



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Tecnológico Nacional de México

Campus Querétaro

GENERACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS 4D COMO ACTUADORES ÚTILES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

Que para obtener el Grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA

presenta:

ISMAEL MOSCOSO PÉREZ

Dirigida por:

Director: Carlos Velasco Santos

Codirector: Ana Laura Martínez Hernández

Asesor: José Arturo Toscano Giles

Noviembre, 2021



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. **15/octubre/2021**
Oficio No. DEPI/252/2021

ISMAEL MOSCOSO PÉREZ
ESTUDIANTE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
PRESENTE

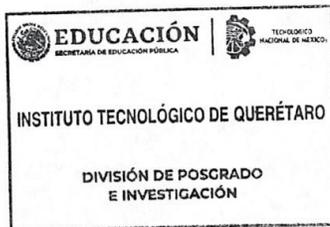
De acuerdo con el Reglamento para Exámenes Profesionales de la Dirección General de Educación Superior Tecnológica, se le autoriza la impresión de la Tesis, para obtener el Grado de MAESTRÍA EN INGENIERÍA, titulada:

"GENERACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS 4D COMO ACTUADORES ÚTILES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA"

Para el correspondiente Examen de Grado.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica
"La tierra será, como sean los hombres"

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Coordinación de Maestría
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,
Querétaro, Qro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx
tecnm.mx | queretaro.edu.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Querétaro
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Querétaro, Qro. 19/octubre/2021
Oficio No. DEPI/260/2021

A QUIEN CORRESPONDA:

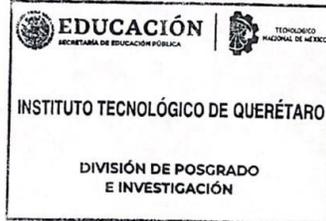
Por medio de la presente se hace constar que el trabajo de tesis con título: **"GENERACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS 4D COMO ACTUADORES ÚTILES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA"**; ha sido revisado por medio de la herramienta de software TURNITIN, cuyo resultado se anexa a la presente y **no se ha encontrado evidencias de plagio en su realización**. El autor de dicho trabajo, estudiante de **Maestría en Ingeniería, Ismael Moscoso Pérez**, es el responsable de la autenticidad y originalidad del mismo y; manifiesta que para su desarrollo ha utilizado diversas citas para su soporte, mismas que han sido marcadas a lo largo del mismo y listadas al final como **REFERENCIAS bibliográficas**.

Se extiende la presente para la continuación del proceso de obtención del grado de Maestría en Ingeniería, y a petición del interesado.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"la tierra será como sean los hombres"

GABRIELA PINEDA CHACÓN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



C.c.p. Coordinación de maestría
Archivo

Jany*



Av. Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Col. Centro, C.P. 76000,
Querétaro, Qro.
Plantel Centro tel. 01(442) 2274400 ext. 4421
Plantel Norte tel. 01(442) 2435554
e-mail: depin@queretaro.tecnm.mx
tecnm.mx | queretaro.edu.mx



Santiago de Querétaro, Qro. FECHA 27 de octubre de 2021.

El que suscribe, egresado de maestría en ingeniería; de manera libre y voluntaria autorizo al Centro de Información del Tecnológico Nacional de México Campus Querétaro a difundir la obra de mi autoría con el Título del trabajo GENERACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS 4D COMO ACTUADORES ÚTILES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA. Para fines académicos, científicos y tecnológicos, mediante formato CD-ROM o digital, desde Internet, Intranet y en general cualquier formato conocido o por conocer.

Dicha obra estará disponible al estudiantado de esta Institución a partir del mes de Octubre, fecha en la cual se puede difundir la obra.

Postulante: ISMAEL MOSCOSO PÉREZ

No. de Control: M19141439

Correo electrónico:ismael_moscoso@hotmail.com

Título de la obra: GENERACIÓN DE MATERIALES POLIMÉRICOS 4D COMO ACTUADORES ÚTILES EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

Área del conocimiento: IMPRESIÓN 4D

Palabras clave de la obra Impresión 4D, Materiales inteligentes, polímeros con memoria de forma, PLA-PHA, Velocidad de recuperación.

ISMAEL MOSCOSO PÉREZ



NOMBRE Y FIRMA

INDICE GENERAL

Índice de figuras	VI
Índice de Tablas	XIV
Acrónimos	XVI
Agradecimientos	XVII
Dedicatorias	XVII
Resumen	XVIII
Palabras claves	XIX
Abstract.	XIX
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	20
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	21
Industria 4.0	21
Manufactura aditiva	22
Tipos de impresión	23
Materiales inteligentes	24
Polímeros con memoria de forma	25
Temperatura de transición vítrea	27
Poliésteres usados en impresión 4D	28
Características del PLA	28
El PLA como material inteligente	30
Características del PHA.....	30
PLA/PHA como material inteligente.....	32
Precusores de la impresión 4D	34
Impresión 4D	34
El futuro de la impresión 4D.....	36
Ley constructal	37
Tecnicas de caracterización en materiales	38
Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	38
Análisis Dinámico Mecánico DMA	39
CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE	39
CAPITULO IV. METODOLOGÍA	41
Metodología para análisis de recuperación de forma con impresora 3D	42
Impresión con pluma 3D y efecto de recuperación	43
Impresión 3D y efecto de recuperación	44

CAPITULO V. RESULTADOS	56
REFERENCIAS	126
ANEXO A. Gráfico de estructuras auxéticas a 65 y 75°C	128
ANEXO B. Gráfico de estructuras honeycomb a 65 y 75°C	131
ANEXO C. Gráfico de estructuras de kagome a 65 y 75°C	134
ANEXO D. Prueba de recuperación para estructuras auxéticas a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.....	137
ANEXO E. Prueba de recuperación para estructuras honeycomb a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.....	146
ANEXO F. Prueba de recuperación para estructuras de kagome a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.....	155

Índice de figuras

Figura 1. Representación esquemática de los polímeros con memoria de forma en un ciclo termo-mecánico típico. De Jinsong Leng y Haibao Lu, Yanju Liu et al. "Shape-Memory Polymers—A Class of Novel Smart Materials". MRS Bulletin. Volumen 34	26
Figura 2. Representación de la estructura del PLA. De Lissett C. Cárdenas Acosta. "Materiales para el envasado activo de alimentos basados en PLA o PHBV". Universitat Politècnica De València.....	28
Figura 3. Representación de la estructura del PHA. De Lissett C. Cárdenas Acosta. "Materiales para el envasado activo de alimentos basados en PLA o PHBV". Universitat Politècnica De València.....	31
Figura 4. Muestra impresa con polímero de PLA/PHA, se observa el tiempo de recuperación en segundos de una forma temporal a una forma permanente. Fuente propia.	33
Figura 5. Efecto de higroscopia en pinos de conos. Húmedo (cerrado) y seco (abierto). . De E. Reyssat y L. Mahadevan. "Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers". Journal of the Royal Society Interface.	34
Figura 6. Representación gráfica del avance e investigación de la impresión 4D a) Número de publicaciones por Países. b) Publicaciones por año (2013-2019). De Siddharth Joshi, Krishna Rawat, Karunakaran. C et al. "4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges.....	36
Figura 7. Ramificaciones existentes en la naturaleza. Ejemplo claro de la ley constructal	38
Figura 8. Metodología de impresión con pluma 3D.....	41
Figura 9. Metodología de impresión con impresora 3D	42
Figura 10. Diversas muestras impresas con pluma 3D	43
Figura 11. Pluma de impresión 3D marca Joky 1.75mm	43
Figura 12. Proceso de recuperación de forma para estructura tipo flor por estímulo hidrotérmico a 55°C. a) Forma original o permanente, b) Forma temporal c) Recuperación de forma.....	43
Figura 13. Metodología de desarrollo de muestra Auxética por SolidWorks y ajustes de parámetros en ultimaker cura.....	44
Figura 14. Ejemplos de modelos CAD en software SolidWorks.	44
Figura 15. Barra de herramientas y entidades de croquis usadas en el diseño de modelos CAD de SolidWorks.....	45
Figura 16. Herramientas de operación extrusión saliente/base para estructura honeycomb.....	45
Figura 17. Estructuras cilíndricas en SolidWorks: a) muestra con incrustaciones auxéticas, b) muestra con incrustaciones de honeycomb, c) muestra con incrustaciones de kagome ...	45
Figura 18. Operaciones fundamentales para incrustaciones en estructuras cilíndricas. a) Operación geometría de referencia opción "plano" b) operación matriz circular	46
Figura 19. Formato de archivo STL	46
Figura 20. Interfaz y parámetros de ajustes del software ultimaker cura	47
Figura 21. Parámetros seleccionados en software ultimaker cura para las muestras a imprimir	47
Figura 22. Exportación de archivo para obtención de código G	48
Figura 23. Equipo de impresión 3D, impresora Anet A8 filamento de 1.75mm, voltaje 110/220V	48
Figura 24. Total de muestras impresas para pruebas de recuperación	49
Figura 25. Estructuras ramificadas que obedecen al comportamiento de la ley constructal	49
Figura 26. Recuperación de forma de cilindro de kagome bajo estímulo de aire caliente y agua caliente.....	50
Figura 27. Proceso de recuperación de forma para estructura auxética por estímulo hidrotérmico a 55°C. a) Forma original o permanente, b) Forma temporal c) Recuperación de forma.	51

Figura 28. Recuperación de forma a) Medición con vernier de las dimensiones de la muestra en su forma original, forma temporal y forma recuperada. De izquierda a derecha. b) Proceso de secuencia de recuperación analizado con equipo de video	51
Figura 29. Gráfico Deformación vs tiempo y datos de regresión lineal para temperatura a 55°C	52
Figura 30. Comparativa de velocidad promedio de recuperación de muestras auxéticas y honeycomb a 55°C, se observa que medida del aumento del espesor (de arriba hacia abajo) las velocidades disminuyen.....	53
Figura 31. Comparativo del gráfico Velocidad vs Temperatura. a) Para estructuras de 5mm de espesor b) para estructuras de 10mm de espesor.	53
Figura 32. Estructuras ramificadas a) estructura sólida de 7.6 gramos b) estructura hueca de 7.6 gramos, c) estructura hueca de 8.5 gramos d) estructura sólida de 8.5 gramos	54
Figura 33. Interfaz de software ultimaker cura. a) Selección de escala, b) parámetro de tiempo de impresión y masa en gramos.....	55
Figura 34. Deformación de muestras impresas	55
Figura 35. Efecto de recuperación de forma para estructura cilíndrica por estímulo de aire caliente	56
Figura 36. Recuperación de forma de estructura cilíndrica desde su forma temporal hacia su forma original.....	56
Figura 37. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Honeycomb, aire caliente vs agua caliente.	57
Figura 38. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Kagome, aire caliente vs agua caliente.....	57
Figura 39. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Honeycomb, aire caliente vs agua caliente.	58
Figura 40. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones Auxéticas, aire caliente vs agua caliente.....	58
Figura 41. Total de muestras impresas, se imprimieron 3 muestras de cada espesor correspondientes a 5 mm, 7.5 mm y 10 mm con el hecho de verificar el efecto de repetitividad.	59
Figura 42. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor.....	60
Figura 43. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor	61
Figura 44. Gráfico “Inverso de la deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor	62
Figura 45. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor	65
Figura 46. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor	66
Figura 47. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor.....	67
Figura 48. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R ² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor	70

Figura 49. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor	71
Figura 50. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor	72
Figura 51. Comparativo de espesores y velocidades de recuperación para estructuras auxéticas	75
Figura 52. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor	77
Figura 53. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor	78
Figura 54. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor	79
Figura 55. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor	82
Figura 56. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor	83
Figura 57. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor	84
Figura 58. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor	87
Figura 59. Gráfico “Logaritmo de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor	88
Figura 60. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor	89
Figura 61. Comparativo de espesores y velocidades de recuperación para estructuras Honeycomb	92
Figura 62. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor	94
Figura 63. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor	95
Figura 64. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor	96
Figura 65. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor	99

Figura 66. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor	100
Figura 67. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor	101
Figura 68. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor	104
Figura 69. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor	105
Figura 70. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor	106
Figura 71. Comparativo de espesores y velocidades de recuperación para estructuras de Kagome.....	109
Figura 72. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 5mm de espesor ..	111
Figura 73. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 7.5mm de espesor	112
Figura 74. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 10mm de espesor	113
Figura 75. Gráfico velocidad de recuperación vs Temperatura considerando las distintas densificaciones para muestras auxéticas.	114
Figura 76. Gráfico velocidad de recuperación vs Temperatura considerando las distintas densificaciones para muestras honeycomb	115
Figura 77. Gráfico DSC para el polímero de PLA/PHA.....	116
Figura 78. Gráficos DMA para el polímero de PLA/PHA.....	117
Figura 79. Estructura ramificada recta. a) Forma sólida b) forma hueca	119
Figura 80. Efecto de recuperación por estímulo hidrotérmico en estructuras ramificadas. a) Recuperación de forma a los 40 seg para estructura hueca b) Recuperación de forma a los 69 seg para estructura sólida.	119
Figura 81. Ángulo de recuperación para muestras constructales. a) estructura hueca b) estructura sólida	120
Figura 82. Comparativa de recuperación para muestras constructales. Las muestras huecas presentan una mejor recuperación (ángulo más cercano a 90°).....	120
Figura 83. Estructura ramificada constructal. a) Forma hueca b) forma sólida.....	121
Figura 84. Efecto de recuperación por estímulo hidrotérmico en estructuras ramificadas. a) Recuperación de forma a los 31 seg para estructura hueca b) Recuperación de forma a los 52 seg para estructura sólida.	121
Figura 85. Formas ramificadas constructales originales 129 y 144 °	122
Figura 86. Ángulo de recuperación para muestras constructales. a) estructura hueca b) estructura sólida	122
Figura 87. Comparativa de recuperación para muestras constructales. Las muestras huecas presentan una mejor recuperación (ángulo de 144°).....	123
Figura 88. Comparativa de recuperación para muestras constructales, estructura hueca y sólida	123
Figura 89. Muestras impresas.	125
Figura 90. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 5mm de espesor a 65°C.....	128

Figura 91. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 5mm de espesor a 75°C.....	128
Figura 92. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 7.5mm de espesor a 75°C.....	129
Figura 93. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 7.5mm de espesor a 65°C.....	129
Figura 94. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 10mm de espesor a 65°C.....	130
Figura 95. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 10mm de espesor a 75°C.....	130
Figura 96. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 5mm de espesor a 65°C.....	131
Figura 97. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 5mm de espesor a 75°C.....	131
Figura 98. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor a 65°C.....	132
Figura 99. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor a 75°C.....	132
Figura 100. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 10mm de espesor a 65°C.....	133
Figura 101. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 10mm de espesor a 75°C.....	133
Figura 102. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 5mm de espesor a 65°C.....	134
Figura 103. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 5mm de espesor a 75°C.....	134
Figura 104. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 7.5mm de espesor a 65°C.....	135
Figura 105. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 7.5mm de espesor a 75°C.....	135
Figura 106. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 10mm de espesor a 65°C.....	136
Figura 107. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 10mm de espesor a 75°C.....	136
Figura 108. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 17 segundos.....	137
Figura 109. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 21 segundos.....	138
Figura 110. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 18 segundos.....	139
Figura 111. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.....	140

Figura 112. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.	141
Figura 113. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 21 segundos.	142
Figura 114. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 25 segundos.	143
Figura 115. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.	144
Figura 116. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 24 segundos.	145
Figura 117. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 26 segundos.	146
Figura 118. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 27 segundos.	147
Figura 119. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 24 segundos.	148
Figura 120. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 22 y 25 segundos, e) recuperación de forma a los 32 segundos.	149
Figura 121. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) e) proceso de recuperación a los 8, 22, 25 y 32 segundos, f) recuperación de forma a los 48 segundos.	150
Figura 122. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 22 y 25 segundos, e) recuperación de forma a los 32 segundos.	151
Figura 123. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 35 segundos.	152
Figura 124. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d)	

proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 38 segundos	153
Figura 125. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 39 segundos	154
Figura 126. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 36 seg	155
Figura 127. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 40 seg	156
Figura 128. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 40 seg	157
Figura 129. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 44 seg	158
Figura 130. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 44 seg	159
Figura 131. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 54 seg	160
Figura 132. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 55 seg	161
Figura 133. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 54 seg	162
Figura 134. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 4 y 7 segundos, d) recuperación de forma a los 11 seg	163
Figura 135. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 2 y 4 segundos, d) recuperación de forma a los 10 segundos	164
Figura 136. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 2 y 5 segundos, d) recuperación de forma a los 11 segundos	165
Figura 137. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 16 segundos	166

Figura 138. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 15 segundos	167
Figura 139. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 19 segundos	168
Figura 140. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7,13 y 21 segundos, e) recuperación de forma a los 30 segundos	169
Figura 141. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5,8 y 12 segundos, e) recuperación de forma a los 15 segundos	170
Figura 142. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5,7 y 9 segundos, e) recuperación de forma a los 11 segundos	171

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen Tecnologías de impresión 3D. Información e imágenes tomadas de /www.tridimx.com/tecnologias/	23
Tabla 2. Poliésteres usados en la impresión 4D. De Sara Reynoso. “Los polímeros plásticos”. 2ª edición	28
Tabla 3. Parámetros del filamento de PLA/PHA. Información tomada de www.3dmarket.mx y www.colorplus3d.com	32
Tabla 4 Programación y recuperación de forma del PLA/PHA	33
Tabla 5. Investigaciones sobre materiales compuestos con base PLA	39
Tabla 6. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 5mm de espesor	jError! Marcador no definido.
Tabla 7. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 5mm de espesor	61
Tabla 8. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 5mm de espesor	62
Tabla 9. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor	65
Tabla 10. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor	66
Tabla 11. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor	67
Tabla 12. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor	70
Tabla 13. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor	71
Tabla 14. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor	72
Tabla 15. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras auxéticas	76
Tabla 16. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor	77
Tabla 17. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor	78
Tabla 18. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor	79
Tabla 19. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor	82
Tabla 20. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor	83
Tabla 21. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor	84
Tabla 22. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor	87
Tabla 23. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor	88
Tabla 24. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor	89
Tabla 25. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras honeycomb	93

Tabla 26.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor	94
Tabla 27.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor	95
Tabla 28.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor	96
Tabla 29.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor	99
Tabla 30.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor	100
Tabla 31.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor	101
Tabla 32.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor	104
Tabla 33.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor	105
Tabla 34.Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor	106
Tabla 35. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras kagome	110

Acrónimos

PLA	Ácido poliláctico
PLA/PHA	Ácido poliláctico/polihidroxicanoato
SME	Efecto de memoria de forma
SMP	Polímero con memoria de forma
FDM	Modelado por deposición de fundido
Tg	Temperatura de transición vítrea
DSC	Calorimetría diferencial de barrido
DMA	Análisis dinámico mecánico
CAD	Dibujo asistido por computadora

Agradecimientos

Director: Dr. Carlos Velasco Santos

Co-Director: Ana Laura Martínez Hernández

Co-Director: José Arturo Toscano Giles

Dedicatorias

Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Eleazar y Elvia quienes con su paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy una meta más.

A toda mi familia porque con sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Finalmente quiero dedicar esta tesis a todas aquellas personas que confiaron en mí y siempre me dieron los mejores consejos.

Resumen

Los polímeros con memoria de forma (SMP) son un tipo de material inteligente los cuales poseen la propiedad conocida como efecto de memoria de forma (SME). Esta propiedad permite que los materiales una vez deformados recuperen su forma original bajo estímulos externos como humedad, calor, campo eléctrico, campo magnético, etc. En la fabricación aditiva este tipo de material inteligente permite el diseño de estructuras que pueden cambiar con el tiempo, introduciendo así el concepto de impresión 4D.

En este estudio se analiza el uso de materiales de impresión 4D basados en polímeros termoplásticos PLA/PHA (ácido poliláctico / polihidroxialcanoato). Se ha informado que el PLA es un material inteligente en la literatura. Sin embargo, no se ha informado de PLA / PHA como polímero con memoria de forma. Por otro lado PLA/PHA es un bio-poliéster con la característica fundamental de ser 100% biodegradable y con un comportamiento como los polímeros a base de petróleo.

Aplicando la técnica de impresión FDM, también conocida como modelado por deposición fundida, se desarrollan estructuras auxéticas, en panal, voronoid y kagome. De esta forma, se analiza la velocidad de recuperación así como el porcentaje de recuperación de forma bajo el estímulo de calor o inmersión térmica. Las muestras se imprimieron en diferentes espesores (5 mm, 7,5 mm, 10 mm) para verificar también la influencia de la densificación en el proceso de recuperación.

Por otro lado, se contempla el análisis de la ley constructal en el diseño de estructuras ramificadas para analizar el flujo de calor que influye en la recuperación de las muestras.

Los parámetros que se analizan en este estudio se centran principalmente en la temperatura de transición vítrea (T_g). En el caso del material seleccionado, la T_g reportada por el proveedor oscila alrededor de los 55°C . La temperatura de transición vítrea es el punto clave que permite la activación de la recuperación de forma, es decir, la transición de una forma temporal a una forma original. La T_g de PLA/PHA es más baja que la de PLA, lo que permite un comportamiento inteligente en un rango de temperatura más bajo. La geometría y la complejidad juegan un papel importante en la recuperación inteligente, lo que indica que la diversificación de formas obtenidas mediante la fabricación aditiva es un parámetro importante para generar diferentes opciones de respuesta en un material, abriendo nuevas puertas para la impresión 4D.

Palabras claves

Shape-Memory-Polymer, Additive manufacturing, recovery speed, 4D printing, PLA/PHA.

Abstract.

Shape memory polymers (SMP) are a type of smart material that has the property known as shape memory effect (SME). This property allows materials once deformed to recover their original shape under external stimuli such as humidity, heat, electric field, magnetic field, etc. In additive manufacturing this type of intelligent material allows the design of structures that can change over time, therefore introducing the concept of 4D printing.

In this study, the use of 4D printing materials based on PLA/PHA thermoplastic polymers (polylactic acid / polyhydroxyalkanoate) are analyzed. PLA has been reported as a smart material in the literature. However, PLA/PHA as a shape memory polymer has not been reported. On other hand PLA/PHA is a bio-polyester with the fundamental characteristic of being 100% biodegradable and with a behavior like petroleum-based polymers.

Applying FDM printing technique, also known as fused deposition modeling, auxetic, honeycomb, voronoid and kagome structures are developed. In this way, the recovery speed is analyzed as well as the percentage of shape recovery under the stimulus of heat or thermal immersion. The samples were printed at different thicknesses (5mm, 7.5mm, and 10 mm) in order to also verify the densification influence in the recovery process.

On the other hand, the analysis of the constructal law in the design of branched structures is contemplated to analysis heat flow influences the recovery of the samples.

The parameters that are analyzed in this study are mainly focused on the glass transition temperature (T_g). In the case for the selected material, the T_g reported by the supplier oscillates around 55 ° C. The glass transition temperature is the key point that allows the activation of recovery of shape, that is, the transition from a temporary shape to original shape. T_g of PLA/PHA is lower than PLA allowing smart behavior in lower range of temperature. Geometry and complexity play an important role in smart recovery, indicating the diversification of shapes obtained by additive manufacturing is important parameter to generate different response options in one material, opening new gates for 4D printing.

Keywords:

Shape-Memory-Polymer, Additive manufacturing, recovery speed, 4D printing, PLA/PHA.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Es posible visualizar que la gran mayoría de los productos utilizados están basados en la constitución de materiales poliméricos. Tanto es la tendencia en el uso de este tipo de materiales que su estudio, desarrollo y mejora se ha profundizado generando con ello una nueva clase de materiales poliméricos como lo son los polímeros con memoria de forma también conocidos como SMP por sus siglas en inglés. La viabilidad y uso de este tipo de materiales por sus propiedades inteligentes son una parte importante en lo que respecta a aplicaciones específicas como el sector biomédico, el sector automotriz, el sector aeronáutico entre otros. Junto con la ayuda de la manufactura aditiva conocida también como impresión 3D se han podido lograr cada uno de estos aspectos. Es tanto el auge y crecimiento que ha tenido esta técnica que incluso hoy en día se conoce una nueva técnica llamada impresión 4D. En particular, las impresiones 4D pueden transformarse o cambiar de forma, dependiendo del paso del tiempo y las condiciones ambientales dadas, por lo que tienen el potencial de permitir la construcción de dispositivos de actuación complejos y componentes móviles, en los que se pueden eliminar sensores, piezas mecánicas y baterías. En este sentido la combinación de la manufactura aditiva con materiales inteligentes a través de la impresión 4D ofrece oportunidades para diseñar y construir estructuras inteligentes y activas.

Por otra parte la preocupación y cuidado por el medio ambiente es una de las tendencias y retos por cumplir, en virtud a ello en la última década han aparecido una serie de polímeros biodegradables y que se obtienen a partir de fuentes naturales como lo son los polímeros de PLA, de PHA o una mezcla de ambas PLA/PHA. Este tipo de polímeros tienen características muy similares a la de algunos polímeros a base de petróleo como lo es el PET y con ello es posible sustituir a los ya existentes. A pesar de ello existe una ardua tarea por seguir mejorando sus propiedades logrando con ello el desarrollo de materiales compuestos.

