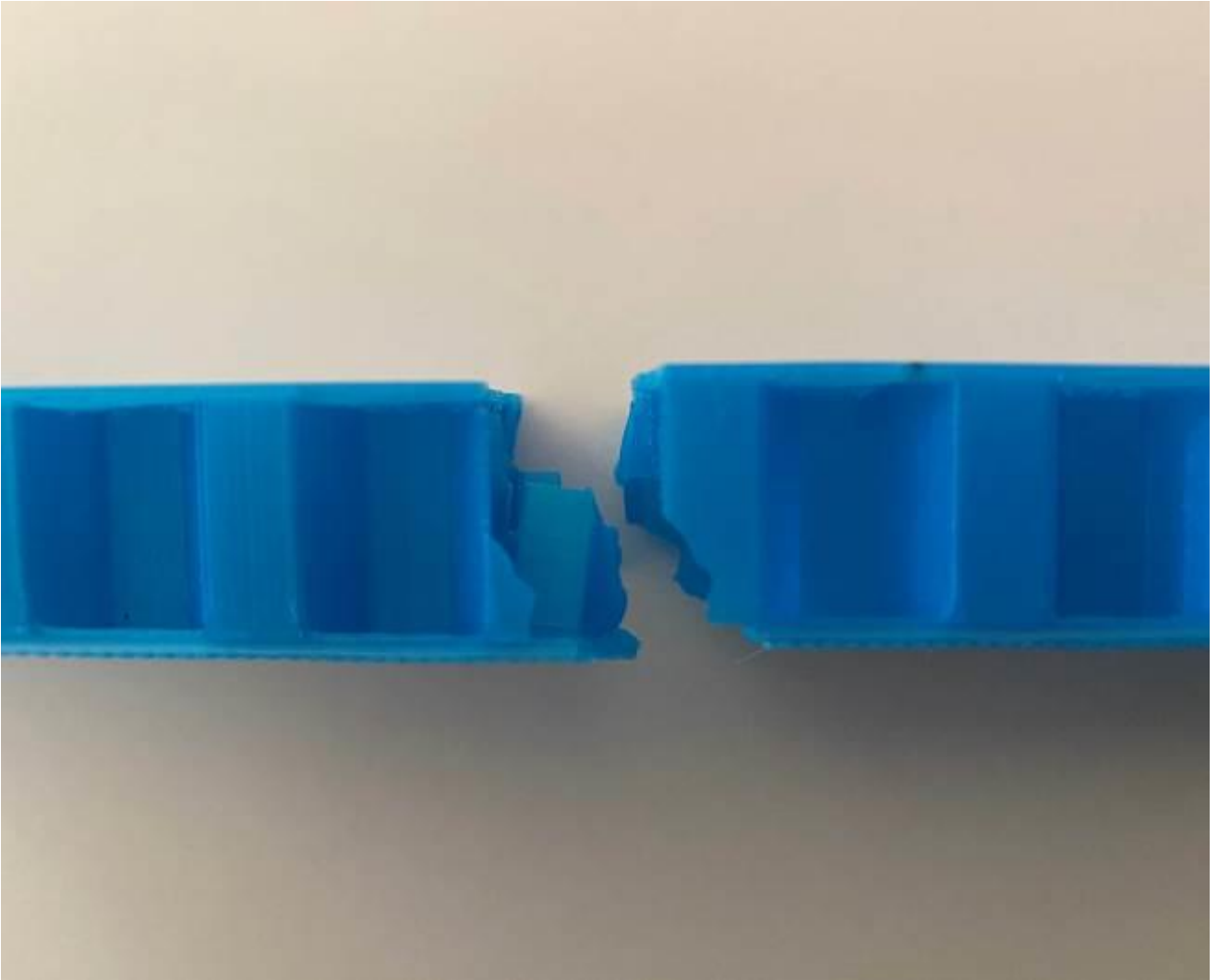


Figura 15. Espécimen 6 del lote de 3/8" fabricado completamente en PLA con tratamiento térmico, tipo de falla X-A-F.

Fuente: Autores.