El objetivo de este estudio es presentar un marco que guiará a los usuarios a predecir eficazmente el cambio en el efecto de memoria de forma, de acuerdo con la influencia de los parámetros de construcción y temperatura utilizando PLA/PHA. Se ha elegido PLA/PHA para este trabajo debido a ser un material relativamente nuevo y del cual no se ha profundizado lo suficiente. El resultado de esta investigación proporcionará una mejor comprensión de cómo las geometrías, la cantidad de material y la temperatura influyen en la velocidad de recuperación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

Industria 4.0

El término industria 4.0 se acuñó en Alemania manejado por primera vez en la Feria de Hannover en el año 2011. Se trata de un concepto aplicado a la industria bajo los términos de "Internet de las cosas". En este sentido los procesos de fabricación se encuentran íntimamente ligados a la transformación digital, tecnologías de la información y particularmente, de la informática y el software.

El término de la industria 4.0 hace referencia a una estructura de organización y control en relación a la cadena de valor, esto se logra a través del ciclo de vida del producto y a lo largo de los sistemas de manufactura guiada por las tecnologías de la información. (Román, 2016)

La también llamada cuarta revolución industrial es un modelo enfocado en el uso de diversas técnicas de carácter especializado como lo son las técnicas de producción y operación con tecnologías inteligentes como la robótica, inteligencia artificial, la nanotecnología, el internet de las cosas entre otras.

La creciente demanda de consumo y la constante búsqueda y/o implementación de la innovación, han sido puntos fundamentales en el modelo de la industria 4.0, a su vez, guiado de herramientas tecnológicas y digitales que permite que los procesos sean óptimos y eficientes en virtud de agilizar los procesos de producción.

La industria 4.0 es una escenario que implica el rápido crecimiento y en el cual las ventajas competitivas y estratégicas adoptadas van tomando áreas, donde la pregunta no es si hay o no que adoptar estas innovaciones sino cómo y cuándo hacerlo. (Bearzotti, 2018)

Así al introducir este nuevo concepto (industria 4.0) y junto con la manufactura conlleva a la integración de los conocimientos en referencia a las técnicas de fabricación así como de la información transformándose y desarrollando técnicas renovadas de sistemas de manufactura, de negocios y de gestión, permitiendo la optimización de los procesos y por ende alcanzando una mayor aceptación. La idea de este concepto es responder de forma eficiente las necesidades de su mercado.

La terminología que existe sobre este nuevo tema (industria 4.0) es relativamente nuevo, a pesar de ello, han surgido muchas definiciones en el cual una de ellas consiste en interpretarlo como una maquinaria física con dispositivos electrónicos y software que trabajan en conjunto (orientada a los sistemas ciberfísicos; y/o de cómputo que pueden interactuar con humanos) y permiten predecir e inspeccionar los negocios, así como los resultados organizacionales.

Manufactura aditiva

La tecnología de impresión se origina conceptualmente en el proceso de fabricación aditiva que tiene como objetivo principal diseñar y fabricar estructuras funcionales a partir de capas controladas de materiales que se fusionan en un objeto diseñado con dimensiones deseadas que abarcan geometrías y propiedades tridimensionales.

Como resultado de un mercado en rápido crecimiento con un gran impacto global en las industrias (ingeniería espacial, dispositivos biomédicos y biomateriales, defensa y herramientas de comunicación entre otras), la transición de la investigación a la fabricación está entrando en una nueva fase en la que el diseño complejo de las estructuras 3D han tomado un camino hacia un enfoque renovado para el procesamiento y la fabricación.

La impresión 3D ha ganado gran importancia y notoriedad desde su creación en la década de los 80. Sus aplicaciones se han expandido en muchas áreas: fabricación, diseño de productos, biotecnología, diseños personalizados entre otros.

La manufactura aditiva o impresión 3D tiene la habilidad de producir pequeñas cantidades de objetos personalizados a costos relativamente bajos. Sin embargo, actualmente se usa para fabricar prototipos y maquetas. A pesar de ello, su campo de aplicación resulta muy prometedor pues se pretende utilizar en la producción de piezas de repuesto, coronas dentales, miembros artificiales, entre otras aplicaciones. La impresión 3D se ha comparado con tecnologías disruptivas como libros digitales y descargas de música permitiendo a las empresas servir de manera rentable a pequeños segmentos del mercado, así como operar con poco o ningún inventario de productos terminados sin vender. (Berman, 2012)

Junto con las numerosas aplicaciones para la impresión en 3D, existen muchos métodos y técnicas diferentes, (ver tabla 3). En ellas destacan: la estereolitografía (SLA), sinterización selectiva por láser (SLS), modelado por deposición fundida (FDM).

En este sentido la tecnología de impresión es una técnica que tiene como objetivo crear o desarrollar objetos tridimensionales a partir de modelos y/o diseños, esto se logra con ayuda de equipos de lectura e interpretación digital. Con base en esto, la técnica de impresión 3D, se define como la construcción de objetos en el espacio mediante la adición sucesiva de capas.

Otra manera de definir la manufactura aditiva es la siguiente:

“Es un proceso a través del cual el material, que puede ser plástico o metal, será depositado mediante capas de forma controlada en los puntos en que este es necesario. Con esta técnica,

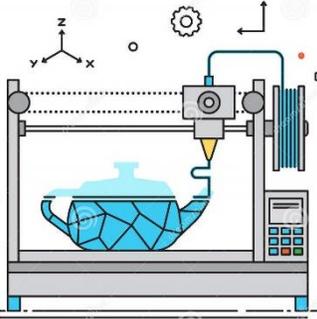
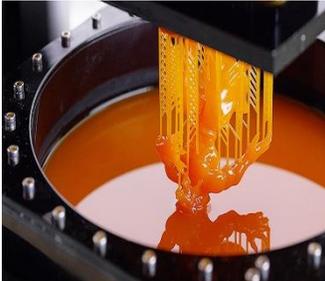
que se conoce comúnmente como «impresión 3D», se fabrican objetos con formas geométricas personalizadas según las necesidades de los clientes”

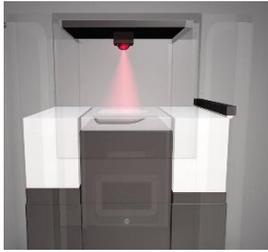
Tipos de impresión

La fabricación aditiva o impresión 3D es una técnica que ha ganado terreno significativo en los últimos años pues permite construir estructuras complejas proporcionando flexibilidad en el diseño, así como importantes ahorros de materiales.

Existen varios tipos de proceso de fabricación aditiva que pueden clasificarse de acuerdo con el material utilizado para la fabricación, tal como la fabricación de impresiones a base de líquidos, fabricación a base de sólidos y la fabricación a base de polvos.

Tabla 1. Resumen Tecnologías de impresión 3D. Información e imágenes tomadas de www.tridimx.com/tecnologias/.

Tipo de impresión	Descripción	Ilustración
FDM o modelado por deposición de fundido	<p>El modelado por deposición de fundido es una técnica de impresión que consiste en el calentamiento de un polímero termoplástico sobre una base o cama.</p> <p>El material, pasa de un estado sólido a un estado líquido por medio de una boquilla la cual genera pequeños hilos que se van solidificando y a su vez constituyen la estructura de capa por capa.</p>	
SLA o estereolitografía	<p>Esta técnica basa su funcionamiento en el uso de polímeros termoestables o termo fijos, es decir, en el uso de resinas líquidas sensible a la luz. El uso de luz UV es esencial pues permite la solidificación de la resina (capa por capa). Con este método se consiguen piezas de altísima calidad.</p>	

<p>SLS o sinterizado selectivo por láser</p>	<p>Esta tecnología basa su función en el uso de láser para imprimir los objetos en 3D y en el uso de materiales en polvo (cerámica, cristal, nylon, poliestireno, etc.).</p> <p>Su funcionamiento es muy similar a la de la tecnología SLA también llamada estereolitografía. En este tipo de impresión el láser es utilizado para fundir el material o polvo y posteriormente solidificarlo.</p>	

Materiales inteligentes

Los materiales inteligentes son una clase de materiales que pueden cambiar sus propiedades físicas (color, volumen, rigidez, forma) cuando se exponen a diferentes estímulos externos (temperatura, niveles de pH, magnetismo, humedad entre otros).

El estudio y análisis de los materiales inteligentes ha aumentado constantemente desde hace algunos años. Es así como en la literatura anglosajona la terminología en este tema tiene muchas variaciones, existiendo términos como: “intelligent materials”, “smart materials”, “adaptive materials”. También se han encontrado términos como “stimuli responsive material” y “active materials”.

Con la introducción de los materiales inteligentes, los componentes fabricados por impresión 3D pueden alterar su forma o propiedades con el tiempo como respuesta a los estímulos externos aplicados. Por lo tanto, esto da lugar a un nuevo término llamado "impresión 4D"

De esta manera los materiales inteligentes, conocidos también como materiales multifuncionales, son aquellos que poseen la característica fundamental de cambiar sus propiedades físicas en presencia de un estímulo. A pesar de que todavía no existe una estricta

conceptualización sobre los términos exactos entre materiales inteligentes y los que no lo son, se acepta que ellos poseen ciertas características, las cuales se describen en la siguiente definición:

Los materiales inteligentes son aquellos que actúan como sensores, 'actuadores' y mecanismos de control, intrínsecos o embebidos, por los cuales es capaz de sentir un estímulo, de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original tan pronto como el estímulo termine. (Joshi, y otros, 2019)

Los materiales inteligentes más comunes pueden clasificarse en:

- Materiales con memoria de forma
- Materiales electro y magneto-activos
- Materiales foto y cromo-activos

Como es de esperarse, el campo de los materiales inteligentes es amplio y variado, no sólo respecto a la terminología empleada, sino también en referencia a sus aspectos técnicos y aplicaciones.

Polímeros con memoria de forma

La viabilidad y uso de los polímeros con memoria de forma conocidos también como SMP por sus siglas en inglés, ha crecido enormemente en los últimos años como resultado del conocimiento emergente y de las técnicas relacionadas con materiales compuestos y de la manufactura aditiva.

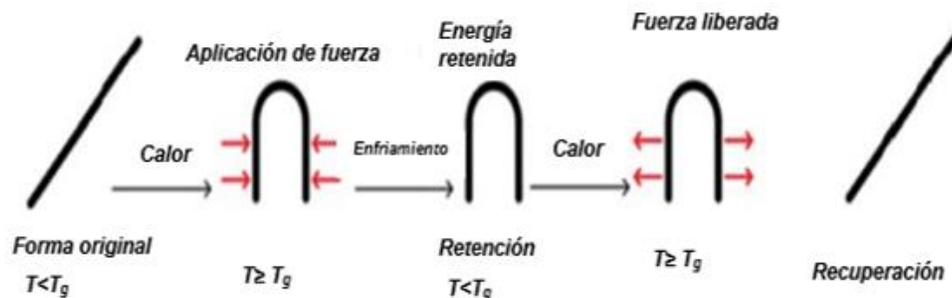
Los materiales con memoria de forma tienen la habilidad de retener una forma temporal y recuperar su forma original o permanente, cuando se le somete a un estímulo externo (normalmente asociado a la temperatura). A este tipo de característica se le conoce como efecto de memoria de forma o SME por sus siglas en inglés. (Hager, Bode, Weber, & Schuber, 2015)

Los Polímeros con memoria de forma son la clase de material que ofrece deformación mecánica ante un estímulo externo. En simples palabras, los SMP's recuerdan sus formas y esta transformación es realizada en un entorno de estímulo. La figura 1 muestra el comportamiento típico de este tipo de materiales los cuales trabajan en virtud de la temperatura de transición vítrea conocida como T_g . De acuerdo a (Rayate & K. Jain, 2018) las formas de los polímeros con memoria de forma están determinadas por la elasticidad de la red, pero

pueden ser retenidas en forma temporal por inmovilización ya sea cristalización o vitrificación. Este proceso de cambio de forma es dependiente del tiempo.

En este tipo de polímeros existen dos fases características, la fase permanente o también conocida como forma original la cual está definido por las propiedades y estructura semi-cristalinas del polímero y la forma temporal la cual es determinado de forma manual (a esta etapa se le conoce como programación de forma).

Así para que un SMP logre un comportamiento de cambio de forma, requiere un paso de programación y un paso de recuperación.



[Figura 1. Representación esquemática de los polímeros con memoria de forma en un ciclo termo-mecánico típico. De Jinsong Leng y Haibao Lu, Yanju Liu et al. "Shape-Memory Polymers—A Class of Novel Smart Materials". MRS Bulletin. Volumen 34](#)

De acuerdo a la figura 1 las etapas en las que un polímero inteligente o SMP desarrolla su comportamiento de propiedad inteligente son las siguientes:

1. Para que un SMP pueda responder a un estímulo como la temperatura, se necesita el procesamiento inicial en la cual se lleva a cabo la construcción de una muestra (ya sea por impresión, moldeado, hilado etc.), este paso es importante pues con ello se establece la forma permanente de la muestra.
2. Para la determinación de la forma temporal es necesario llevar a cabo la fase de programación la cual consiste en someter en calor la muestra en su forma permanente para obtener un ablandamiento y con ello poder deformarlo mediante un esfuerzo o carga.
3. La retención de la forma temporal queda determinada mediante el enfriamiento de la muestra una vez que ya ha sido deformada.
4. El análisis de recuperación de forma para un SMP está en función del estímulo de temperatura lo cual se encuentra asociado a la denominada temperatura de transición vítrea T_g .

Los polímeros con memoria de forma que son activados térmicamente son uno de los principales temas de investigación en la última década debido a su ligereza, facilidad de formación y fabricación, bajos costos asociados con la fabricación, altas deformaciones y relaciones de recuperación de forma. Estos materiales podrían utilizarse en diversas aplicaciones de ingeniería y dispositivos médicos, así como actuadores como pinzas y robots de origami.

Como parte de algunas aplicaciones respecto a este tipo de materiales (Wache, Tartakowska, Hentrich, & Wagner, 2003) realizaron un estudio de viabilidad y un desarrollo preliminar de una endoprótesis vascular de polímero con un SMP como sistema de administración de fármacos. El campo de aplicación de este stent de polímero se demostró en ensayos previos. El uso del stent SMP como sistema de administración de fármacos conduce a una reducción significativa de la reestenosis y la trombosis.

Por otro lado (Santo, Quadrini, Accettura, & Villadei, 2014) proponen e investigan el desarrollo de compositos con memoria de forma para estructuras auto plegables en aplicaciones de tipo aeroespacial.

Como es de esperarse los polímeros de activación térmica se han estudiado ampliamente en los últimos años, sin embargo, la mayor parte de la investigación se realiza en condiciones de laboratorio bien controladas, donde la activación se ha realizado utilizando hornos o fuentes de calor controladas.

Temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea conocida comúnmente como T_g es el cambio reversible en la cual un polímero semicristalino adquiere características de un polímero amorfo desde o hacia una condición viscosa, gomosa y/o elástica.

La temperatura de transición vítrea es la temperatura en la cual las propiedades físicas de un polímero cambian de las de un material similar al cristal a las de un material elástico. Por lo general, se asocia con el inicio del movimiento de largo alcance en el esqueleto del polímero debido a los efectos de la temperatura. Tanto las propiedades mecánicas como las eléctricas se degradan significativamente a medida que la temperatura aumenta por encima de la T_g .

Una manera por la cual se puede calcular la T_g es por medio del coeficiente de expansión volumétrico, ya que en el punto de la T_g se puede ver un cambio de la inclinación de la curva volumen-temperatura. Otra de las formas comunes de determinar la temperatura de transición vítrea es por análisis térmico diferencial o DTA o por calorimetría diferencial de barrido (DSC).

Poliésteres usados en impresión 4D

Los poliésteres son moléculas poliméricas lineales que contienen en su estructura al grupo funcional éster. El poliéster termoplástico más conocido es el polietileno-tereftalato también conocido como PET. Este material está formado sintéticamente con etilenglicol más tereftalato de dimetilo, produciendo así el polímero. Los poliésteres en general son derivados por la condensación de un diácido con un diol.

Dado a que existe una gran variedad de poliésteres, en la tabla 4, se señalan los dos principales polímeros usados en la impresión 4D atendiendo al hecho de ser materiales biodegradables.

Tabla 2. Poliésteres usados en la impresión 4D. De Sara Reynoso. "Los polímeros plásticos". 2ª edición.

Cadena	Tipo	Tipo de poliéster
Alifáticos (polímeros de cadena abierta)	Homopolímero	Ácido poli-láctico (PLA)
		Polihidroxialcanoato (PHA)

Características del PLA

El PLA (Figura 2) es un poliéster termoplástico, alifático cuya molécula predominante y precursora es el ácido láctico. Este tipo de polímeros pueden ser obtenidos a partir de recursos renovables tanto de la condensación directa del ácido láctico (ácido 2-hidroxipropiónico) como de la polimerización de apertura de anillo (ROP) por sus siglas en inglés, del dímero de lactida cíclica. Por tanto este tipo de polímero ha adquirido una notable atención en los últimos años dado a la posibilidad de sustituir a los termoplásticos tradicionales

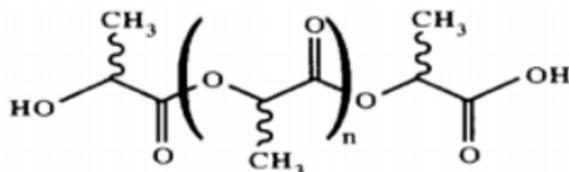


Figura 2. Representación de la estructura del PLA. De Lissett C. Cárdenas Acosta. "Materiales para el envasado activo de alimentos basados en PLA o PHBV". Universitat Politècnica De València.

En comparación con otros biopolímeros, la producción de PLA tiene numerosas ventajas, que incluyen:

- 1) Respeto con el medio ambiente: además de derivarse de recursos renovables (por ejemplo, maíz, trigo o arroz), el PLA es biodegradable, reciclable y compostable.

- 2) Biocompatibilidad: el aspecto más atractivo del PLA, especialmente con respecto a las aplicaciones biomédicas. Es un material biocompatible pues no debe producir efectos tóxicos o cancerígenos en los tejidos locales.
- 3) Ahorro de energía: el PLA requiere entre un 25% y un 55% menos de energía para producir que los polímeros a base de petróleo y las estimaciones muestran que esto se puede reducir aún más a menos del 10% en el futuro.

Las propiedades físicas y mecánicas del PLA obedecen en gran medida de la composición del mismo, de su peso molecular y de su cristalinidad lo cual conlleva a que dicho material puede llegar a ser blando como el polietileno, flexible como un elastómero o tan duro como el acrílico. El PLA es un candidato líder para reemplazar polímeros de fuentes petroquímicas debido a su capacidad para adaptar las propiedades mecánicas, físicas, micro-estructurales, químicas y de degradación para aplicaciones que van desde bienes de consumo hasta aplicaciones biomédicas. Como parte de algunos trabajos desarrollados con este material polimérico (Shameli, y otros, 2010) desarrollaron compositos de PLA con partículas de plata con la idea de obtener materiales tipo películas los cuales tengan funciones útiles antibacterianas. (Yoshida, Dhandayuthapani, Maekawa, & Kumar, 2011), señalan el uso del PLA para aplicaciones de ingeniería de tejidos donde se ha demostrado un crecimiento exponencial respecto al tiempo, Como es de esperarse las aplicaciones y objetos de estudio del PLA son muy prometedoras. Por lo que para cualquier persona enfocada en trabajar con dicho material es indispensable que conozca sus características. En este sentido, la característica general del PLA es la de ser un poliéster semicristalino. Sin embargo, su cristalinidad depende mayormente de la estereoquímica de los monómeros que constituyen el polímero. El PLA que contiene más del 93% de ácido L-láctico es semicristalino en contraste con el PLA con ácido L-láctico entre 50-93% que es amorfo. El ácido D-láctico, en alta proporción, evita la cristalización del PLA.

A pesar de sus variaciones con respecto a las propiedades mecánicas, el PLA posee interesantes características como lo son la estabilidad térmica, fácil procesamiento y efecto de biodegradabilidad. En comparación con algunos de los principales termoplásticos comerciales (PS, PP, PET), el PLA posee, en general, propiedades mecánicas superiores y resistencia térmica inferior. (Kalia & Avérous, 2011)

Por otra parte el PLA presenta propiedades termoplásticas, físicas, mecánicas, de barrera y ópticas que dependen principalmente de la forma del estado sólido, así como de su grado de cristalización. Además de ello la temperatura de transición vítrea (T_g) se encuentra

íntimamente ligado al peso molecular y la pureza óptica del polímero. El PLA presenta una entalpía de fusión de 40-50 J/g, una Tg de 58-60 °C y una temperatura de fusión (Tm) de 180°C, siendo esta última la temperatura requerida para su procesamiento, por tecnologías basadas en el punto de fusión. (Garlotta, 2001)

El PLA como material inteligente

De acuerdo a los trabajos reportados por (Leist, Gao, Chiou, & Zhou, 2017), el ácido poliláctico se utiliza como material inteligente debido a sus propiedades termoplásticas. El PLA puede conservar una forma permanente por debajo de su temperatura de transición vítrea (Tg) cuando se encuentra en estado vítreo. Sin embargo, por encima de su Tg, el PLA se vuelve gomoso y fácil de deformar en una forma temporal. La forma temporal se puede definir cuándo se aplica esfuerzo al material polimérico a medida de que esta se va enfriando por debajo de su Tg. El PLA vuelve a su forma permanente cuando se recalienta por encima de la temperatura de transición vítrea.

El ácido poliláctico es un termoplástico semi-cristalino que posee una mezcla de estructura cristalina y amorfa. Posee una Tg alrededor de 58–60 ° C y una temperatura de fusión (Tm) alrededor de 150– 220 ° C. La energía de deformación almacenada se puede liberar ya que las cadenas de polímero no están restringidas cuando se calientan por encima de la temperatura de conmutación, Tg o Tm. Esto significa que a medida que la temperatura aumenta por encima de la Tg del PLA, las cadenas de polímero exhiben una mayor movilidad que permite la recuperación de la forma de vuelta a su forma permanente.

Características del PHA

Los polihidroxialcanoatos o PHAs (figura 3) son biopolíesteres lineales biocompatibles y biodegradables sintetizados intracelularmente por la acción de bacterias o microorganismos que participan en la fermentación de azúcares o lípidos. Las bacterias lo producen como elementos de almacenamiento de energía los cuales al ser extraídos dan lugar a propiedades similares a la de los plásticos. Los estudios más recientes se han enfocado en el desarrollo de sustratos económicos y en estrategias de extracción los cuales permitan la reducción de los costos y con ello incursionar en el mercado de los polímeros plásticos. Los PHAs son materiales que se pueden encontrar como polímeros termoplásticos así como de tipo elastómeros,. Este tipo de material puede moldearse por inyección o extruirse, su propiedad más importante es el ser biodegradables.

Algunas de las características generales de las PHA se resumen en los siguientes párrafos:

- Insoluble en agua y resistente a degradación por agua.

- Resistencia a los rayos UV aunque con poca resistencia a ácidos y bases.
- Soluble en cloroformo y otros hidrocarburos clorados.
- Biocompatible lo que significa que es apto para aplicaciones en el sector bio-médico.
- Se hunde en agua, facilitando su biodegradación anaeróbica en sedimentos.
- No es tóxico.
- Menos "pegajoso"

Los PHA tienen particularidades muy parecidas a las de los polímeros plásticos, es decir obtenidos del petróleo, como el polipropileno y polietileno, a su vez, tienen la excelente característica de que pueden ser sintetizados a partir de fuentes de carbono renovables, son biodegradables (pueden ser degradados por muchos microorganismos). Estas propiedades les confieren una gran importancia como substitutos de los plásticos convencionales.

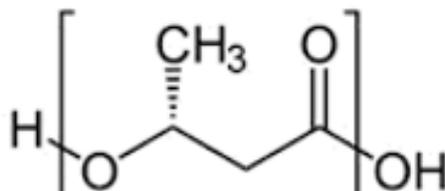


Figura 3. Representación de la estructura del PHA. De Lissett C. Cárdenas Acosta. "Materiales para el envasado activo de alimentos basados en PLA o PHBV". Universitat Politècnica De València

La polimerización de los ácidos hidroxialcanoicos, por efecto de las enzimas intracelulares, es resultado de la condensación del grupo carboxilo de un monómero (ácido hidroxialcanoico), con el grupo hidroxilo del siguiente, dando como resultado un enlace éster y por ende el termino conocido como bio-poliéster. (Khanna & Srivastava, 2008)

Los PHA se caracterizan por sus pesos moleculares altos, así como propiedades termoplásticas o elastoméricas, y en particular a su principal aplicación en diversos sectores como la industria de empaque, ciencias médicas, agricultura y alimentos, así como para aplicaciones en materias primas para la síntesis de químicos.

(Maestro & Sanz, 2017), señalan que los PHA's químicamente son polioxoésteres de monómeros del ácido R-hidroxialcanoico y por lo general, se clasifican según el número de átomos de carbono de los grupos alquilo: los PHA de cadena pequeña (scl-PHA) contienen de 3 a 5 átomos de carbono como poli (3-hidroxibutirato) o poli (4- hidroxibutirato), mientras que los PHA de cadena media (mcl-PHA) poseen de 6 a 14 átomos de carbono como el poli (3-hidroxihexanoato) o poli (3-hidroxi octanoato). Los PHA de cadena larga (lcl-PHA) que consisten en hidroxiaácidos con más de 14 átomos de carbono son más escasos.

Una de las desventajas de este tipo de polímeros es el costo de producción y el grado de degradación por efecto térmico así como sus funcionalidades limitadas. Para evitar este tipo de inconvenientes los polihidroxicanoatos se modifican agregando otros componentes los cuales puedan mejorar sus propiedades y por ende un mejor desarrollo en aplicaciones de diversas índoles. Un ejemplo claro, de este tipo de materiales compuestos son los filamentos de PLA/PHA los cuales tienen un significativo mejoramiento en sus propiedades mecánicas y térmicas.

PLA/PHA como material inteligente

Dado a que el ácido poli-láctico posee las características de ser un material inteligente, el desarrollo de polímeros con PLA/PHA contempla el uso y desarrollo de nuevos materiales con mejores propiedades.

Los polímeros termoplásticos de PLA/PHA conservan los efectos de recuperación de forma por lo que son excelentes candidatos para poder utilizarse en la impresión 4D. La figura 4 muestra un comportamiento típico de recuperación de forma con el uso de filamentos impresos de ácido poli-láctico con polihidroxicanoatos.

La tabla 3 describe las propiedades del filamento polimérico de PLA/PHA más sobresalientes:

Tabla 3. Parámetros del filamento de PLA/PHA. Información tomada de www.3dmarket.mx y www.colorplus3d.com

Características	Polímero de PLA/PHA	
Densidad	1.24 g/cm ³	
Temperatura de impresión	195-220°C	
Temperatura de transición vítrea Tg	55°C	
Módulo de elasticidad	2960 MPa	
Módulo de flexión	3295 MPa	

Al lograr estas modificaciones, es posible obtener un polímero con mayores efectos de recuperación útiles para la manufactura aditiva. Por lo que el uso de PLA/PHA se considera como un polímero con memoria de forma.

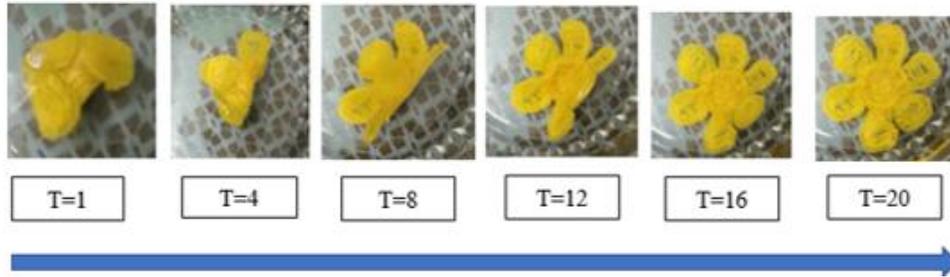
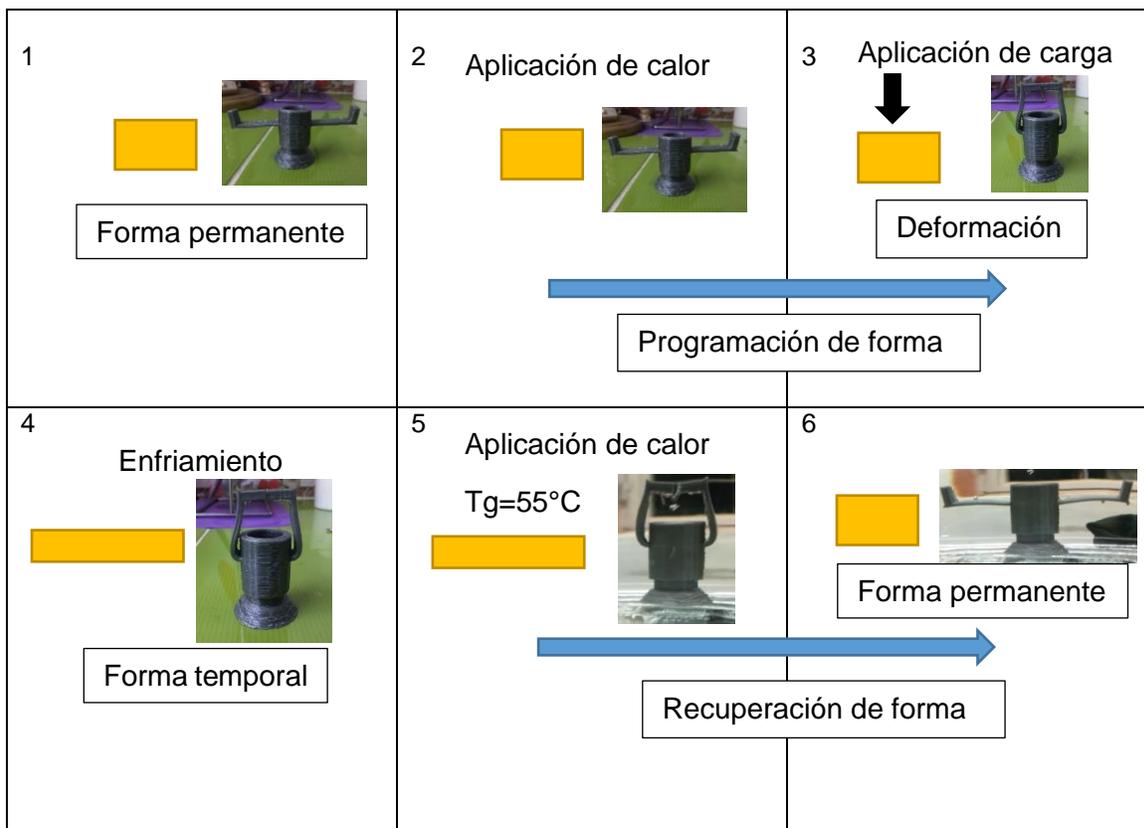


Figura 4. Muestra impresa con polímero de PLA/PHA, se observa el tiempo de recuperación en segundos de una forma temporal a una forma permanente. Fuente propia.

Las etapas para visualizar el efecto de recuperación de forma del polímero de PLA/PHA se puede visualizar en la siguiente tabla.

Tabla 4 Programación y recuperación de forma del PLA/PHA



Precusores de la impresión 4D

Las técnicas de manufactura aditiva o impresión 3D de compuestos higromórficos permiten el inicio del concepto de impresión 4D ya que este tipo de materiales puede evolucionar con el tiempo en respuesta a un estímulo de humedad. Básicamente cuando una fibra natural (madera, lino, yute, cáñamo entre otras) son usados como refuerzos para compositos, estos sufren de sensibilidad a la humedad lo cual genera un cambio en su forma. (Le Duigou, Castro, Bevan , & Martin, 2016) Recientemente se han desarrollado compuestos o biocompuesto de fibra natural auto-conformables inducidos por humedad (llamados bio-compuestos higromorfos), inspirándose en la relación estructura/función de los materiales naturales, como se observa a través de los mecanismos de dispersión de semillas de pino de conos.

Las pinos de conos ofrecen un ejemplo común de cómo un tejido estructurado responde a un estímulo ambiental. Un cambio en la humedad relativa hace que un cono cerrado y compacto se abra gradualmente como se muestra en la figura 5.

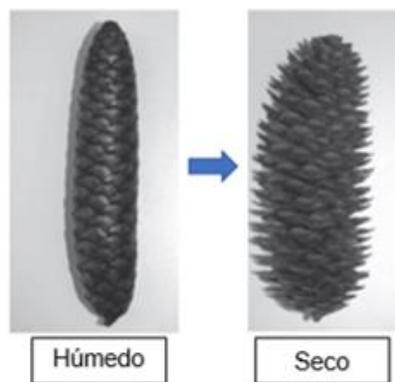


Figura 5. Efecto de higroscopia en pinos de conos. Húmedo (cerrado) y seco (abierto). . De E. Reyssat y L. Mahadevan. "Hygromorphs: from pine cones to biomimetic bilayers". Journal of the Royal Society Interface.

Impresión 4D

(Raviv, y otros, 2014) Introdujeron por primera vez el término "impresión 4D", donde los objetos estáticos impresos en 3D cambiarían sus formas con el tiempo. Poco después, el primer artículo de investigación sobre impresión 4D se publicó en 2013 utilizando el concepto de compuestos activos impresos (PAC) donde una hoja impresa puede transformarse en una configuración compleja mediante el uso del efecto de memoria de forma (SME). Desde entonces, la impresión 4D generó una gran atención en los medios públicos, así como en comunidades de investigación de materiales inteligentes e impresión 3D. La impresión 4D se definió inicialmente como "impresión 3D + tiempo", siendo la cuarta dimensión el tiempo, pero el concepto también ha evolucionado en los últimos años.

Es así como la impresión 4D es un término que se acuñó recientemente para describir la integración de la impresión 3D y las tecnologías de materiales activos para realizar componentes impresos que se pueden cambiar entre múltiples configuraciones a través de un estímulo. Esta ha traído un gran interés desde su primera conceptualización en 2013.

Si bien la tecnología de impresión 3D se ha utilizado para crear estructuras estáticas a partir de datos digitales en coordenadas 3D, la impresión 4D agrega el concepto de cambio en la configuración impresa a lo largo del tiempo, dependiendo de los estímulos ambientales. (Gardan, 2018)

El concepto de cuarta dimensión se deriva del rápido crecimiento y la investigación interdisciplinaria de materiales inteligentes, impresoras 3D y diseño. En comparación con los objetos estáticos creados por la impresión 3D, la impresión 4D permite que una estructura impresa cambie su configuración o función con el tiempo en respuesta a estímulos externos como se muestra en la figura 8.

En la impresión 4D las formas están determinadas por la elasticidad de la red, pero pueden almacenarse en formas temporales por inmovilización del material por cristalización o vitrificación. Este proceso de cambio de forma depende del tiempo y se logra en un entorno de estímulo. El estímulo requerido para activar la estructura estática puede ser en forma de luz, calor, pH, agua, campo magnético, etc. Hasta la fecha, los hidrogeles y los polímeros con memoria de forma (SMP) son los dos principales polímeros utilizados en la impresión 4D.

La tecnología de impresión en 4D puede resultar en un método innovador que cambie la forma en que se perciben los trabajos de ingeniería desde los más pequeños y sencillos hasta los más complejos.

El potencial de este tipo de impresión va más allá de sustituir a la impresión 3D, pues pretende que se cumplan las siguientes características:

1. Rapidez: un reto desafiante a la hora de diseñar objetos de mayor tamaño.
2. Automatismo y uso fácil de los materiales: Para desarrollar productos útiles en el mercado, las impresoras 3D tendrán que implementar una variedad de materiales dentro de un solo proceso de acumulación. La investigación para el desarrollo de los nuevos materiales (multimaterial) se establece con el fin de beneficiar algunas técnicas de impresión sobre otros. En este sentido, la impresión FDM tiene un alto potencial para dar cabida a múltiples materiales.

Actualmente, hay dos enfoques en la impresión 4D que permiten el control gradual. Un enfoque se basa en el uso de múltiples materiales impresos y activados por un estímulo adecuado. La principal ventaja de este enfoque es el diseño multimaterial en el espacio.

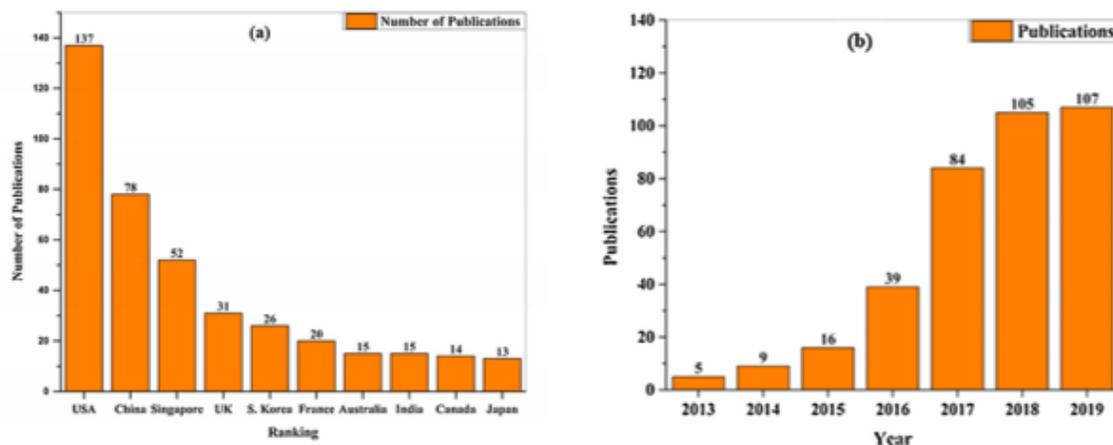
El otro enfoque en la impresión 4D explora múltiples estímulos externos para programar cambios en la forma 4D, como la estimulación multidireccional del campo magnético y el diseño de medio multientorno.

El futuro de la impresión 4D

La impresión en cuarta dimensión o también conocida como impresión 3D + tiempo es relativamente nueva, por lo que se encuentra en la búsqueda de campos de aplicación. Y es en este sentido, que este tipo de tecnología busca nuevos retos que permitan desarrollar modelos o prototipos útiles en la industria.

La investigación y búsqueda de materiales inteligentes respecto a la impresión 4D ha tenido un enorme interés en los últimos años, como resultado de ello el número de publicaciones ha crecido.

La figura 6 proporciona datos estadísticos para la investigación realizada hasta el 2019 sobre impresión 4D. En ella se destaca los principales países que han trabajado e investigado en esta nueva tendencia de los materiales.



[Figura 6. Representación gráfica del avance e investigación de la impresión 4D a\) Número de publicaciones por Países. b\) Publicaciones por año \(2013-2019\). De Siddharth Joshi, Krishna Rawat, Karunakaran. C et al. "4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges.](#)

Como es de esperarse esta nueva tendencia de los materiales inteligentes y de la impresión 4D han marcado un gran interés en el desarrollo de nuevas aplicaciones. Sin embargo, se

espera que para los próximos años su investigación se profundice mucho más, logrando con ello obtener materiales útiles en el sector aeronáutico, automotriz, biomédico entre otras muchas áreas. La idea de este concepto es aprovechar este efecto de cambio de forma y lograr dispositivos plegables en virtud de estímulos externos como la humedad o la temperatura.

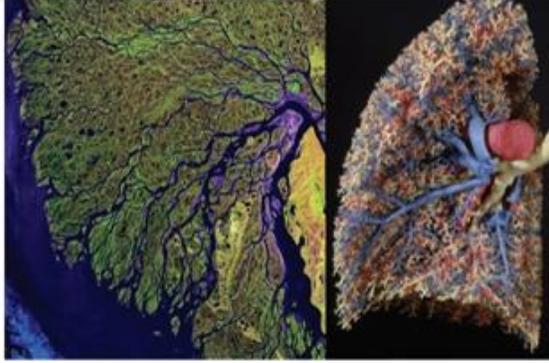
Ley constructal

Una ley de la física es una declaración concisa que resume un fenómeno que ocurre en la naturaleza. El campo de la ley constructal partió de la comprensión de que el "diseño" es un fenómeno de la física universal. Une lo animado con lo inanimado en una gama extremadamente amplia de escalas, desde el diseño del árbol del copo de nieve hasta el diseño de los animales y el diseño de los árboles de la cuenca del río Amazonas.

La ley constructal es el enunciado que establece la forma para la cual un sistema de flujo persista en el tiempo de manera que esta debe evolucionar para proporcionar un acceso más fácil a sus corrientes. Ésta es la ley de la generación de configuraciones o la ley del diseño. Los desarrollos teóricos muestran que esta ley da cuenta de (i) arquitecturas que maximizan el acceso al flujo (por ejemplo, árboles), (ii) características que impiden el flujo (por ejemplo, paredes impermeables, aislamiento) y (iii) órganos estáticos que soportan estructuras de flujo.

El término constructal es un término tomado por Bejan que procede del latín y se encuentra asociado a la capacidad de "construir".

A diferencia de los conceptos biomiméticos que se caracterizan por reproducir las formas de la naturaleza, la teoría constructal se enfoca en los principios que originan la aparición de dichas formas y los utiliza al diseño de sistemas ramificados o de flujos lo cual permite una mejor distribución de forma óptima en cuanto al término de flujo se refiere generando con ello la geometría del sistema estudiado.



[Figura 7. Ramificaciones existentes en la naturaleza. Ejemplo claro de la ley constructal](#)

La teoría constructal determina de forma simple el efecto de la complejidad de las formas que se origina en la naturaleza. En la figura 7 es posible ver como la ley constructal aparece como efecto de la naturaleza. Por ejemplo, la forma de los pulmones y bronquios, que tienen la función de maximizar la captación de oxígeno en un volumen muy reducido, o la estructura de las ramificaciones de los ríos para un mejor flujo efectivo.

La característica de los sistemas basados en flujos se encuentran directamente asociados a la “supervivencia” del mismo, pues este permite maximizar el acceso del flujo y modificar su forma o morfología. De esta manera, la teoría constructal permite el diseño de sistemas útiles como disipadores térmicos, redes de comunicaciones, entre otros.

Técnicas de caracterización en materiales

Las técnicas de caracterización en los materiales como el SEM, TEM, DSC, DMA entre otros, son instrumentos muy importantes y útiles para el análisis de estructuras así como de su composición. La caracterización es el procedimiento por el cual se estudian las propiedades de los materiales con el objetivo de conocer información sobre ellos, como su morfología, grado de resistencia, e incluso posibles aplicaciones.

En este apartado se mencionan dos de las principales técnicas utilizadas para el desarrollo de dicho proyecto.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Conocido como DSC por sus siglas en inglés, la calorimetría diferencial de barrido es un método que permite determinar y/o medir la cantidad de energía absorbida (endotérmica) o producida (exotérmica) durante un tiempo específico, y ciclo de temperatura. Mediante este método es posible establecer si un material polimérico se cura de la misma forma de un lote que otro.

Por otro lado, la técnica DSC puede ser usada para mostrar la temperatura de transición vítrea o Tg de un material polimérico (generalmente representado como una ruptura en la pendiente de la curva endotérmica en función de la temperatura).

La calorimetría diferencial de barrido es una alternativa al análisis térmico diferencial (DTA), en donde se compara la diferencia de temperatura entre un espécimen de la sustancia medida con la de un espécimen de un material de referencia, para medir las temperaturas de transición de los polímeros, especialmente cuando una determinación tiene un aspecto cuantitativo.

Análisis Dinámico Mecánico DMA

El análisis mecánico dinámico (DMA) es una técnica que se utiliza ampliamente para caracterizar las propiedades de un material en la que se aplica una pequeña deformación a una muestra de forma cíclica en función de la temperatura, el tiempo, la frecuencia, la tensión, la atmósfera o una combinación de estos parámetros.

El DMA funciona aplicando una deformación sinusoidal a una muestra de geometría conocida. La muestra puede someterse a una tensión controlada o una deformación controlada. Para una tensión conocida, la muestra se deformará en cierta medida. En DMA esto se hace sinusoidalmente. Cuánto se deforma está relacionado con su rigidez.

CAPITULO III. ESTADO DEL ARTE

Como parte del análisis de materiales poliméricos con características de ser materiales inteligentes, se desarrolla una búsqueda del estado del arte en virtud de los composites de PLA reportados como polímeros con memoria de forma o SMP. En la Tabla 5 se concentran algunas investigaciones sobre materiales compuestos con base PLA.

Tabla 5. Investigaciones sobre materiales compuestos con base PLA

¿Quién lo hizo?	Polímero	Material de refuerzo	Propiedad o estímulo	Aplicación	Proceso	Journal
Steven K. Leist, Dajing Gao, Richard Chiou y Jack Zhou	PLA	Nylon	Recuperación rápida de la forma de la arquitectura por estímulo de temperatura /humedad.	Creación de textiles inteligentes.	FDM (modelado por deposición de fundido)	Virtual and Physical Prototyping http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2017.1341815
Chuncheng Yang, Bingjie Wang, Dichen Li y Xiaoyong Tian	PLA	Fibra de carbono	Activación por temperatura directa o por un circuito eléctrico indirectamente.	Desarrollo de películas para composites activos impresos PAC	FDM modificado (modelado por deposición de fundido)	Composite Science and Technology http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1265992

Li-Hua Shao, Boxuan Zhao, Quan Zhang, Yufeng Xing y Kai Zhang.	PLA	Nanocables de plata (Ag-NWs)	Estimulo eléctrico	Desarrollo de estructuras tipo tenaza	FDM (modelado por deposición de fundido) modificado	Extreme Mechanics Letters https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100793
Fenghua Zhang, Linlin Wang, Zhichao Zheng, Yanju Liu, Jinsong Leng	PLA	Óxido de Hierro(Fe_3O_4)	Recuperación de forma por estímulo de un campo magnético y por efecto de temperatura	Desarrollo de estructuras con aplicación bio-medica	FDM (modelado por deposición de fundido)	Composites https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105571
Seokwoo Nam Eujin pei	PLA (ácido poliláctico)		Calor/humedad	Influencia en el cambio de forma de diversos marcas de PLA	FDM (modelado por deposición de fundido)	Materials doi:10.3390/ma13173754
A. Le Duigou, M. Castro, R Bevan	PLA (ácido poliláctico) Y PHA (Polihidroxicianato)	Fibras de madera recicladas	Efecto de higroscopia	Análisis en efectos de sorción y desorción de muestras en virtud del efecto higroscópico.	FDM (modelado por deposición de fundido)	Materials and Design http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018

CAPITULO IV. METODOLOGÍA

De acuerdo con las características de trabajos previos, la metodología a seguir durante la realización del proyecto se propuso de la siguiente manera, ver figura 8 y 9:

1. Como primer punto se analizaron las características de recuperación de forma del PLA/PHA esto debido a que actualmente no existe registro o documentación referida al polímero mencionado como material inteligente. Sin embargo, para el polímero puro de PLA existe en la literatura información que registre las propiedades de ser un material inteligente lo cual es tomado como base o precursor de conservar los efectos de memoria de forma para el polímero de PLA/PHA.
2. Las pruebas analizadas involucraron el desarrollo de muestras con una pluma de impresión 3D de la marca Joky así como el uso de una impresora 3D FDM de la marca Anet A8.
3. El análisis de recuperación de forma con estructuras y geometrías específicas como lo son las formas auxéticas, Honey comb, de kagome y voronoid se hicieron con diferentes espesores (5mm, 7.5mm y 10mm), así como estructuras cilíndricas. Esto se realizó con la idea de visualizar la velocidad y el porcentaje de recuperación.