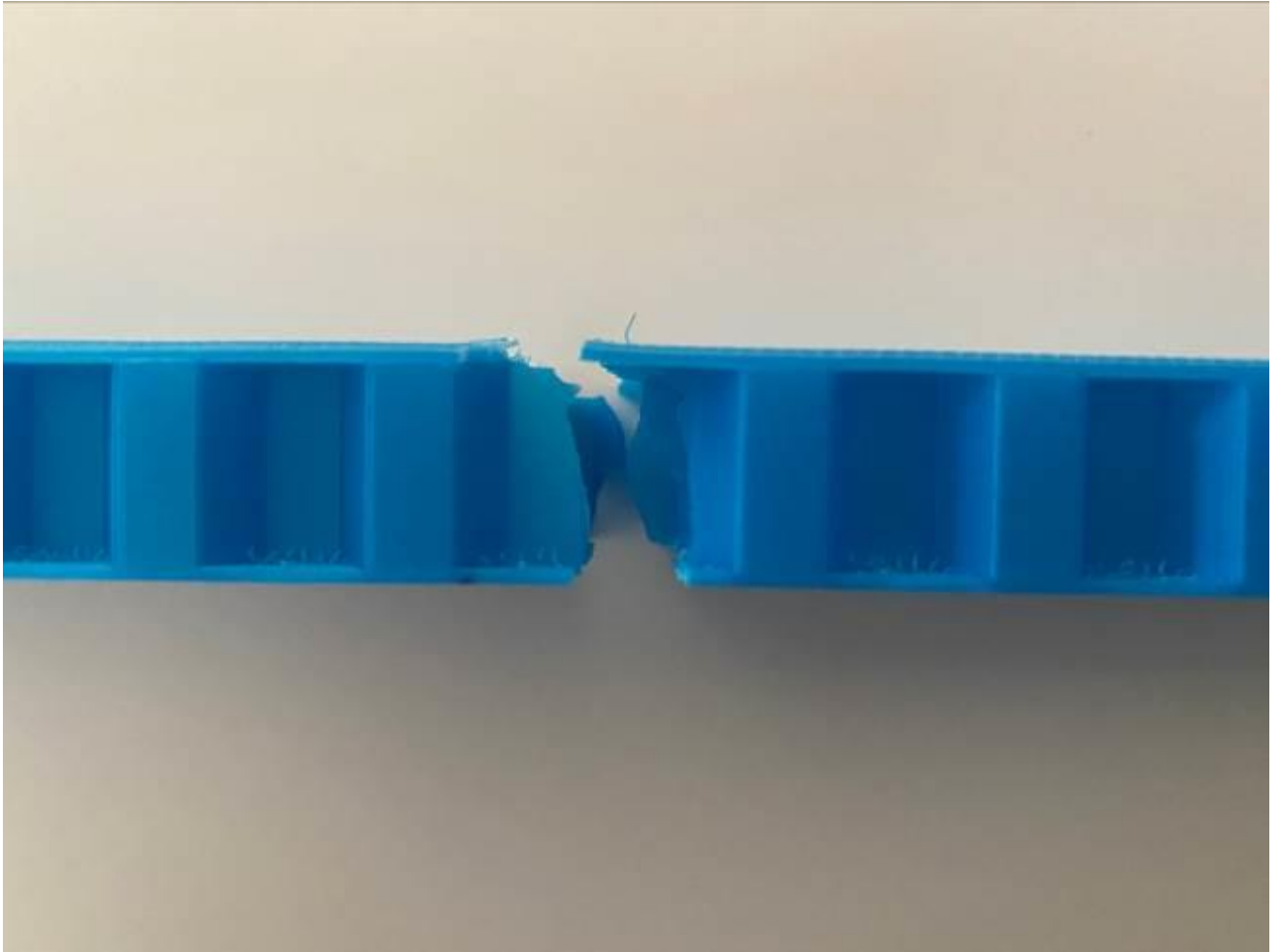


Figura 16. Espécimen 3 del lote de núcleo 3/8" con laminado en fibra de carbono, tipo de falla D-A-B.

Fuente: Autores.



Figura 17. Espécimen 4 y 5 del lote de núcleo 3/8" con laminado en fibra de carbono, tipo de falla D-A-B.

Fuente: Autores.