Metodología para análisis de recuperación de forma con pluma 3D

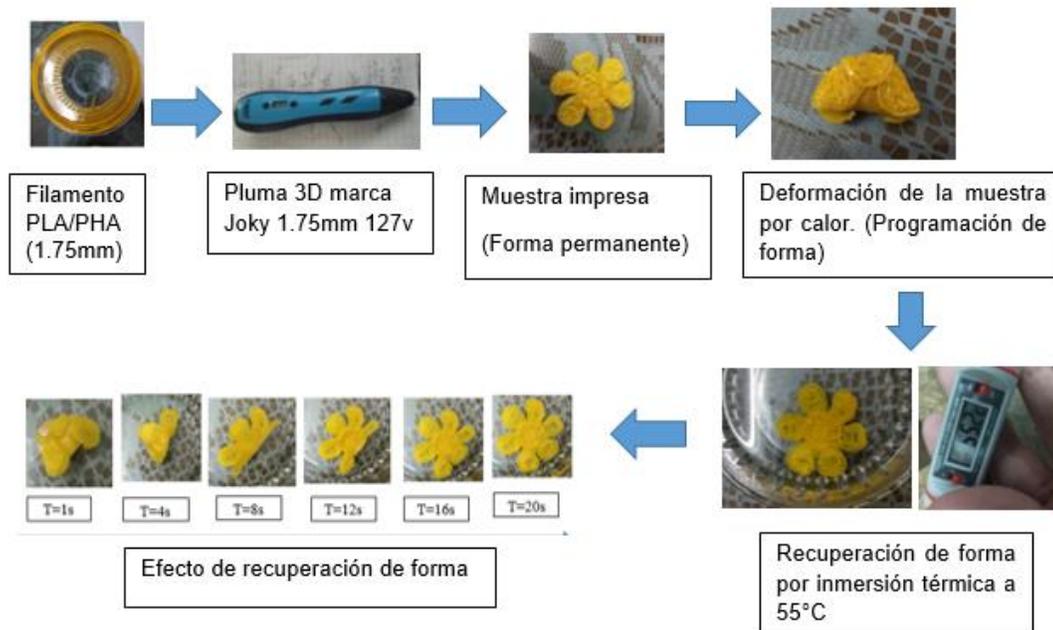


Figura 8. Metodología de impresión con pluma 3D

Metodología para análisis de recuperación de forma con impresora 3D

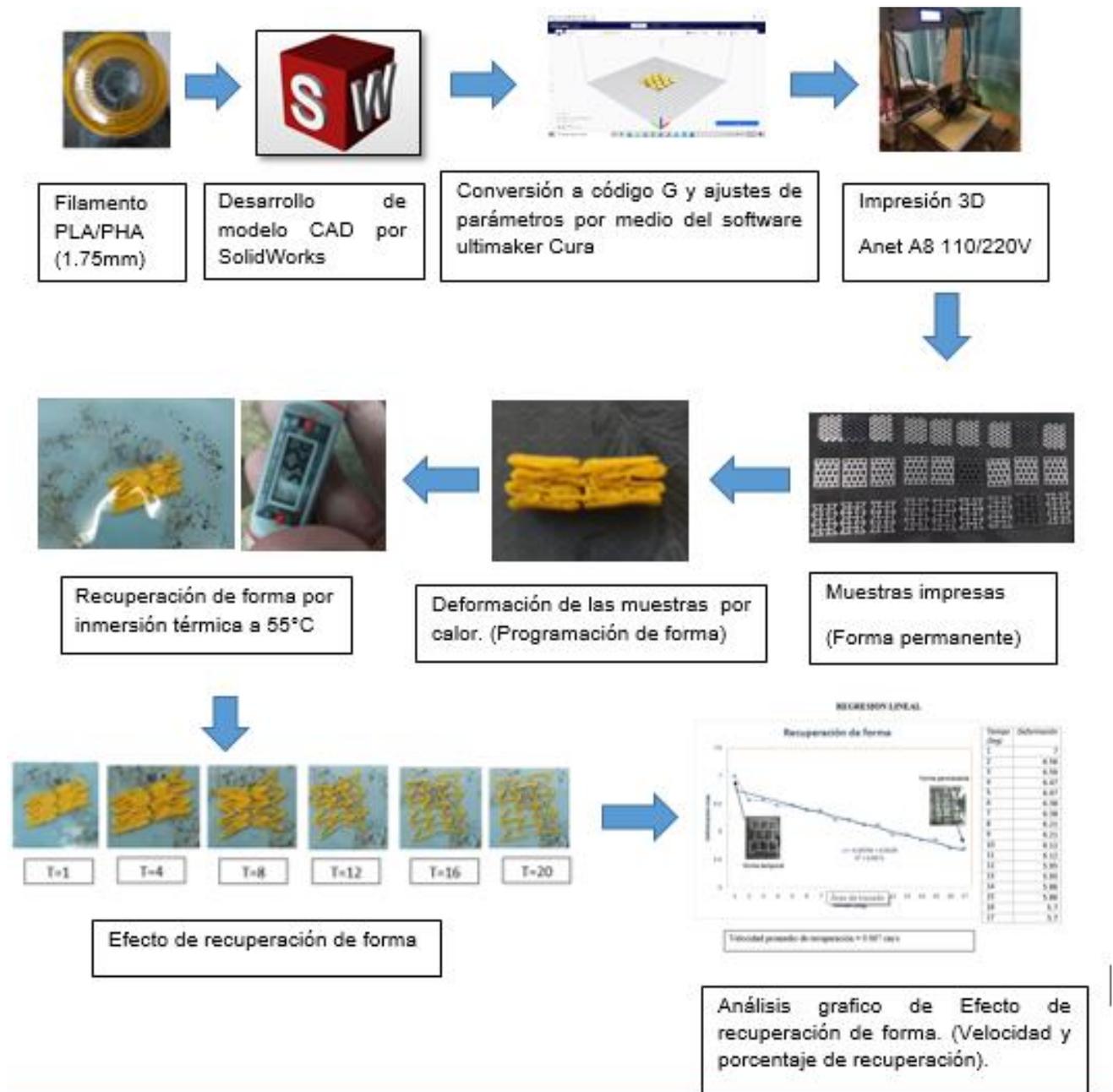


Figura 9. Metodología de impresión con impresora 3D

Impresión con pluma 3D y efecto de recuperación

Con una pluma de impresión 3D de la marca Joky (ver figura 11) para uso de filamento de 1.75 mm se hicieron algunos modelos de impresión para demostrar el efecto de memoria de forma (SME) del polímero de PLA/PHA en virtud de un estímulo externo (agua caliente). Las muestras involucraron diversas formas como estructuras tipo flor, estructuras cúbicas y de tipo ala de avión (ver figura 10).

Debido a que la pluma de impresión tiene un parámetro de ajuste de temperatura de 1-220°C, la temperatura con la cual se trabajó para el proceso de impresión fue de 190°C.

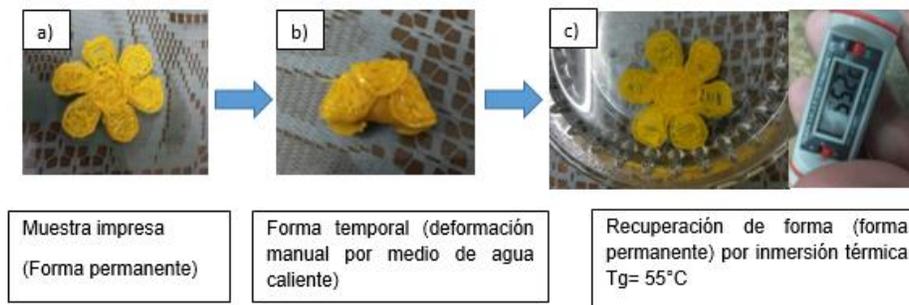


[Figura 11. Pluma de impresión 3D marca Joky 1.75mm](#)



[Figura 10. Diversas muestras impresas con pluma 3D](#)

Teniendo la muestra impresa en este caso particular una estructura tipo flor, esta se sometió a calor para ser deformada y con ello establecer la forma temporal (estructura tipo capullo), la idea de dicho proceso fue visualizar el efecto de recuperación de forma en las muestras impresas con material de PLA/PHA. El proceso de efecto de recuperación consistió en someter al material o muestra impresa, una vez que ya estaba deformado (forma temporal) en inmersión térmica a 55°C. El proceso de análisis a 55°C se llevó a cabo debido a que es la temperatura de transición vítrea (T_g) para el polímero de PLA/PHA registrada por el proveedor. La imagen 11 esquematiza lo anterior mencionado.



[Figura 12. Proceso de recuperación de forma para estructura tipo flor por estímulo hidrotérmico a 55°C. a\) Forma original o permanente, b\) Forma temporal c\) Recuperación de forma.](#)

Impresión 3D y efecto de recuperación

Ejemplificando la metodología de la figura 8, en el proceso de impresión 3D se llevó a cabo el desarrollo de diversas muestras, llevando una repetición de 3 muestras por cada estructura propuesta. Fue necesario la implementación de 2 software para la obtención de dichas probetas. El proceso y/o desarrollo se presenta en la siguiente imagen.



[Figura 13. Metodología de desarrollo de muestra Auxética por SolidWorks y ajustes de parámetros en ultimaker cura.](#)

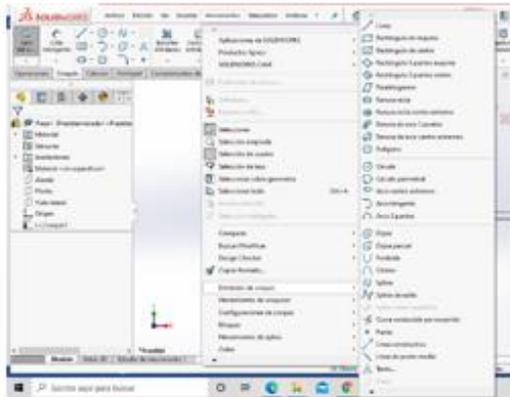
1. Uso de software SolidWorks

Todos los modelos CAD fueron propuestos y diseñados en el software de diseño mecánico de dassault systemes de SolidWorks 2018 versión estudiante. Los modelos desarrollados incluyen estructuras auxéticas, honeycomb, kagome, voronoid así como estructuras de tipo cilindro.

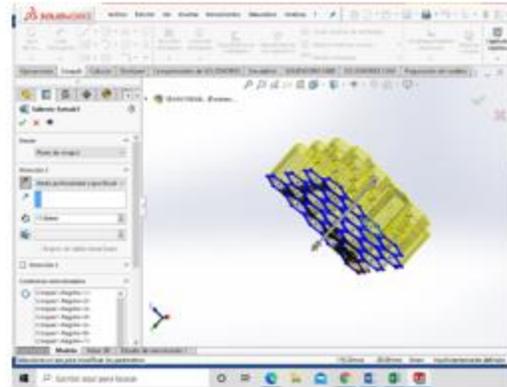


[Figura 14. Ejemplos de modelos CAD en software SolidWorks.](#)

Las herramientas con las que se trabajaron para el diseño de los modelos CAD corresponden a las “entidades de croquis” las cuales se hallan en la barra o parte superior del software (ver figura 15), principalmente se trabajó con las operaciones de línea, rectángulo, polígono y circunferencia. Así también, se utilizó la herramienta de “cota inteligente” para definir las dimensiones de los modelos CAD.



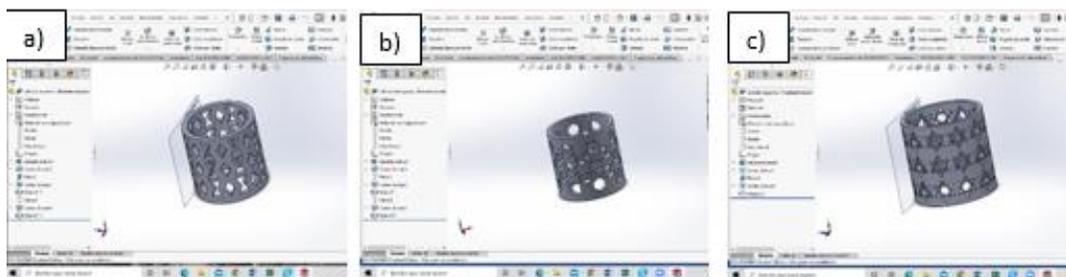
[Figura 15. Barra de herramientas y entidades de croquis usadas en el diseño de modelos CAD de SolidWorks](#)



[Figura 16. Herramientas de operación extrusión saliente/base para estructura honeycomb](#)

En el caso particular de las estructuras de honeycomb, kagome y auxéticas, las dimensiones promedio fueron de 57 mm de largo por 55 mm de ancho y para definir su espesor o altura se utilizó la operación “extruir saliente/base” (figura 16) la cual permitió definir las alturas correspondientes a 5 mm, 7.5 mm y 10 mm.

Por su parte, las estructuras cilíndricas se diseñaron con dimensiones de 35 mm de diámetro externo y 30 mm de diámetro interno y una altura de 35 mm. Este tipo de muestras fueron incrustadas con formas auxéticas, de kagome y de honeycomb tal y como se muestra en la siguiente imagen.



[Figura 17. Estructuras cilíndricas en SolidWorks: a\) muestra con incrustaciones auxéticas, b\) muestra con incrustaciones de honeycomb, c\) muestra con incrustaciones de kagome](#)

El proceso de incrustaciones en las muestras cilíndricas se logró mediante la herramienta de “geometría de referencias” y con ello se seleccionó la opción “plano” para poder establecer una base de referencia tangente a la estructura cilíndrica.

En el nuevo plano seleccionado, se dibujó el patrón deseado (auxético, honeycomb, kagome) y con la operación de “matriz circular” se determinó el número de repeticiones a lo largo de la forma cilíndrica. (Figura 18)

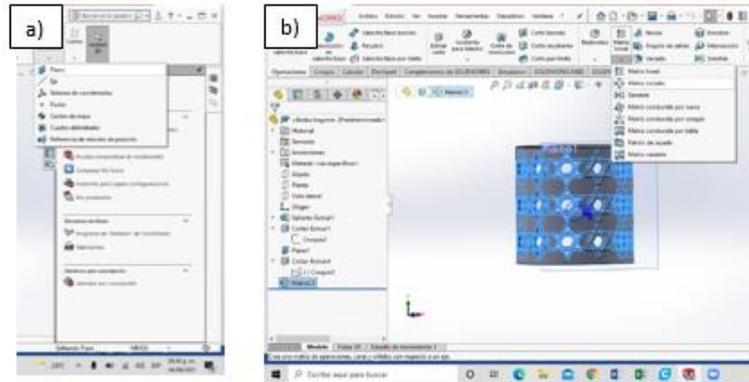


Figura 18. Operaciones fundamentales para incrustaciones en estructuras cilíndricas. a) Operación geometría de referencia opción “plano” b) operación matriz circular

Finalmente y una vez que se tiene el modelo CAD listo, se procede a guardar el archivo (figura 19). Para ello el formato que se seleccionó corresponde al de tipo STL. Este tipo de formato resulta indispensable a la hora de usarse en el software ultimaker cura.



Figura 19. Formato de archivo STL

2. Uso de software ultimaker cura

Como base para el proceso de impresión se utilizó el software ultimaker cura el cual es un software gratuito y de fácil uso. Este programa permitió modificar parámetros de impresión como la densidad de relleno, velocidad de impresión, patrones de relleno, tipo de adhesión de la placa de construcción, entre otros. La figura 20 muestra el interfaz del software junto con los parámetros de ajustes para la modificación de la muestra a imprimir.

Es importante hacer mención que para poder realizar los ajustes de impresión, el formato del modelo CAD se encuentre guardado en forma STL.

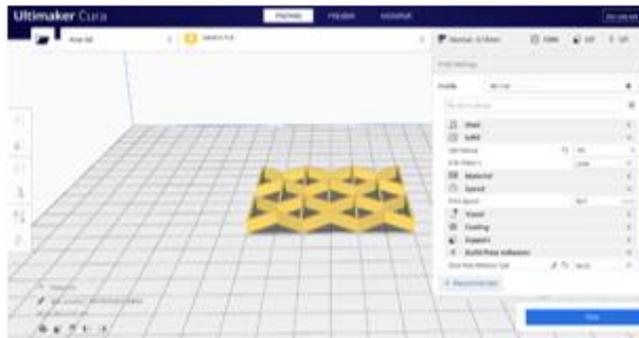


Figura 20. Interfaz y parámetros de ajustes del software ultimaker cura

Respecto a los ajustes o parámetros de impresión, estos fueron seleccionados de la siguiente manera (figura 21):

La densidad de relleno se seleccionó a un porcentaje del 100% asegurando con ello una forma totalmente sólida, se usó un patrón de relleno lineal así como una velocidad de impresión de 50 mm/s y un tipo de adhesión de la placa de construcción tipo “Raft”. El resto de los parámetros no se modificaron.

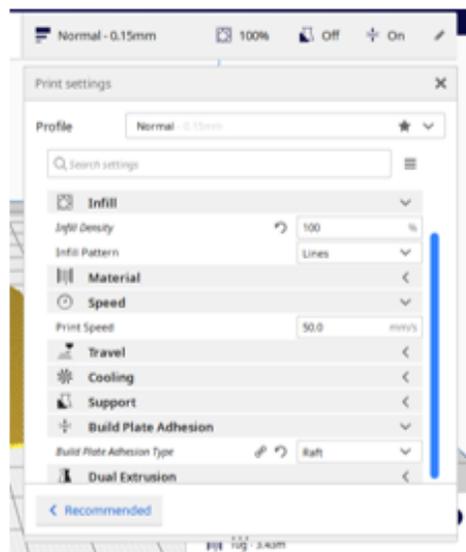
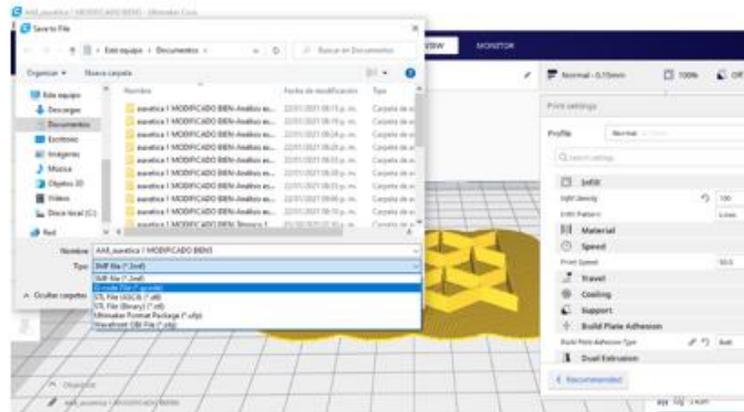


Figura 21. Parámetros seleccionados en software ultimaker cura para las muestras a imprimir

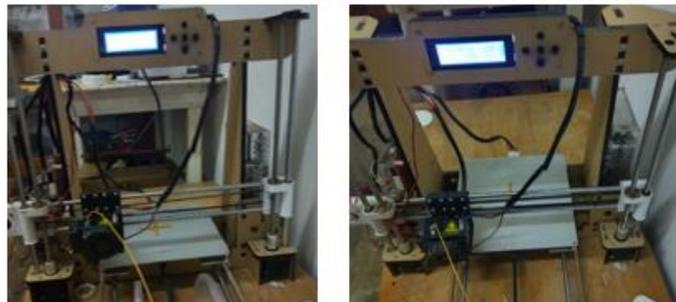
Como último paso y contemplando los ajustes o parámetros de impresión, se exportó el archivo seleccionando la opción de código G (figura 22). Con esto se aseguró, la obtención de los pasos o códigos para que el equipo de impresión pueda desarrollar los modelos propuestos a la ejecución de los mismos.



[Figura 22. Exportación de archivo para obtención de código G](#)

3. Uso de impresora 3D

Se utilizó una impresora 3D marca Anet A8 con tecnología FDM. Este tipo de impresora posee la característica de ser de bajo costo por lo que el diseño de las muestras puede no ser de la mejor calidad. El tamaño de filamento con el que trabajó este tipo de impresora corresponde a 1.75 mm y los parámetros con los que se ajustaron para su impresión fueron 200°C para el extrusor y 60°C para la cama o base.

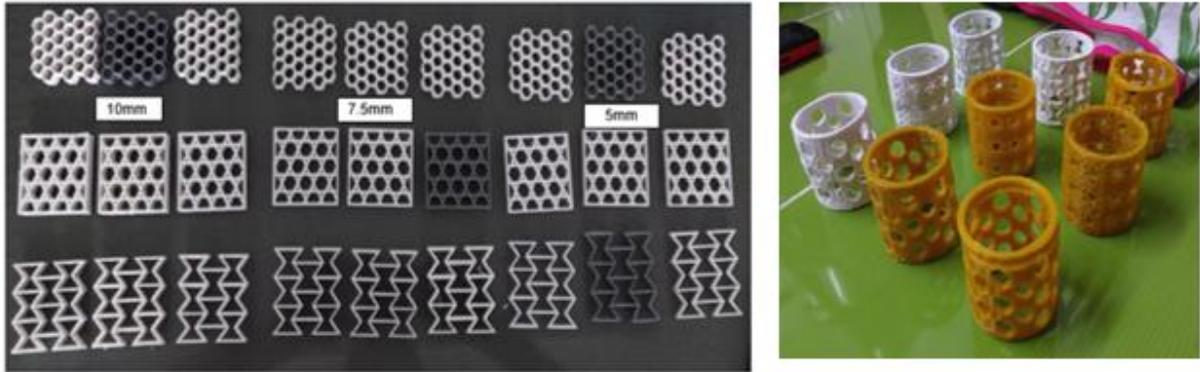


[Figura 23. Equipo de impresión 3D, impresora Anet A8 filamento de 1.75mm, voltaje 110/220V](#)

Como resultado del trabajo de impresión se llevó el desarrollo de un total de 36 muestras. Teniendo como base:

- 3 estructuras auxéticas de 5 mm, 7.5 mm y 10 mm.
- 3 estructuras de honeycomb de 5 mm, 7.5 mm y 10 mm
- 3 estructuras de kagome de 5 mm, 7.5 mm y 10 mm
- 3 estructuras cilíndricas con incrustaciones de honeycomb, kagome y auxética.

Fue necesario imprimir 3 muestras por cada estructura propuesta, de manera que esta repetición permitió analizar el comportamiento de recuperación en el efecto de repetitividad en la velocidad y porcentaje de recuperación



[Figura 24. Total de muestras impresas para pruebas de recuperación](#)

Además de ello, se imprimieron estructuras ramificadas con la cual se verificó el efecto de la ley constructal en la recuperación de forma:



[Figura 25. Estructuras ramificadas que obedecen al comportamiento de la ley constructal](#)

4. Recuperación de forma

Uno de los primeros pasos que se trabajaron en la recuperación de forma consistió en visualizar y analizar al estímulo externo, de esta manera se trabajó con el estímulo térmico en dos corrientes la primera consistía en aire caliente en la cual se usó como medio una pistola de aire y/o secadora y la segunda en agua caliente (proceso de calentar el agua en una estufa). Para este paso se trabajaron con estructuras cilíndricas donde una vez ya deformadas (forma temporal), se sometieron a efectos de recuperación bajo los dos tipos de estímulo. (Figura 26).

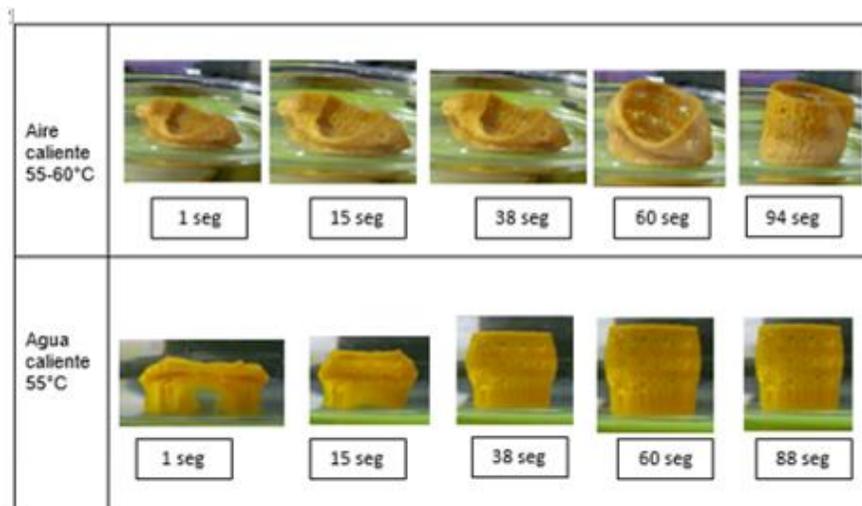


Figura 26. Recuperación de forma de cilindro de kagome bajo estímulo de aire caliente y agua caliente.

Este tipo de análisis estuvo basado fundamentalmente en una temperatura aproximada de 55°C tanto para el medio de aire caliente como para el de agua caliente. A través de esta prueba fue posible determinar al estímulo hidrotérmico (agua caliente) como el mejor medio de recuperación en función del tiempo y las características de forma.

En virtud de ello, las pruebas desarrolladas para el resto de las muestras estuvieron basados en estímulos hidrotérmicos.

Geometrías auxéticas, de kagome y honeycomb con estímulo hidrotérmico

El efecto de recuperación de forma para las muestras desarrolladas con el equipo de impresión 3D, se sometió a efectos de deformación (ya sea a estiramiento o compresión), con esto se estableció la forma temporal y con ello se procedió al análisis de recuperación por medio del estímulo hidrotérmico a 45, 55 ,65°C.

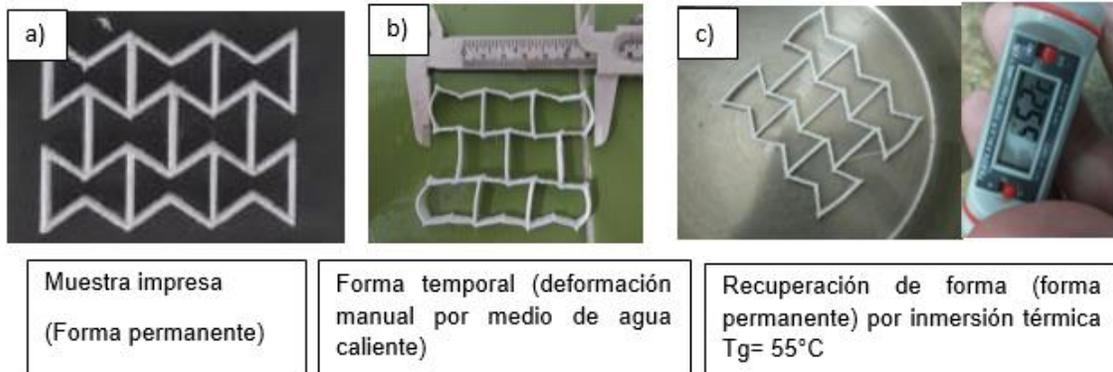


Figura 27. Proceso de recuperación de forma para estructura auxética por estímulo hidrotérmico a 55°C. a) Forma original o permanente. b) Forma temporal c) Recuperación de forma.

Para el análisis de efecto de recuperación de forma de las muestras, se utilizó paralelamente un equipo de video (Teléfono celular Nokia C3) que permitió grabar y con ello estimar los tiempos de recuperación, fue necesario también el uso de un vernier que determinó las dimensiones de las muestras deformadas así como las dimensiones de la recuperación de forma.

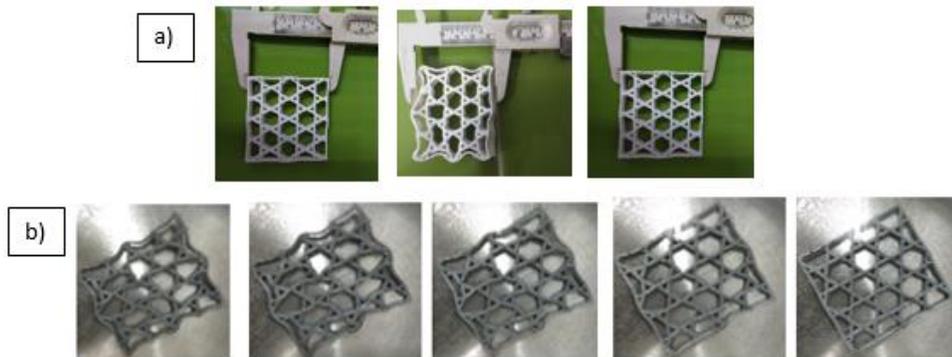


Figura 28. Recuperación de forma a) Medición con vernier de las dimensiones de la muestra en su forma original, forma temporal y forma recuperada. De izquierda a derecha. b) Proceso de secuencia de recuperación analizado con equipo de video

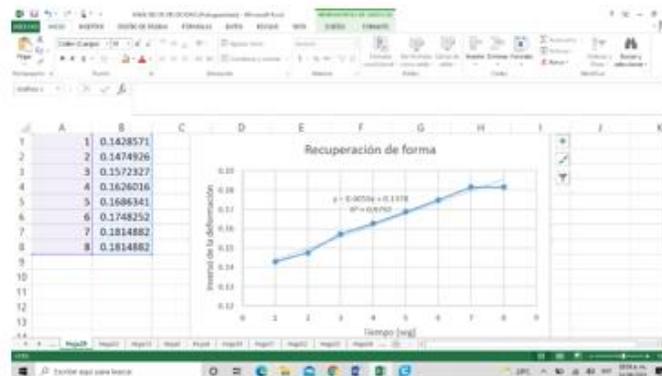
Este proceso se repitió en todas las muestras impresas tanto para las formas auxéticas, de kagome y honeycomb, así como para las estructuras cilíndricas.

5. Análisis grafico (velocidad de recuperación) y comparativa de espesores

El análisis de recuperación de forma se centró en obtener la ecuación de recuperación mediante el efecto de temperatura (inmersión térmica), es decir, la velocidad promedio de recuperación de las muestras impresas. Para ello fue necesario el registro de los tiempos en la cual las muestras efectuaron su recuperación, es decir, desde su forma temporal hacia su forma original.

Los valores fueron registrados segundo por segundo, de manera que fue posible tabular y graficar los datos. Por medio de una hoja de Excel se halló el grafico “deformación vs tiempo” y con ello se obtuvo una regresión lineal (conocida también como línea de tendencia) para hallar la ecuación promedio de recuperación donde el valor de la pendiente atendería al proceso de recuperación de la muestra. (Ver figura 29).

Los valores obtenidos para la velocidad de recuperación se trabajaron en términos de cm/s. También se halló el coeficiente de determinación R^2 el cual fue útil para determinar la selección del grafico “deformación vs tiempo” como el grafico más útil en lo que respecta a su velocidad de recuperación pues la tendencia señaló ser el error más bajo. (Muy cercano a 1).



[Figura 29. Grafico Deformación vs tiempo y datos de regresión lineal para temperatura a 55°C](#)

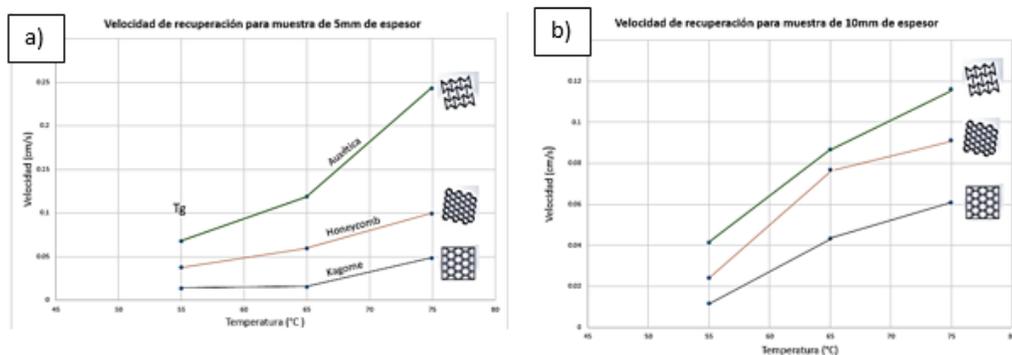
Una vez que se hallaron los datos deseados, se procedió a llevar la comparativa entre los espesores del mismo tipo de estructura y/o geometría respecto a su velocidad de recuperación. A su vez estos resultados fueron comparados con los otros tipos de geometría desarrollados. Este proceso se llevó en todas las muestras a las temperatura de 45, 55,65 °C

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)			
R1	Espesor	Muestra	Velocidad de recuperación
0.9471	5mm		0.0478 cm/s
0.9555			
0.9614			
0.9777	7.5mm		0.0427 cm/s
0.977			
0.9767			
0.9693	10mm		0.0414 cm/s
0.9678			

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)			
R2	Espesor	Muestra	Velocidad de recuperación
0.961	5mm		0.0379 cm/s
0.957			
0.9523			
0.9578	7.5mm		0.0358 cm/s
0.9577			
0.9566			
0.9660	10mm		0.0244 cm/s
0.9682			
0.9658			

[Figura 30. Comparativa de velocidad promedio de recuperación de muestras auxéticas y honeycomb a 55°C, se observa que medida del aumento del espesor \(de arriba hacia abajo\) las velocidades disminuyen.](#)

Por último, y una vez halladas la velocidades de recuperación a las temperaturas de 45, 55, 65, 75 y 85 °C para las muestras auxéticas, de kagome y honeycomb, se llevó a cabo el desarrollo en una hoja de Excel el grafico “velocidad vs temperatura”, con ello se hizo una comparativa de las distintas geometrías con respecto al mismo tipo espesor tal y como se muestra en la siguiente imagen:



[Figura 31. Comparativo del grafico Velocidad vs Temperatura. a\) Para estructuras de 5mm de espesor b\) para estructuras de 10mm de espesor.](#)

6. Porcentaje recuperación

Para finalizar el análisis, se desarrolló la inspección y cálculo del porcentaje de recuperación de forma de las muestras. El proceso consistió en utilizar la siguiente fórmula y se llevó a cabo mediante los siguientes pasos:

1. Toma de las dimensiones con el instrumento de medición (vernier) de la pieza, cuando es deformada (forma temporal) y cuando recupera su forma.
2. El valor obtenido del paso 1 para la forma temporal corresponde al valor Emax de la ecuación 1.
3. Comparación de la muestra recuperada con la estructura original.

4. Registro de la diferencia en dimensiones de la parte no recuperada entre la forma original y la estructura recuperada.
5. El valor obtenido en el paso 4 corresponde al valor E_r de la ecuación mostrada en la ecuación 1.
6. Introducir los valores obtenidos en la ecuación.

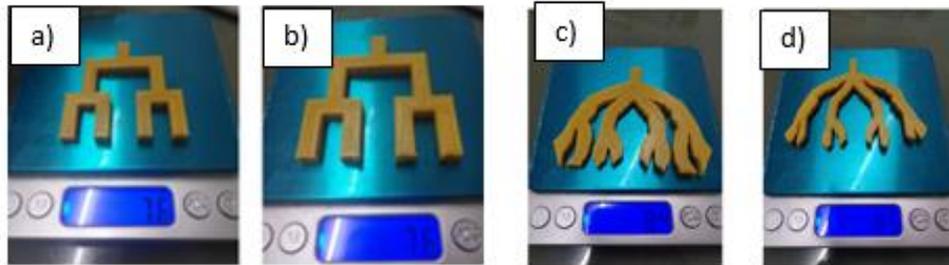
Ecuación 1. Fórmula aplicada para el efecto de recuperación de forma para muestras impresas en polímeros con memoria de forma.

$$| \text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} \quad \begin{array}{l} E_{max} = \text{Deformación máxima} \\ E_r = \text{Parte no recuperada} \end{array}$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}}$$

7. Impresión de estructuras ramificadas y análisis de recuperación por estímulo hidrotérmico

Aplicando la técnica de manufactura aditiva también conocida como impresión 3D, se desarrollaron estructuras ramificadas con la idea de analizar el comportamiento de la ley constructal. Para dicho procedimiento se imprimieron dos tipos de estructuras (figura 25), una con masa de 7.6 gramos y la otra con 8.5 gramos. A su vez para este tipo de muestras se imprimieron dos formas distintas, una forma totalmente sólida y otra con cavidades o formas huecas.



[Figura 32. Estructuras ramificadas a\) estructura sólida de 7.6 gramos b\) estructura hueca de 7.6 gramos. c\) estructura hueca de 8.5 gramos d\) estructura sólida de 8.5 gramos](#)

Para definir la masa del material, se utilizó el software ultimaker cura y junto con la opción de “definición de posición de impresión” se ajustó la escala del material de tal manera que se alcanzó la masa deseada. Es importante saber que el interfaz del software a la hora de correr los códigos determina la cantidad de material tanto en gramos como en metros de filamento así como el tiempo de impresión.

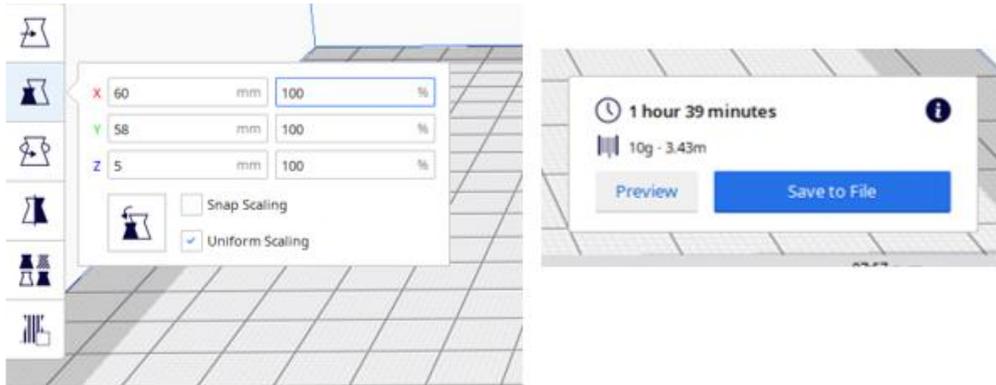


Figura 33. Interfaz de software ultimaker cura. a) Selección de escala, b) parámetro de tiempo de impresión y masa en gramos

Las muestras fueron deformadas por calor (inmersión térmica) y posterior a ello se analizó el efecto de recuperación a la temperatura de transición vítrea del PLA/PHA $T_g = 55^\circ\text{C}$.



Figura 34. Deformación de muestras impresas

CAPITULO V. RESULTADOS

PRUEBA CON AIRE CALIENTE

Una de las muestras impresas en forma de cilindro fue sometida a deformación para luego analizar el efecto de recuperación de forma. El estímulo al que fue sometido corresponde a aire caliente, esto se logró mediante la aplicación de calor con pistola o secadora en un recipiente aislado. La temperatura registrada oscila alrededor de los 55-60°C.

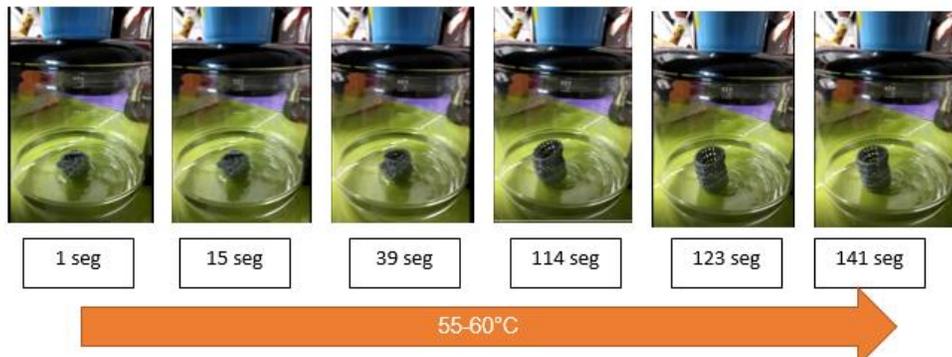


Figura 35. Efecto de recuperación de forma para estructura cilíndrica por estímulo de aire caliente

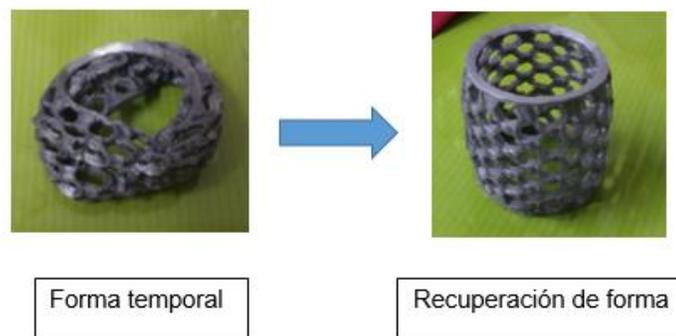


Figura 36. Recuperación de forma de estructura cilíndrica desde su forma temporal hacia su forma original

NOTA: el efecto de recuperación de forma con estímulo de aire caliente permitió un proceso de recuperación relativamente lento.

COMPARATIVA DE RECUPERACIÓN DE FORMA CON AIRE CALIENTE VS AGUA CALIENTE.

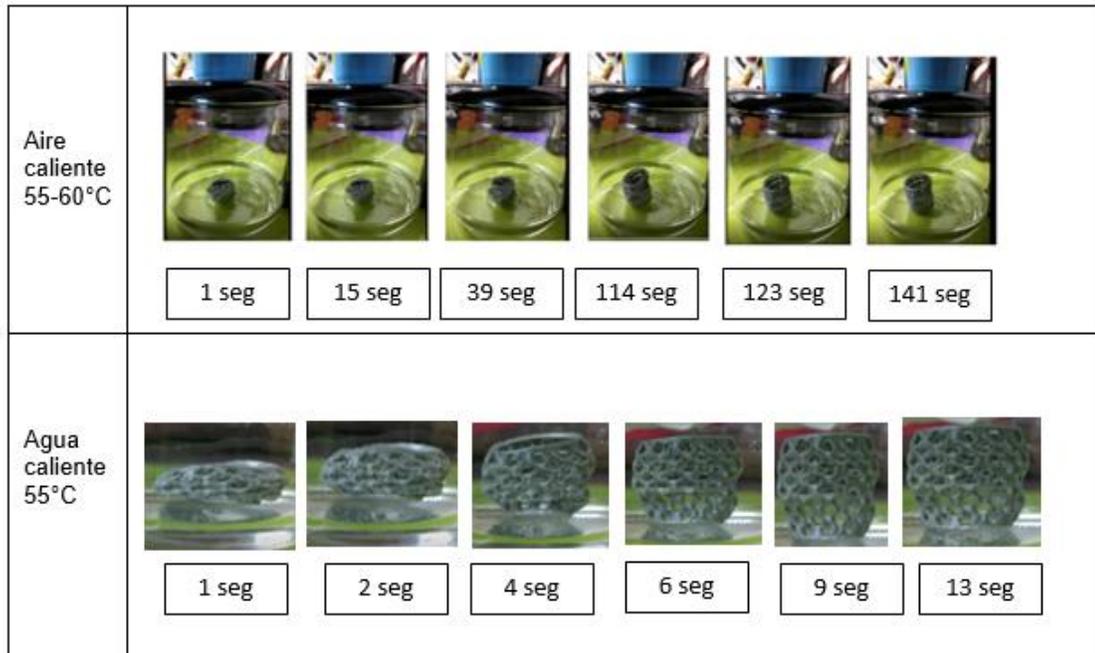


Figura 37. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Honeycomb, aire caliente vs agua caliente.

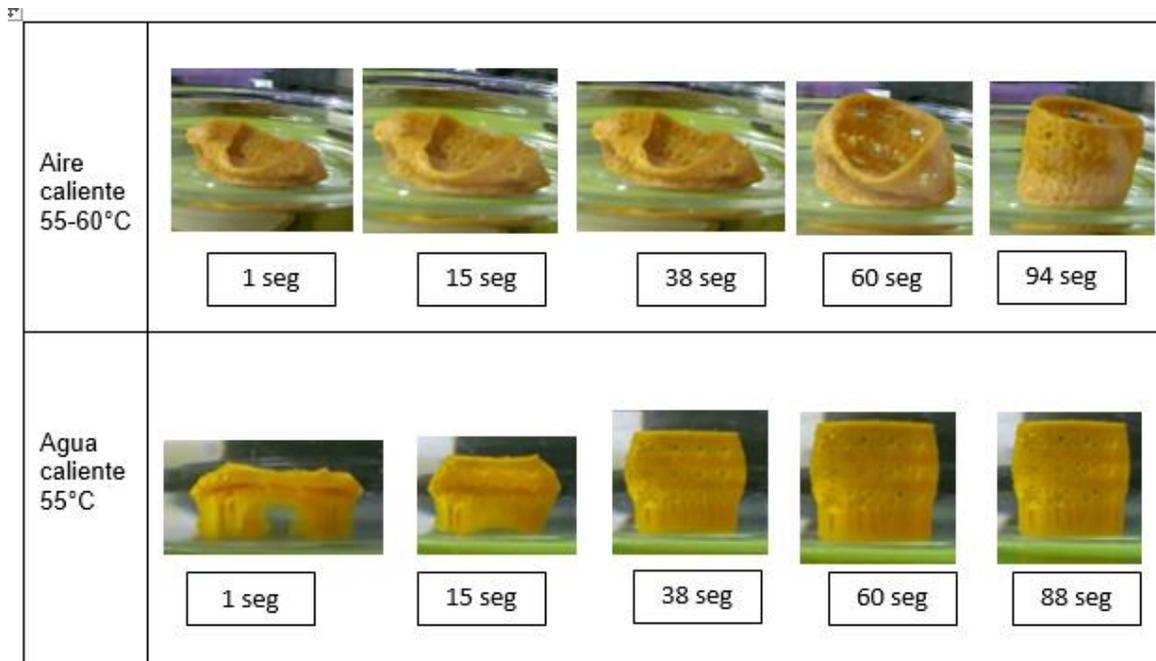


Figura 38. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Kagome, aire caliente vs agua caliente.

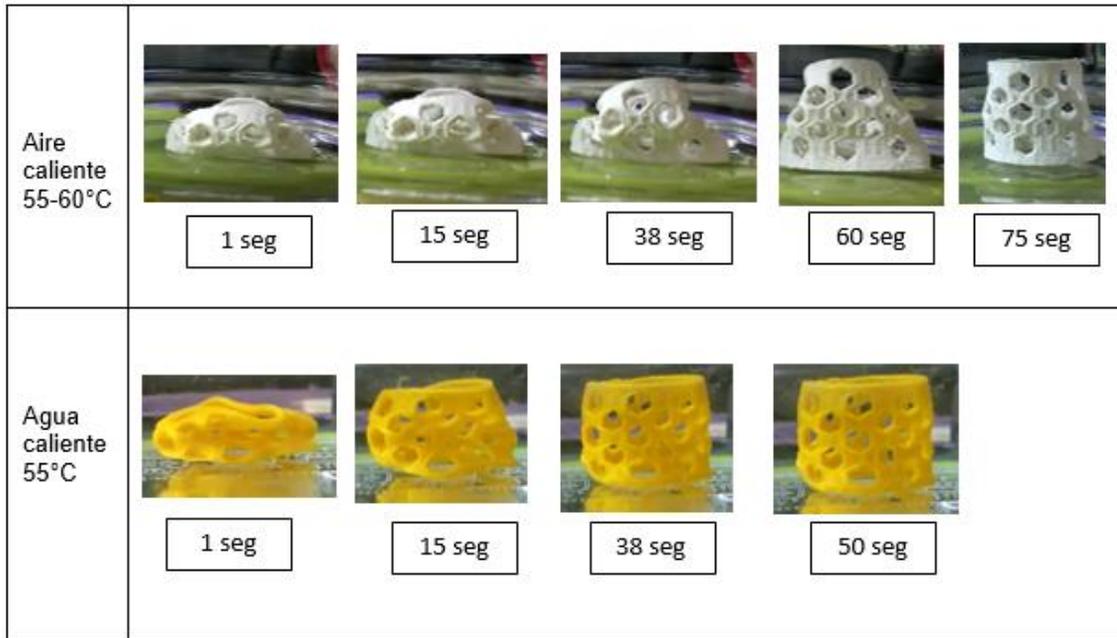


Figura 39. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones de Honeycomb, aire caliente vs agua caliente.

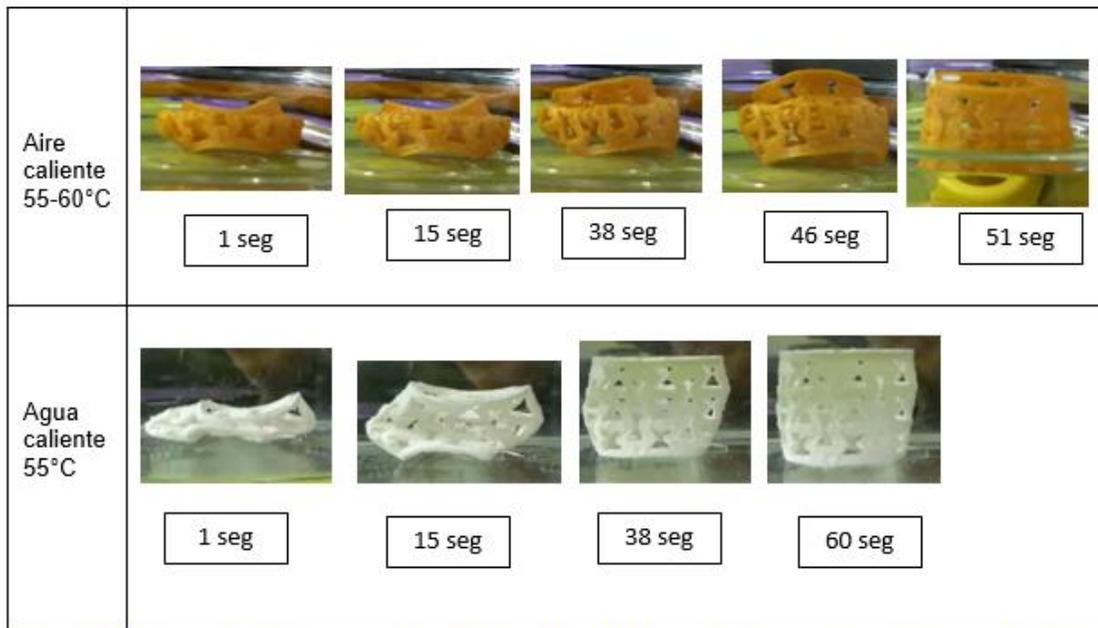


Figura 40. Comparativa de recuperación de forma de estructura cilíndrica con incrustaciones Auxéticas, aire caliente vs agua caliente.

NOTA: El PLA/PHA presentó mejor recuperación bajo el estímulo de agua caliente por lo que presenta características hidrotermales.

MUESTRAS IMPRESAS

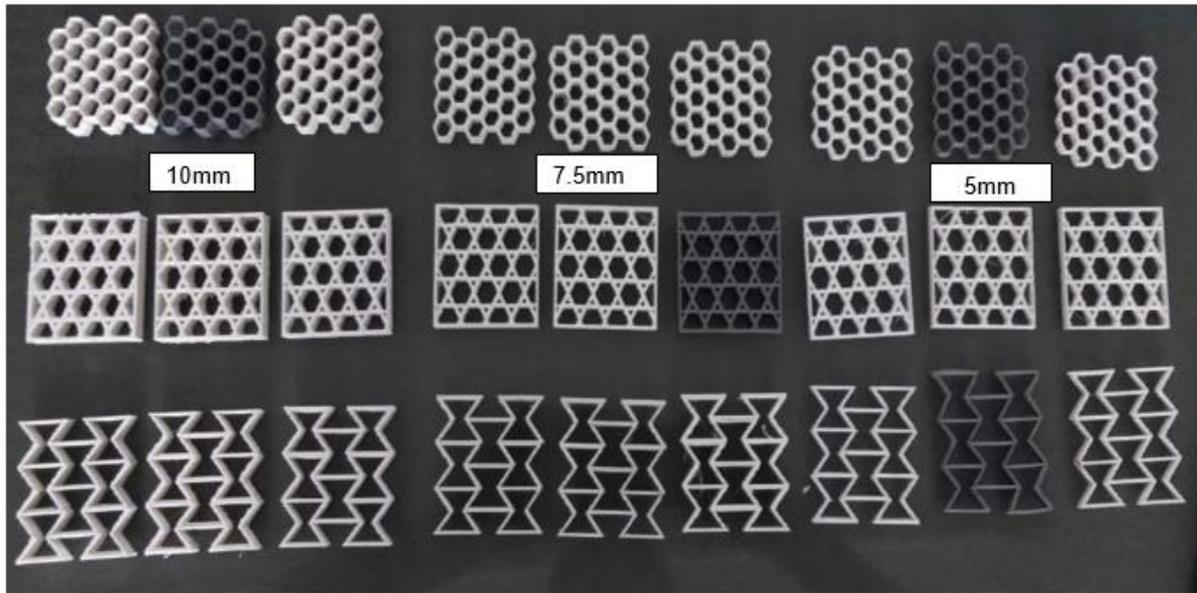


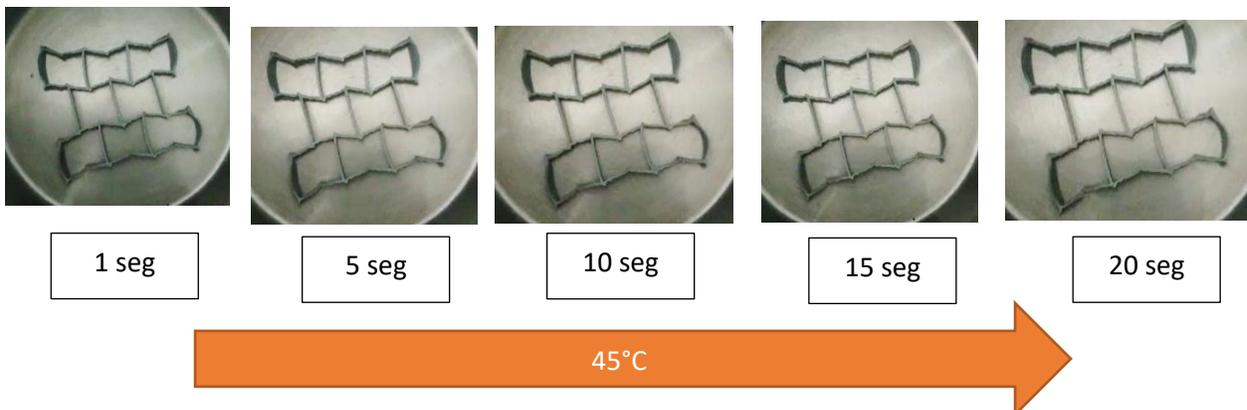
Figura 41. Total de muestras impresas, se imprimieron 3 muestras de cada espesor correspondientes a 5 mm, 7.5 mm y 10 mm con el hecho de verificar el efecto de repetitividad.

PRUEBAS DESARROLLADAS

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Inmersión térmica 45°C	Inmersión térmica Tg=55°C	Inmersión térmica 65°C
Velocidad de recuperación	Velocidad de recuperación	Velocidad de recuperación

PRUEBA 1

En la prueba 1 (temperatura a 45°C) no fue posible visualizar el efecto de recuperación de forma.



Nota: el material no presentó el efecto de recuperación de forma a 45°C.

REGRESIÓN LINEAL

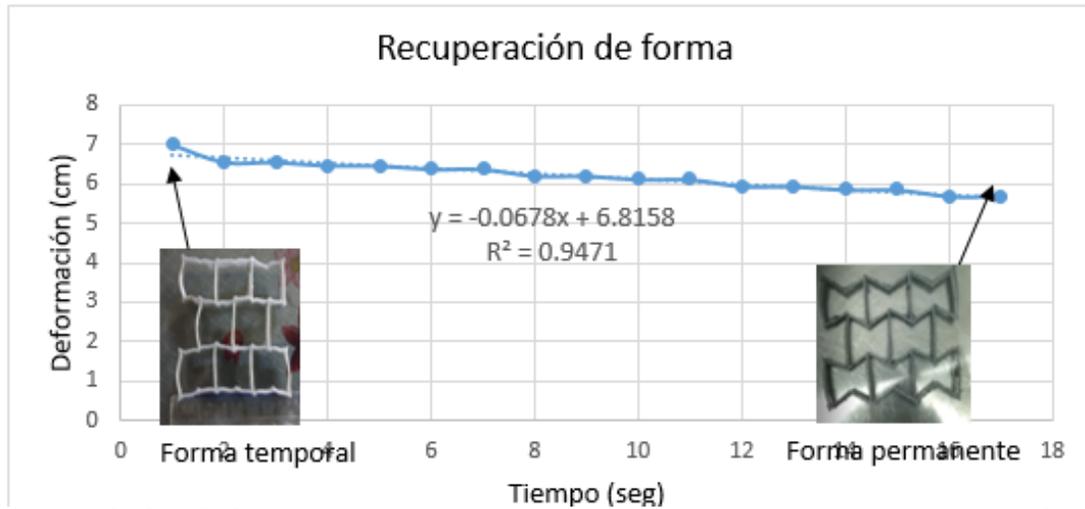


Figura 42. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R^2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0678 cm/s

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0678$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R^2	0.9471	0.9555	0.9615

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9471$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple aunque en este caso el coeficiente de determinación es menor comparado con los valores obtenidos para el logaritmo natural de la deformación e inversión de la deformación.

$$0.9471 < 0.9555 < 0.9616$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN

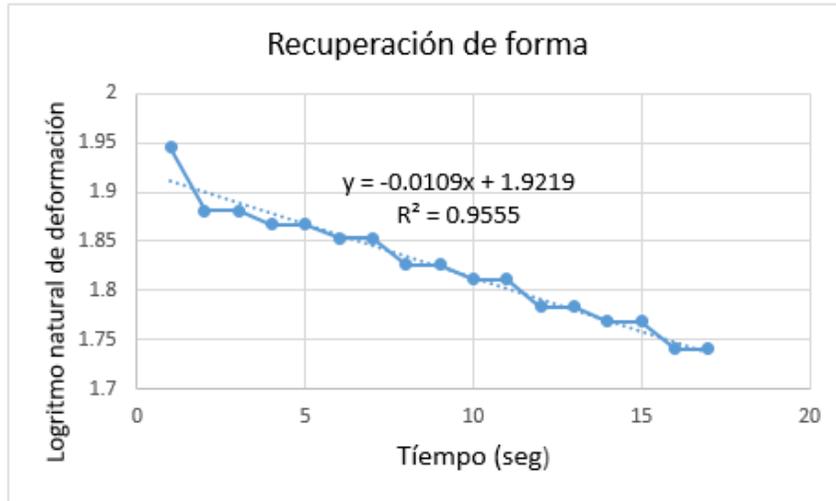


Figura 43. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor

Para el gráfico “Logaritmo natural de la deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0109$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9555$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 6. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 5mm de espesor

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9471	0.9555	0.9615

$$0.9471 < 0.9555 < 0.9616$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN

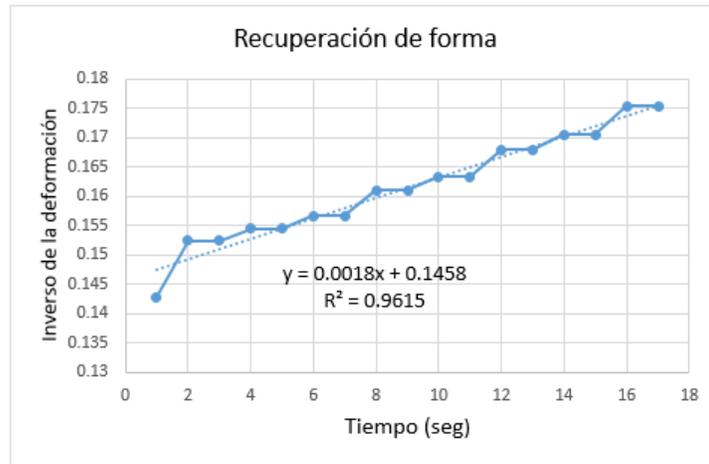


Figura 44. Gráfico “Inverso de la deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 5mm de espesor

Para el gráfico “Inverso de la deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0018$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

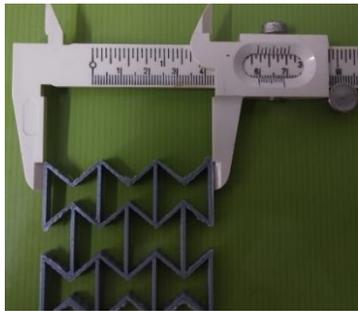
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9615$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad. En este caso particular el valor R^2 se caracterizó por ser el valor más alto en comparación con la regresión lineal simple y con el logaritmo natural de la deformación para la estructura auxética de 5mm de espesor.

Tabla 7. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 5mm de espesor

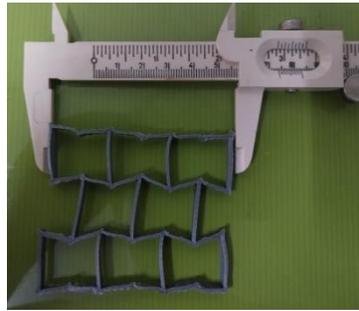
Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9471	0.9555	0.9615

$$0.9471 < 0.9555 < 0.9615$$

Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



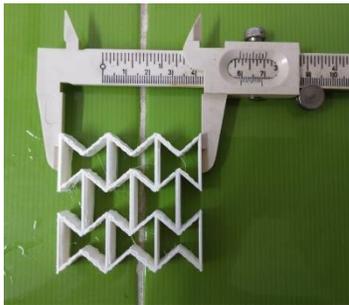
Forma original 60 mm



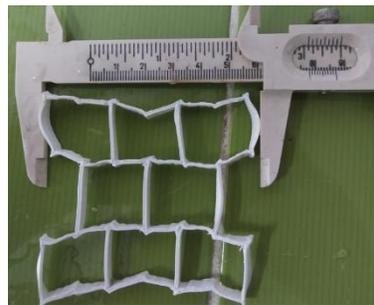
Forma temporal 74 mm



Recuperación de forma 63 mm



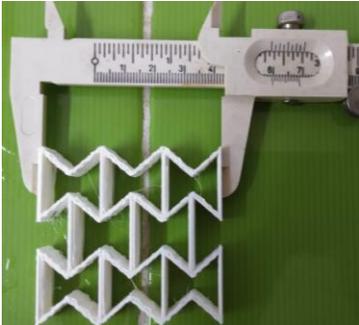
Forma original 60 mm



Forma temporal 78 mm



Recuperación de forma 64 mm



Forma original 60 mm



Forma temporal 80 mm



Recuperación de forma 64 mm

Una serie de muestras fueron sometidas a deformación con la idea de verificar el proceso de recuperación de forma. Para este caso particular las muestras auxéticas fueron sometidas a estiramiento. El proceso involucraba el registro de las dimensiones de las muestras en su forma original, en su forma temporal (deformación) y en el proceso de recuperación. La idea de esta prueba es verificar por medio de cálculos, que tan efectiva es la recuperación de forma de las muestras.

Ecuación 2. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras auxéticas de 5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{74mm - (-3mm)}{74mm} = 1.04 * 100 = 104\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{78mm - (-4mm)}{78mm} = 1.05 * 100 = 105\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{80mm - (-4mm)}{80mm} = 1.05 * 100 = 105\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación de forma para las muestras auxéticas de 5 mm de espesor es mayor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por estiramiento lo cual conlleva a que una vez que recuperen su forma, estas obtengan dimensiones mayores a la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no es totalmente igual a la forma original por ello se lleva el cálculo de porcentajes.

REGRESIÓN LINEAL

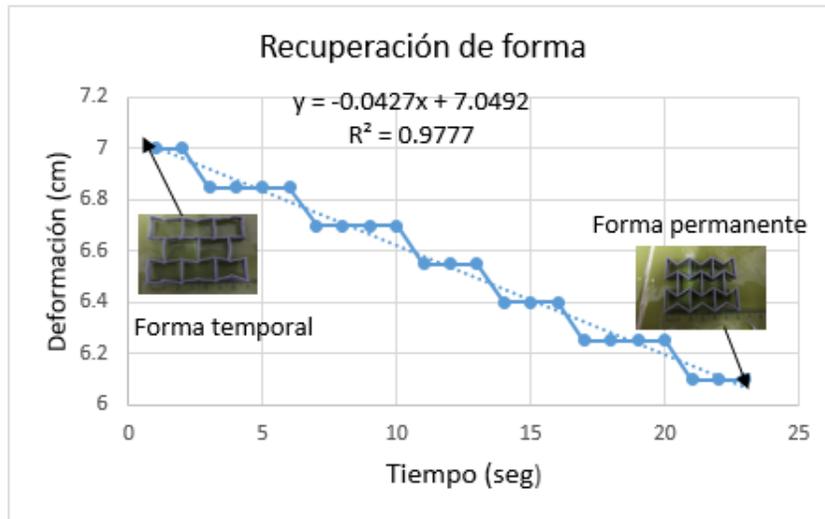


Figura 45. Gráfico "Deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0427 cm/s

Para el gráfico "Deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0427$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9777$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 8. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9777	0.977	0.9757

$$0.9757 < 0.977 < 0.9777$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN

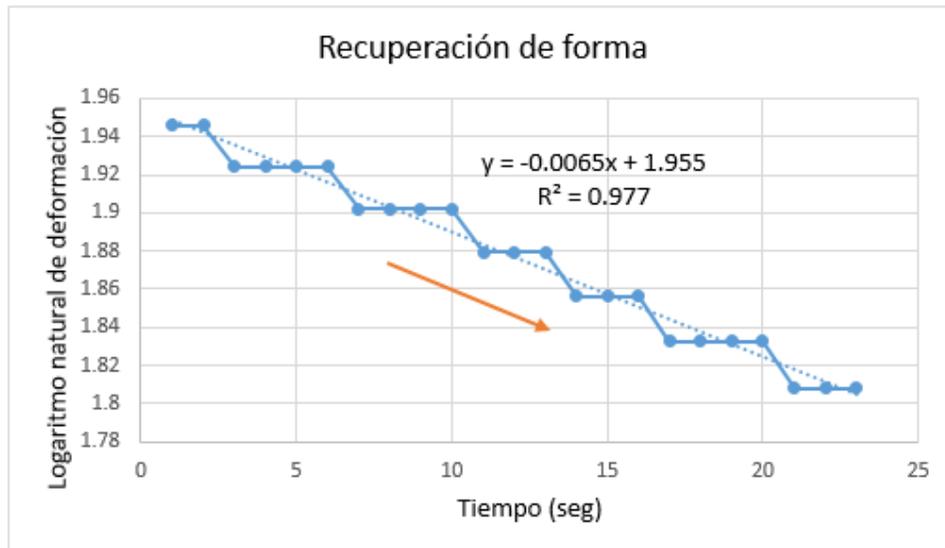


Figura 46. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor

Para el gráfico “Logaritmo natural de deformación vs Tiempo” , el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor la pendiente $m = 0.0065$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.977$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 9. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9777	0.977	0.9757

$$0.9757 < 0.977 < 0.9777$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN

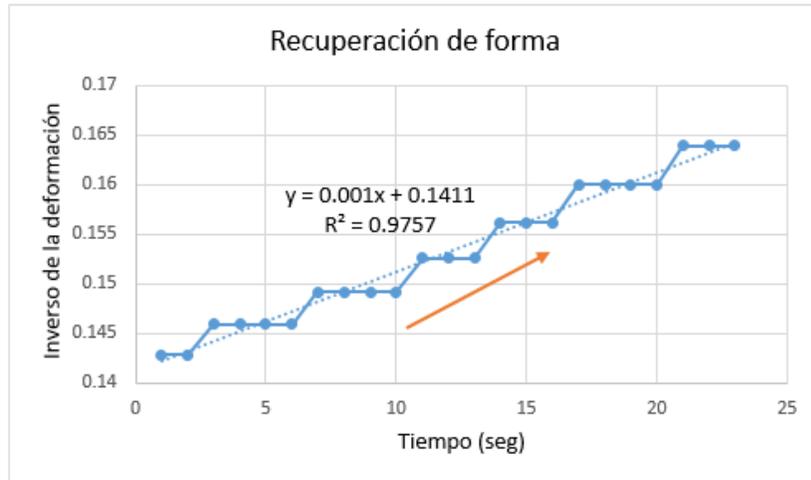


Figura 47. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 7.5mm de espesor

Para el gráfico “Inverso de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.001$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

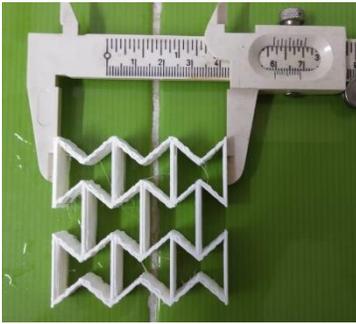
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9757$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 10. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 7.5mm de espesor

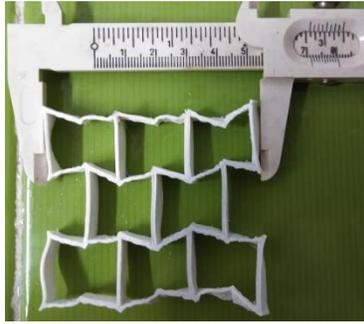
Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9777	0.977	0.9757

$$0.9757 < 0.977 < 0.9777$$

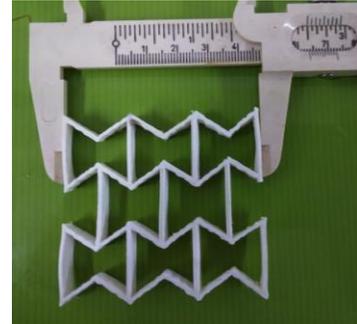
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



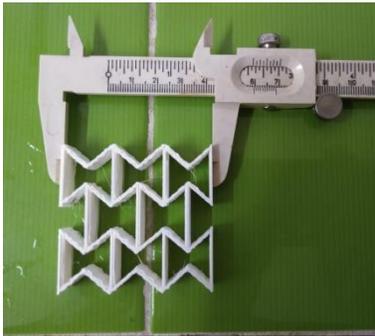
Forma original 60 mm



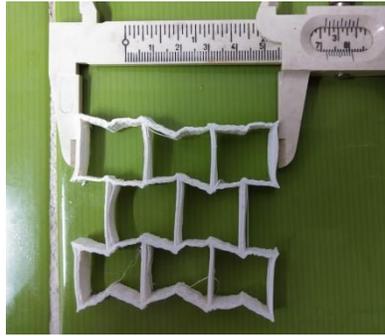
Forma temporal 72 mm



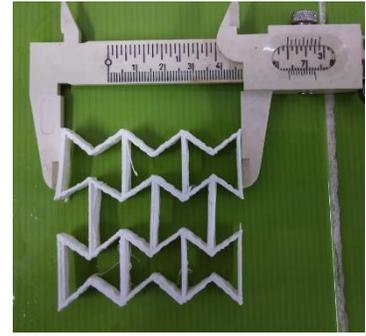
Recuperación de forma 64 mm



Forma original 60 mm



Forma temporal 72 mm



Recuperación de forma 63.7 mm

El comportamiento para las muestras auxéticas 7.5 mm de espesor fue muy similar a la de las muestras de 5mm de espesor (en cuanto al porcentaje de recuperación). En este sentido Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser mayor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%. Los cálculos realizados ayudan a determinar esta problemática.

Ecuación 3. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras auxéticas de 7.5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{72\text{mm} - (-4\text{mm})}{72\text{mm}} = 1.05 * 100 = 105\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{72\text{mm} - (-3.7\text{mm})}{72\text{mm}} = 1.05 * 100 = 105\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación de forma para las muestras auxéticas de 7.5 mm de espesor es mayor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por estiramiento lo cual conlleva a que una vez que recuperen su forma, estas obtengan dimensiones mayores a la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no es totalmente igual a la forma original.

REGRESIÓN LINEAL

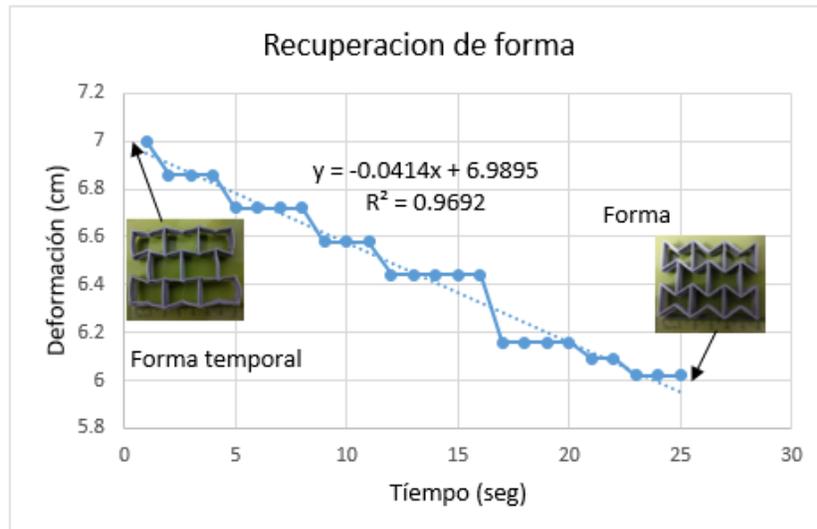


Figura 48. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0414 cm/s

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético de 10 mm de espesor desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0414$ atendería a la velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9692$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 11. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor

Coficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9692	0.9689	0.9678

$$0.9678 < 0.9689 < 0.9692$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN

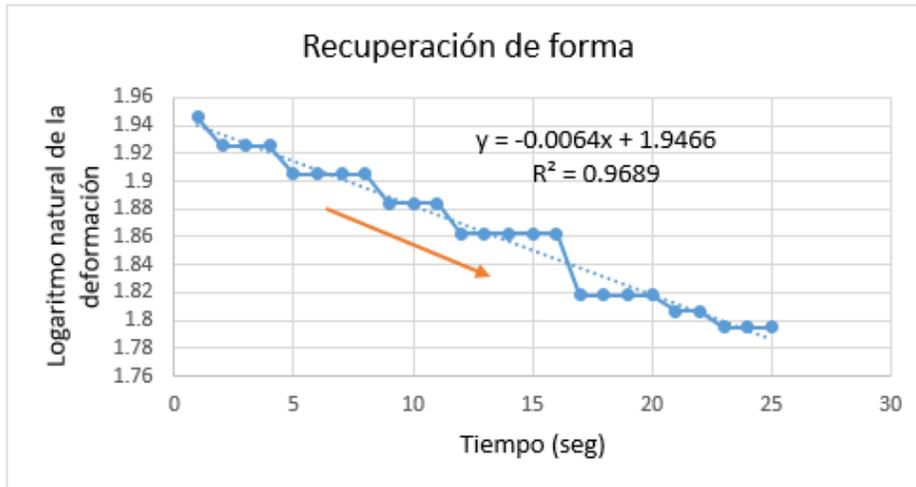


Figura 49. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor

Para el gráfico “Logaritmo natural vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material auxético de 10 mm de espesor desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente atendería a la velocidad de recuperación.

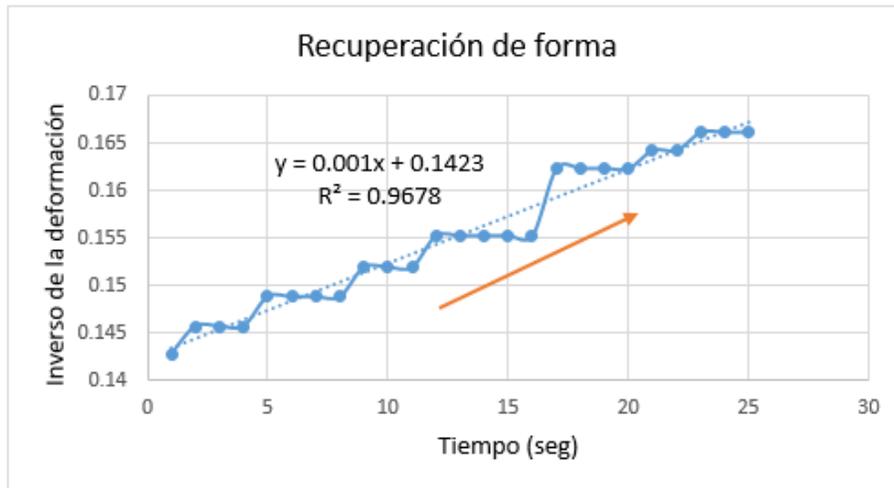
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9689$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 12. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor

Coficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9692	0.9689	0.9678

$$0.9678 < 0.9689 < 0.9692$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 50. Gráfico "Inverso de deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Auxética de 10mm de espesor](#)

Para el gráfico "Inverso de la deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material auxético de 10 mm de espesor desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.001$ atendería a la velocidad de recuperación en términos de cm/s.

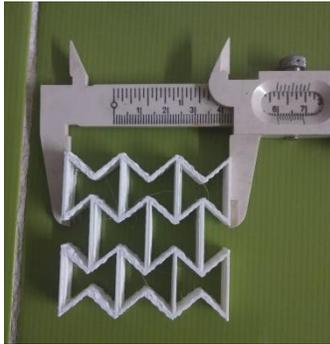
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9678$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 13. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura auxética de 10mm de espesor](#)

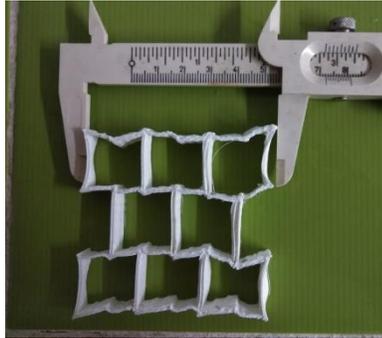
Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R^2	0.9692	0.9689	0.9678

$$0.9678 < 0.9689 < 0.9692$$

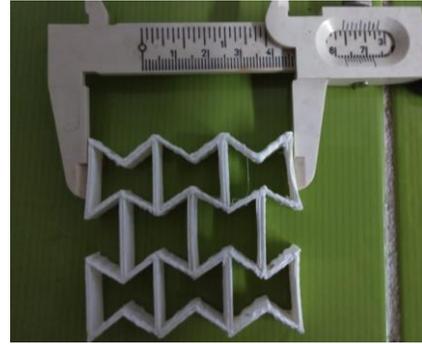
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



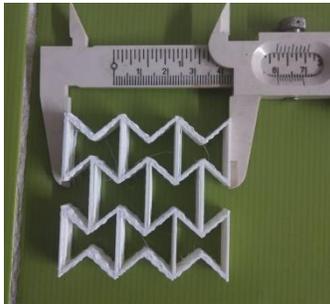
Forma original 60 mm



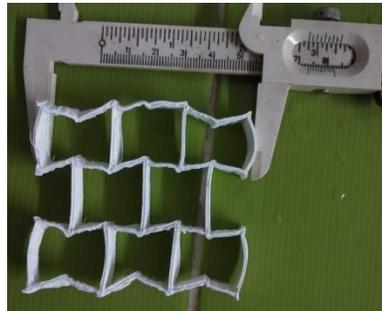
Forma temporal 72 mm



Recuperación de forma 63 mm



Forma original 60 mm



Forma temporal 73 mm



Recuperación de forma 63 mm

Una serie de muestras auxéticas de 10 mm de espesor fueron analizadas con el fin de verificar el proceso de recuperación y la forma en como la densificación afecta en la memoria de forma. Para ello las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser mayor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 4. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras auxéticas de 10mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{72mm - (-3mm)}{72mm} = 1.04 * 100 = 104\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{73mm - (-3mm)}{73mm} = 1.04 * 100 = 104\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación de forma para las muestras auxéticas de 10 mm de espesor es mayor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por estiramiento lo cual conlleva a que una vez que recuperen su forma, estas obtengan dimensiones mayores a la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la forma original.

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)				
R ²	Grafico	Espesor	Muestra	Velocidad de recuperación
0.9471	Regresión lineal simple	5mm		0.0678 cm/s
0.9555	Logaritmo natural de la deformación			
0.9615	Inverso de la deformación			
0.9777	Regresión lineal simple	7.5mm		0.0427 cm/s
0.977	Logaritmo natural de la deformación			
0.9757	Inverso de la deformación			
0.9692	Regresión lineal simple	10mm		0.0414 cm/s
0.9689	Logaritmo natural de la deformación			
0.9678	Inverso de la deformación			

Figura 51. Comparativo de espesores y velocidades de recuperación para estructuras auxéticas

La tabla resume la comparativa entre espesores para estructuras auxéticas (5mm, 7.5mm y 10mm), es posible observar que a medida que aumenta el espesor las velocidades disminuyen. La estructura auxética de 5mm de espesor posee mayor velocidad que la estructura de 7.5mm y 10mm. Los coeficientes de determinación R² señalan el grado menor de error (más cercano a 1) que existe para la tendencia a la linealidad. Las regresiones lineales simples se ajustan mejor a este contexto.

NOTA: se decidió tomar con base al coeficiente de determinación (R²) la regresión lineal simple como base para el análisis de la velocidad de recuperación de forma o cinética de recuperación.

Tabla 14. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras auxéticas

Geometría	Espesor	% de recuperación	Interpretación
		104	Con base a los cálculos realizados a las muestras auxéticas de 5mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo, lo que significa que es una recuperación muy similar a la de la forma original. Debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por estiramiento, es decir fueron deformadas a una dimensión mayor a la de la estructura original, el porcentaje de recuperación quedó por arriba del 100% correspondiente a la dimensión de la forma original (estructura impresa sin deformaciones).
	5mm	104	Con base a los cálculos realizados a las muestras auxéticas de 5mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo, lo que significa que es una recuperación muy similar a la de la forma original. Debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por estiramiento, es decir fueron deformadas a una dimensión mayor a la de la estructura original, el porcentaje de recuperación quedó por arriba del 100% correspondiente a la dimensión de la forma original (estructura impresa sin deformaciones).
		105	
	7.5mm	105	En comparación con las estructuras auxéticas de espesores de 5 y 10mm, las muestras de 7.5 mm de espesor presentaron un leve incremento en su recuperación. A pesar de ello, el comportamiento fue muy similar al resto de las muestras. Es posible entender que el proceso de memoria de forma en los materiales poliméricos, no se cumple en un porcentaje al 100%. Sin embargo la geometría y densidad y temperatura influyen en el proceso de recuperación.
		105	
10mm	104	Con base a los cálculos realizados a las muestras auxéticas de 10mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo muy similar a la de muestras de 5mm de espesor.	

REGRESIÓN LINEAL

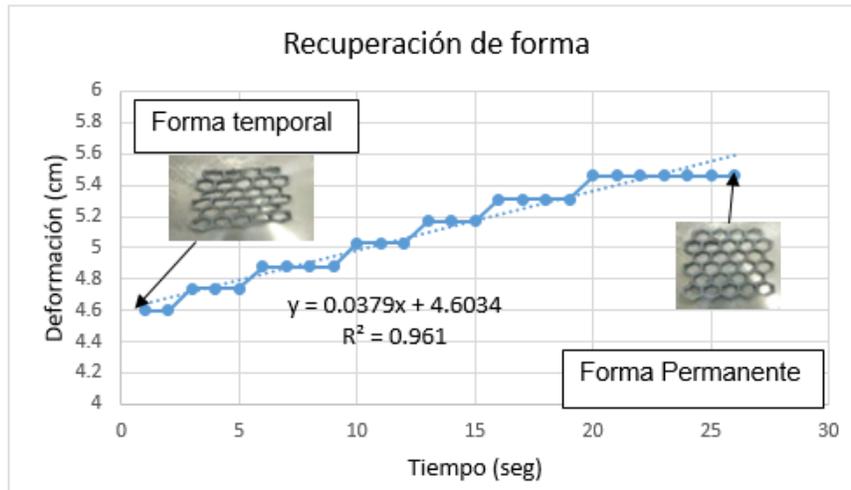


Figura 52. Gráfico "Deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0379 cm/s

Para el gráfico "Deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0379$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

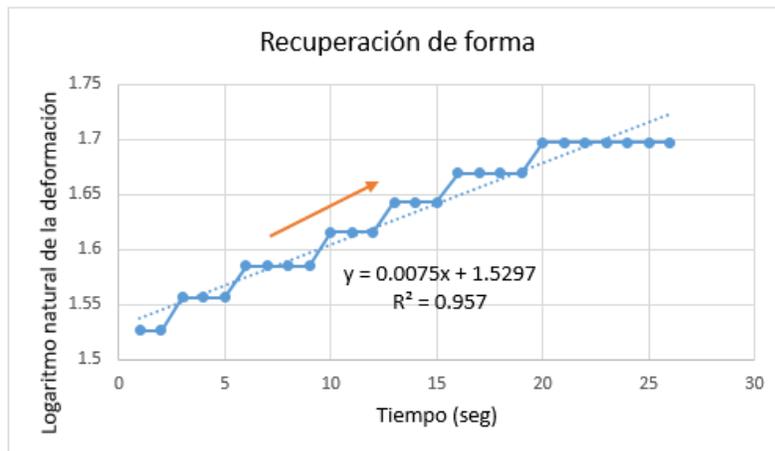
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.961$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 15. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.961	0.957	0.9523

$$0.9523 < 0.957 < 0.961$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 53. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Logaritmo natural de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesaria para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0075$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.957$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 16. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor](#)

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.961	0.957	0.9523

$$0.9523 < 0.957 < 0.961$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN

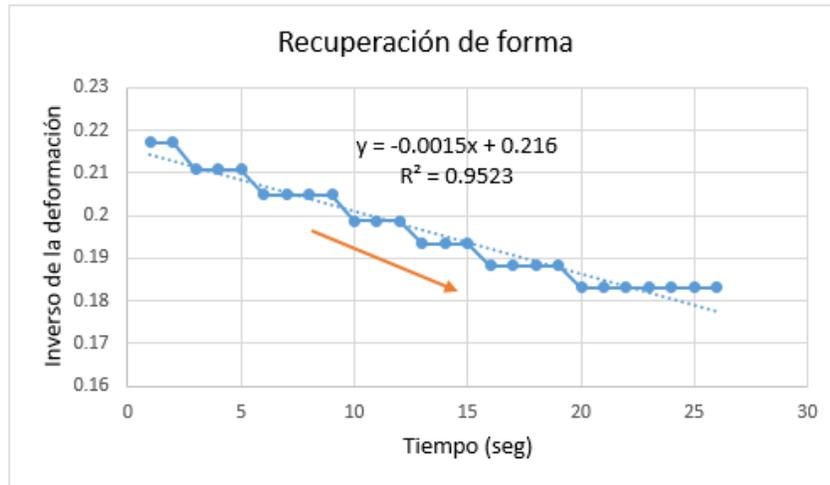


Figura 54. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 5mm de espesor

Para el gráfico “Inverso de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesaria para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0015$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9523$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 17. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 5mm de espesor

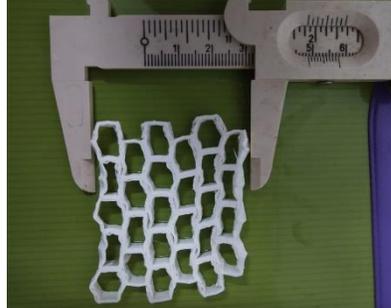
Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.961	0.957	0.9523

$$0.9523 < 0.957 < 0.961$$

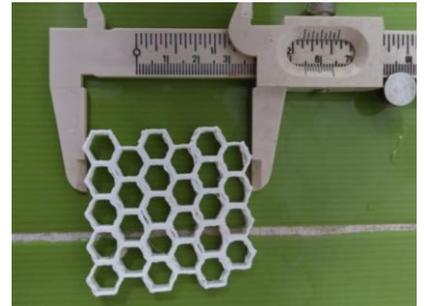
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



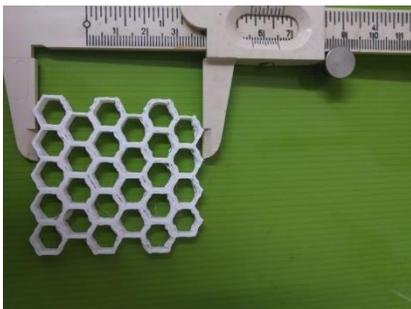
Forma original 56 mm



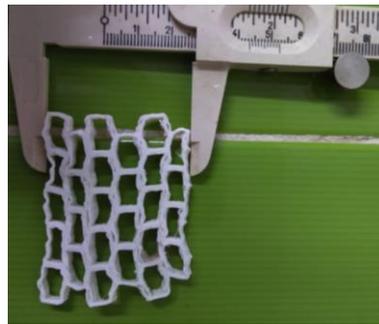
Forma temporal 49 mm



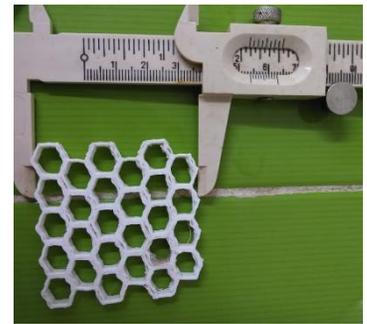
Recuperación de forma 54.6 mm



Forma original 56 mm



Forma temporal 44 mm



Recuperación de forma 54 mm

Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Para este caso las muestras de honeycomb fueron sometidas a deformación por compresión pues por la geometría de la misma se permitía un mejor análisis en su recuperación

Ecuación 5. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras honeycomb de 5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{49\text{mm} - 1.4\text{mm}}{49\text{mm}} = 0.97 * 100 = 97\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{44\text{mm} - 2\text{mm}}{44\text{mm}} = 0.95 * 100 = 95\%$$

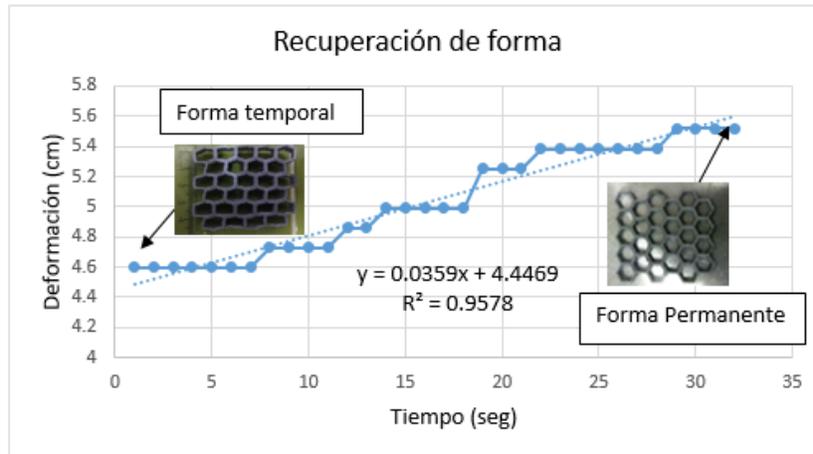
E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Honeycomb de 5mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

REGRESIÓN LINEAL



[Figura 55. Gráfico "Deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

Velocidad promedio de recuperación = 0.0359 cm/s

Para el gráfico "Deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0359$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

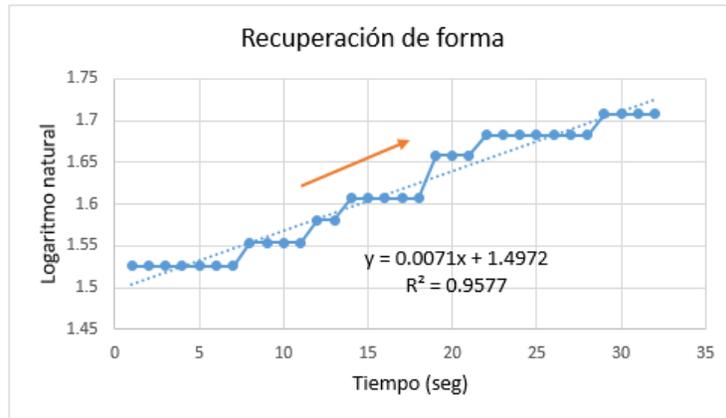
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9578$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 18. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9578	0.9577	0.9566

$$0.9566 < 0.9577 < 0.9578$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 56. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Logaritmo natural de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesaria para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0071$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

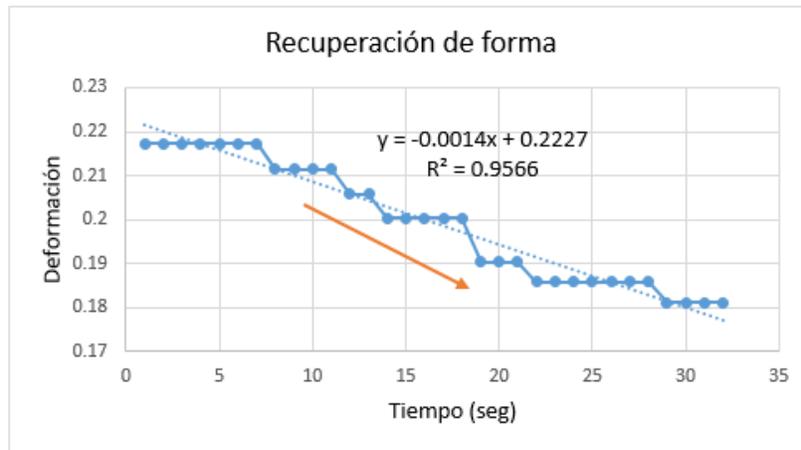
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9577$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 19. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9578	0.9577	0.9566

$$0.9566 < 0.9577 < 0.9578$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 57. Gráfico "Deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

Para el gráfico "inverso de la deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material de Honeycomb (de espesor 7.5 mm) desde su forma temporal hacia su forma original en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión no lineal conocida también como línea de tendencia fue necesaria para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0014$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

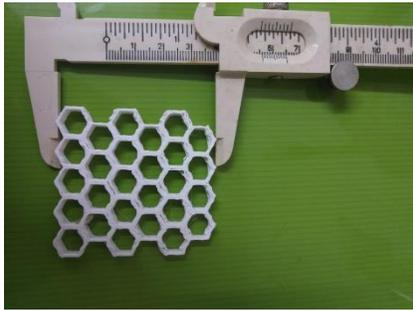
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9566$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 20. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor](#)

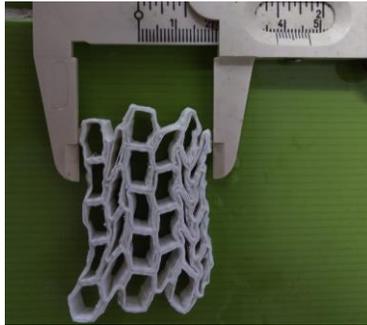
Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9578	0.9577	0.9566

$$0.9566 < 0.9577 < 0.9578$$

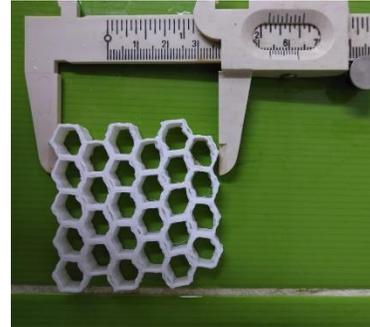
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



Forma original 56 mm



Forma temporal 37 mm



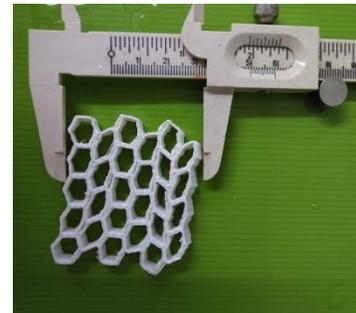
Recuperación de forma 54 mm



Forma original 56 mm



Forma temporal 35 mm



Recuperación de forma 49 mm

Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 6. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras honeycomb de 7.5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{37mm - 2mm}{37mm} = 0.94 * 100 = 94\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{35mm - 7mm}{35mm} = 0.8 * 100 = 80\%$$

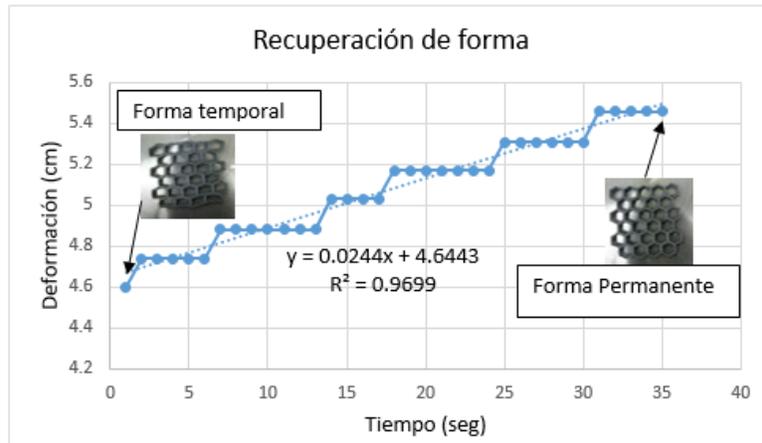
E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Honeycomb de 7.5mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

REGRESIÓN LINEAL



[Figura 58. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor](#)

Velocidad promedio de recuperación = 0.0244 cm/s

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 10mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0244$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

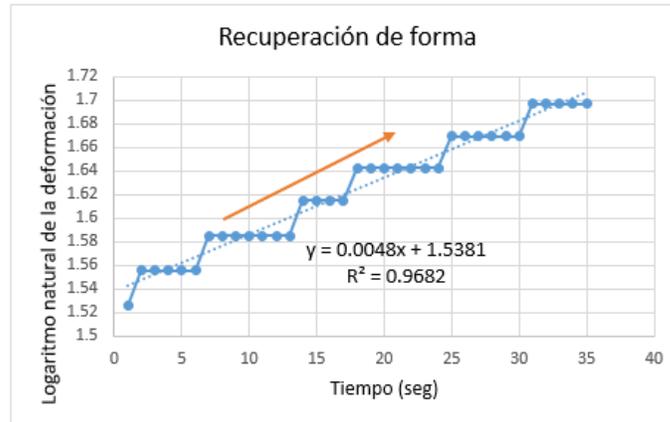
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9699$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 21. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor](#)

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9699	0.9682	0.9658

$$0.9658 < 0.9682 < 0.9699$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACION



[Figura 59. Gráfico “Logaritmo de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor](#)

Para el gráfico “Logaritmo de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 10mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0048$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9682$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 22. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor](#)

Coficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9699	0.9682	0.9658

$$0.9658 < 0.9682 < 0.9699$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 60. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura Honeycomb de 10mm de espesor](#)

Para el gráfico “Inverso de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de honeycomb (de espesor de 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.001$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9658$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 23. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura honeycomb de 10mm de espesor](#)

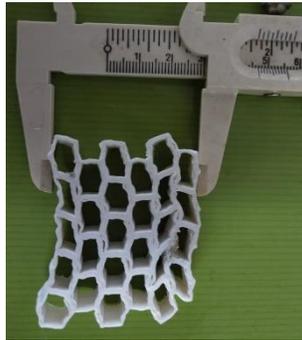
Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9699	0.9682	0.9658

$$0.9658 < 0.9682 < 0.9699$$

Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



Forma original 56 mm



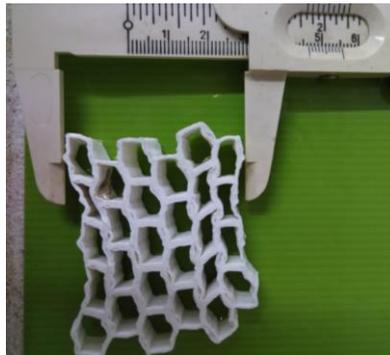
Forma temporal 46 mm



Recuperación de forma 55 mm



Forma original 56 mm



Forma temporal 46 mm



Recuperación de forma 54 mm

Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 7. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras honeycomb de 10mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{46mm - 1mm}{46mm} = 0.97 * 100 = 97\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{46mm - 2mm}{46mm} = 0.95 * 100 = 95\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Honeycomb de 10mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)

COMPARATIVA ENTRE ESPESORES (5mm, 7.5mm y 10mm)

R ²	Grafico	Espesor	Muestra	Velocidad de recuperación
0.961	Regresión lineal simple	5mm		0.0379 cm/s
0.957	Logaritmo natural de la deformación			
0.9523	Inverso de la deformación			
0.9578	Regresión lineal simple	7.5mm		0.0359 cm/s
0.9577	Logaritmo natural de la deformación			
0.9566	Inverso de la deformación			
0.9699	Regresión lineal simple	10mm		0.0244 cm/s
0.9682	Logaritmo natural de la deformación			
0.9658	Inverso de la deformación			

[Figura 61. Comparativo de espesores y velocidades de recuperación para estructuras Honeycomb](#)

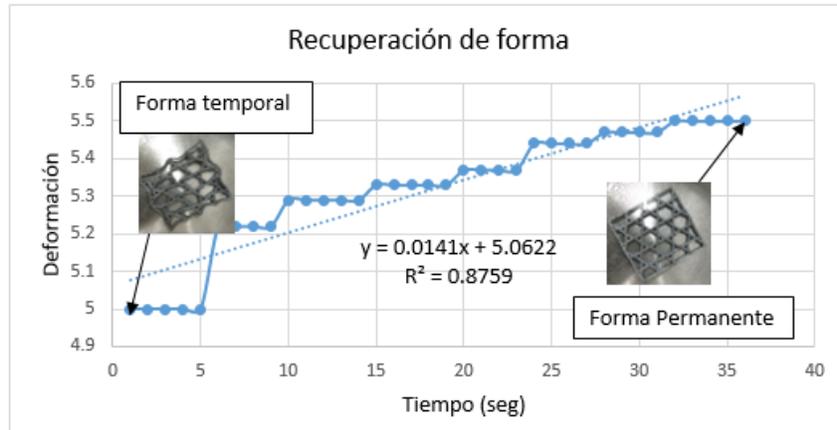
La tabla resume la comparativa entre espesores para estructuras honeycomb (5mm, 7.5mm y 10mm), es posible observar que a medida que aumenta el espesor las velocidades disminuyen. La estructura honeycomb de 5mm de espesor posee mayor velocidad que la estructura de 7.5mm y 10mm. Los coeficientes de determinación R² señalan el grado menor de error (más cercano a 1) que existe para la tendencia a la linealidad. Las regresiones lineales simples se ajustan mejor a este contexto.

NOTA: se decidió tomar con base al coeficiente de determinación (R²) la regresión lineal simple como base para el análisis de la velocidad de recuperación de forma o cinética de recuperación.

Tabla 24. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras honeycomb

Geometría	Espesor	% de recuperación	Interpretación
	5mm	97	Con base a los cálculos realizados a las muestras de honeycomb de 5mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo, lo que significa que es una recuperación muy similar a la de la forma original. Debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por compresión, es decir fueron deformadas a una dimensión menor a la de la estructura original, el porcentaje de recuperación quedó por debajo del 100% correspondiente a la dimensión de la forma original (estructura impresa sin deformaciones).
		95	
	7.5mm	94	Con base a los cálculos realizados a las muestras de honeycomb de 7.5mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación muy variante, pues una de las muestras presentó una recuperación efectiva mientras que otra fue totalmente diferente. La posible explicación por la que sucede este tipo de eventos se deba fundamentalmente a la geometría de forma y al proceso de llevar la deformación (programación) pues este es un proceso que se lleva a cabo de forma manual y genera alteraciones internas en la geometría de la muestra.
		80	
	10mm	97	Con base a los cálculos realizados a las muestras de honeycomb de 10mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo muy similar a la de muestras de 5mm de espesor.
		95	

REGRESIÓN LINEAL



[Figura 62. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor](#)

Velocidad promedio de recuperación = 0.0141 cm/s

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de Kagome (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0141$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

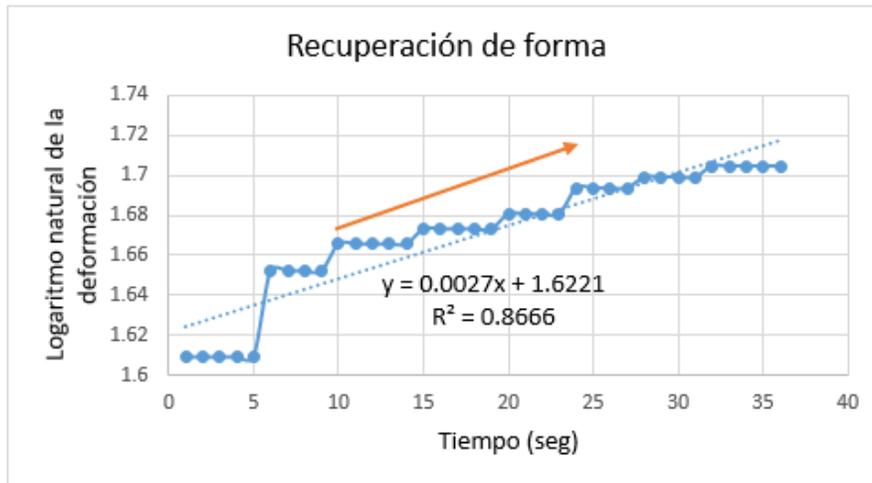
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.8759$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 25. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor](#)

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.8759	0.8666	0.8569

$$0.8569 < 0.8666 < \text{0.8759}$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 63. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Logaritmo de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de Kagome (de espesor de 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0027$ corresponde al valor promedio de velocidad de recuperación en términos de cm/s.

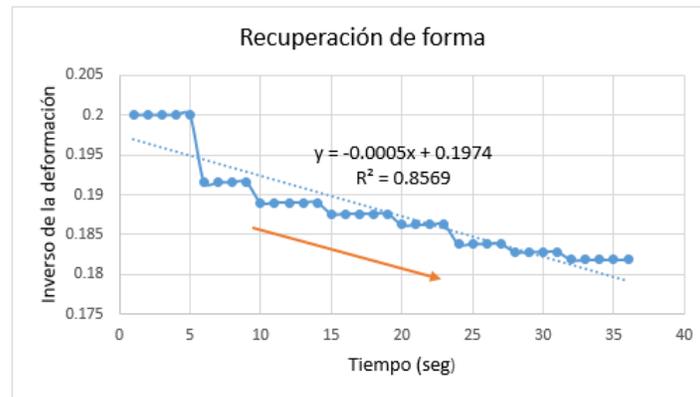
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.8666$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 26. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor](#)

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.8759	0.8666	0.8569

$$0.8569 < 0.8666 < 0.8759$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 64. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Inverso de la deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde a un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0005$ corresponde a la velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

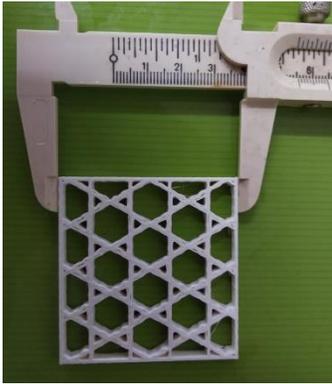
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.8569$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 27. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 5mm de espesor](#)

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.8759	0.8666	0.8569

$$0.8569 < 0.8666 < 0.8759$$

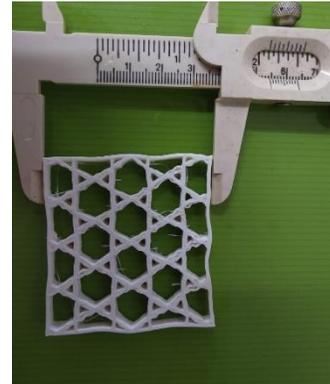
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



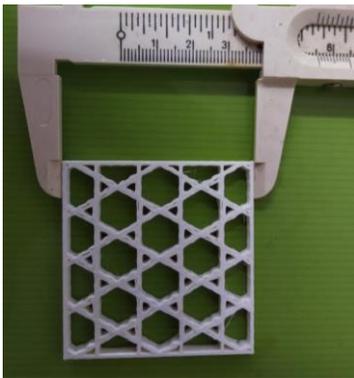
Forma original 55 mm



Forma temporal 49 mm



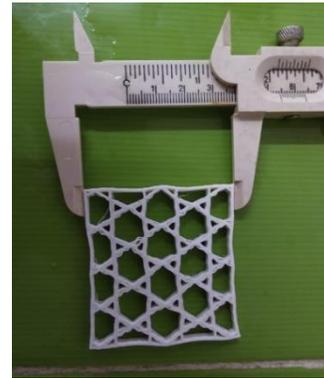
Recuperación de forma 54mm



Forma original 55 mm



Forma temporal 47 mm



Recuperación de forma 54 mm

Las muestras de kagome fueron sometidas a deformación por compresión debido a que la geometría de la misma se ajustaba a un mejor análisis. En este sentido las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 8. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras de kagome de 5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{49\text{mm} - 1\text{mm}}{49\text{mm}} = 0.97 * 100 = 97\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{47\text{mm} - 1\text{mm}}{47\text{mm}} = 0.95 * 100 = 97\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Kagome de 5mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

REGRESIÓN LINEAL

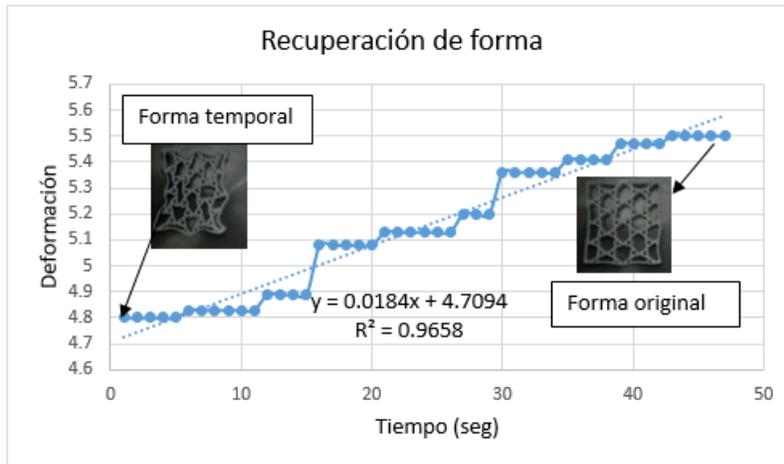


Figura 65. Gráfico "Deformación vs tiempo" y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R^2 en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0184 cm/s

Para el gráfico "Deformación vs Tiempo", el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0184$ corresponde al valor de velocidad promedio de recuperación en termino de cm/s.

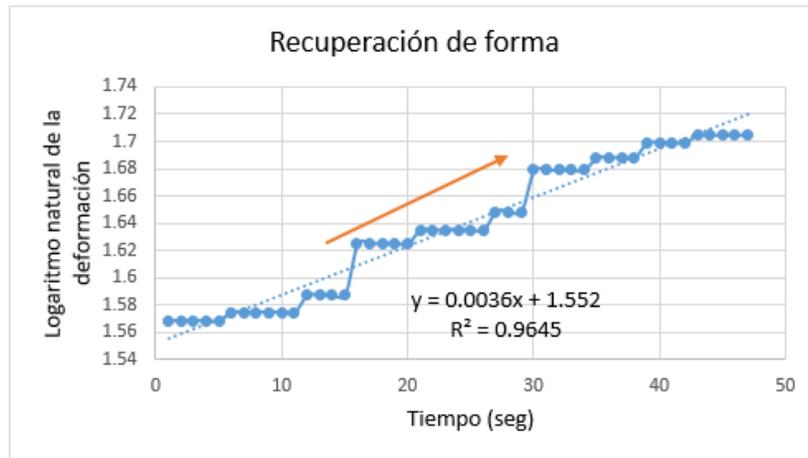
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9658$ se utilizó con el fin de verificar el grafico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 28. Determinación y selección de grafico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R^2	0.9658	0.9645	0.9628

$$0.9628 < 0.9645 < 0.9658$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 66. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0036$ corresponde al valor de velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

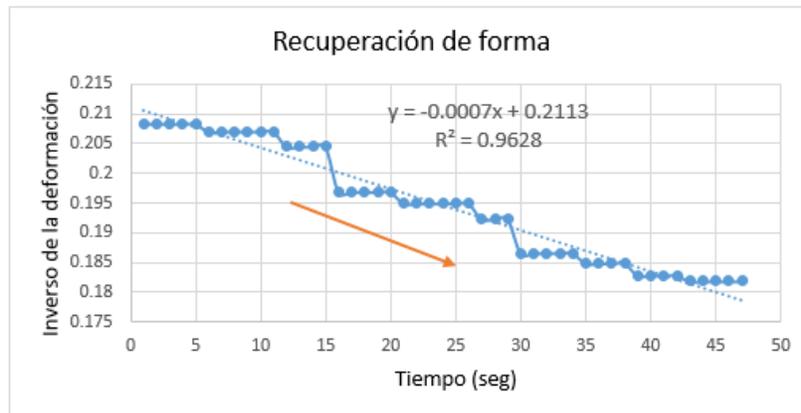
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9645$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 29. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor](#)

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9658	0.9645	0.9628

$$0.9628 < 0.9645 < 0.9658$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 67. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 7.5mm de espesor](#)

Para el gráfico “Inverso de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 7.5mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar un parámetro o ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0007$ corresponde al valor de velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

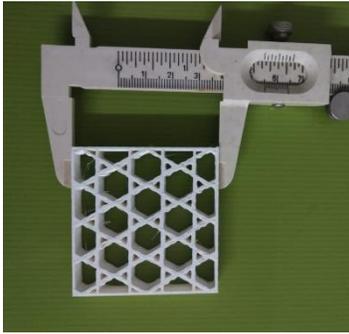
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9628$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de Inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 30. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 7.5mm de espesor](#)

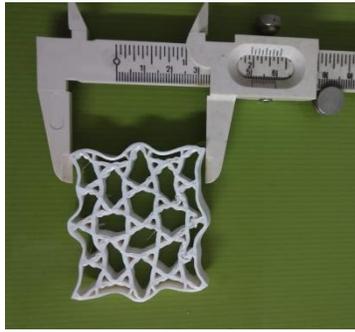
Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9658	0.9645	0.9628

$$0.9628 < 0.9645 < 0.9658$$

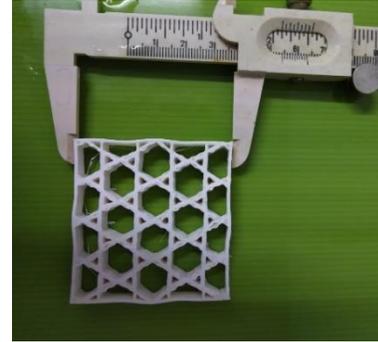
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



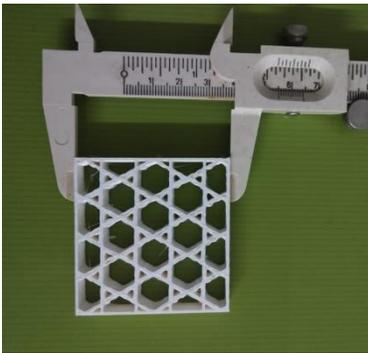
Forma original 55 mm



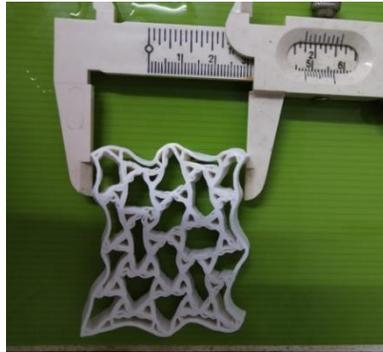
Forma temporal 50 mm



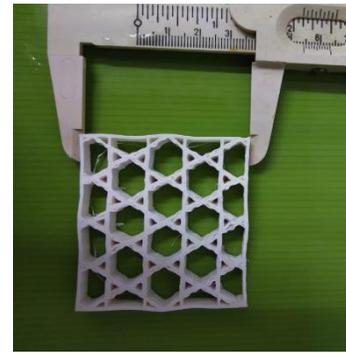
Recuperación de forma 54mm



Forma original 55 mm



Forma temporal 48 mm



Recuperación de forma 54mm

Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 9. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras de kagome de 7.5mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{50mm - 1mm}{50mm} = 0.98 * 100 = 98\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{48mm - 1mm}{48mm} = 0.97 * 100 = 97\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Kagome de 7.5mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la forma original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

REGRESIÓN LINEAL

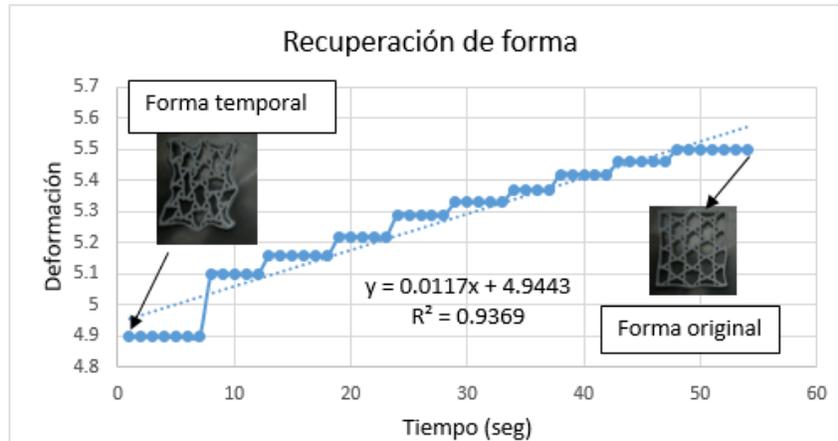


Figura 68. Gráfico “Deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor

Velocidad promedio de recuperación = 0.0117 cm/s

Para el gráfico “Deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 10mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar una ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0117$ corresponde a la velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

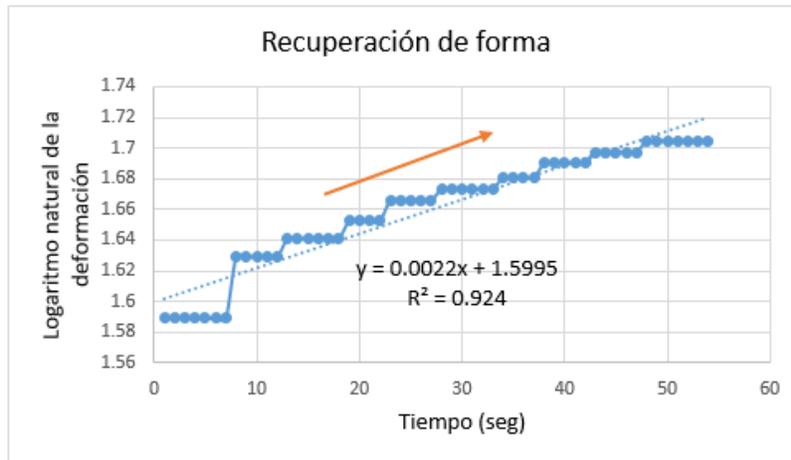
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9369$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. En virtud a ello, el gráfico de regresión lineal se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en la mayoría de las pruebas la tendencia estaba en virtud de la regresión lineal simple.

Tabla 31. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor

Coeficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9369	0.924	0.9199

$$0.9199 < 0.924 < 0.9369$$

LOGARITMO NATURAL DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 69. Gráfico “Logaritmo natural de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor](#)

Para el gráfico “Logaritmo natural de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 10mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar una ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0022$ corresponde a la velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

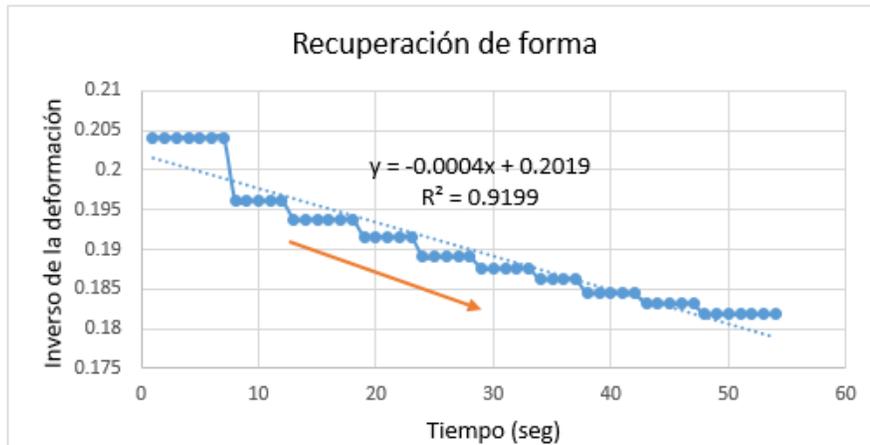
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.924$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico de logaritmo natural vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 32. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor](#)

Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9369	0.924	0.9199

$$0.9199 < 0.924 < 0.9369$$

INVERSO DE LA DEFORMACIÓN



[Figura 70. Gráfico “Inverso de deformación vs tiempo” y parámetros de ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación R² en condiciones térmicas a 55°C para estructura de Kagome de 10mm de espesor](#)

Para el gráfico “Inverso de deformación vs Tiempo”, el comportamiento que presenta el material de kagome (de espesor 10mm) desde su forma temporal hacia su forma original o permanente en condiciones hidrotérmicas a 55°C, corresponde un comportamiento de recuperación no lineal, por lo que la obtención de la regresión lineal conocida también como línea de tendencia fue necesario para hallar una ecuación lineal donde el valor de la pendiente $m = 0.0004$ corresponde a la velocidad promedio de recuperación en términos de cm/s.

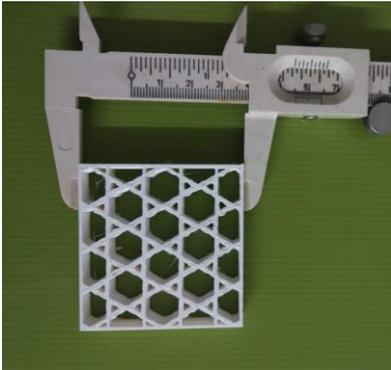
El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9199$ se utilizó con el fin de verificar el gráfico adecuado que se ajustaba mayormente a la linealidad, es decir, donde se presentara menor error. El gráfico inverso de la deformación vs tiempo no se seleccionó como el mejor parámetro de ajuste para el efecto de recuperación debido a que en las pruebas realizadas la tendencia de los coeficientes de determinación estaba en virtud de la regresión lineal simple.

[Tabla 33. Determinación y selección de gráfico por medio del coeficiente de determinación para estructura kagome de 10mm de espesor](#)

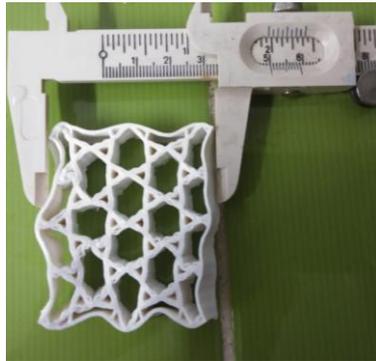
Coefficiente de determinación	Regresión lineal simple	Logaritmo natural de deformación	Inverso de deformación
R ²	0.9369	0.924	0.9199

$$0.9199 < 0.924 < 0.9369$$

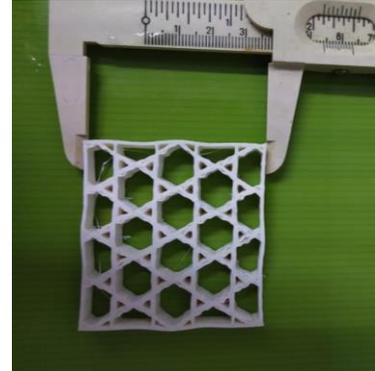
Cálculo para porcentajes de recuperación de forma



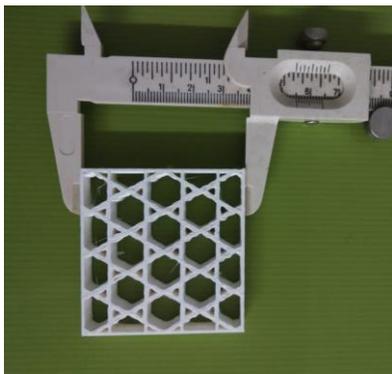
Forma original 55 mm



Forma temporal 49 mm



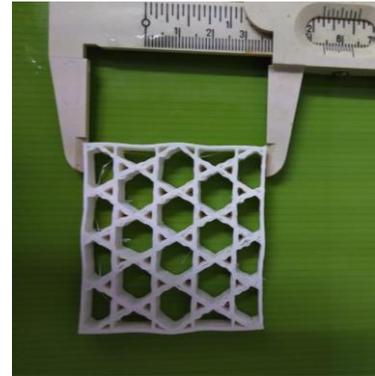
Recuperación de forma 54mm



Forma original 55 mm



Forma temporal 48 mm



Recuperación de forma 54mm

Las muestras fueron medidas con un vernier en su forma original y medidas también en su forma temporal. En el proceso de recuperación, es decir desde la forma temporal hacia la forma permanente la estructura tuvo un efecto de recuperación que se caracterizaba por ser menor a la de la forma original. Esto significa que las muestras deformadas no recuperaron su forma al 100%.

Ecuación 10. Ecuación para cálculo de recuperación de forma para muestras de kagome de 10mm de espesor

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{49mm - 1mm}{50mm} = 0.96 * 100 = 96\%$$

$$\text{Recuperación de forma} = \frac{E_{max} - E_r}{E_{max}} = \frac{48mm - 1mm}{48mm} = 0.97 * 100 = 97\%$$

E_{max} = Deformación máxima

E_r = Parte no recuperada

El porcentaje de recuperación para las estructuras de Kagome de 10mm de espesor es menor al 100%, esto es debido a que las muestras fueron sometidas a deformación de compresión lo cual conlleva a que una vez que recupere su forma, esta obtenga dimensiones menores a la de la original.

Es preciso mencionar que el efecto de recuperación de forma en los materiales poliméricos de PLA/PHA no se cumple totalmente igual a la de la forma original.

COMPARATIVA ENTRE ESPEORES (5mm, 7.5mm y 10mm)

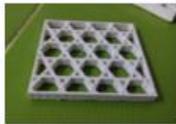
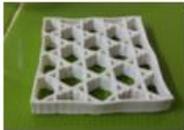
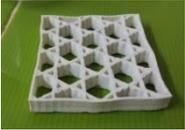
R ²	Grafico	Espeor	Muestra	Velocidad de recuperaci3n
0.8759	Regresi3n lineal simple	5mm		0.0141 cm/s
0.866	Logaritmo natural de la deformaci3n			
0.8569	Inverso de la deformaci3n			
0.9658	Regresi3n lineal simple	7.5mm		0.0184 cm/s
0.9645	Logaritmo natural de la deformaci3n			
0.9628	Inverso de la deformaci3n			
0.9369	Regresi3n lineal simple	10mm		0.0117 cm/s
0.924	Logaritmo natural de la deformaci3n			
0.9199	Inverso de la deformaci3n			

Figura 71. Comparativo de espesores y velocidades de recuperaci3n para estructuras de Kagome.

La tabla resume la comparativa entre espesores para estructuras de kagome (5mm, 7.5mm y 10mm), en este caso particular es posible observar que la estructura de 7.5mm de espesor presente mayor velocidad de recuperaci3n comparada con las estructuras de 5 y 10mm de espesor. La explicaci3n a este caso se deba particularmente a la geometr3a de la forma. Los coeficientes de determinaci3n R² se~alan el grado menor de error (m3s cercano a 1) que existe para la tendencia a la linealidad. Las regresiones lineales simples se ajustan mejor a este contexto.

NOTA: se decidi3 tomar con base al coeficiente de determinaci3n (R²) la regresi3n lineal simple como base para el an3lisis de la velocidad de recuperaci3n de forma o cin3tica de recuperaci3n.

Tabla 34. Resumen de porcentajes de recuperación para muestras kagome

Geometría	Espesor	% de recuperación	Interpretación
	5mm	97	Con base a los cálculos realizados a las muestras de kagome de 5mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo, lo que significa que es una recuperación muy similar a la de la forma original. Debido a que las muestras fueron sometidas a deformación por compresión, es decir fueron deformadas a una dimensión menor a la de la estructura original, el porcentaje de recuperación quedó por debajo del 100% correspondiente a la dimensión de la forma original (estructura impresa sin deformaciones).
		97	
	7.5mm	98	En comparación con las estructuras de espesores de 5mm, las muestras de 7.5 mm de espesor presentaron un leve incremento en su recuperación. A pesar de ello, el comportamiento fue muy similar al resto de las muestras.
		98	Es posible entender que el proceso de memoria de forma en los materiales poliméricos, no se cumple en un porcentaje al 100%. Sin embargo la geometría y densidad y temperatura influyen en el proceso de recuperación.
	10mm	96	Con base a los cálculos realizados a las muestras de kagome de 10mm de espesor, estas presentaron un efecto de recuperación efectivo muy similar a la de muestras de 5mm de espesor.
		97	En general los 3 tipos de muestras con diferentes espesores presentaron un efecto de recuperación muy parecido.

COMPARATIVA DE VELOCIDAD DE RECUPERACION PARA DIFERENTES GEOMETRIAS INFLUIDAS POR LA TEMPERATURA (PARA ESPESES DE 5MM)

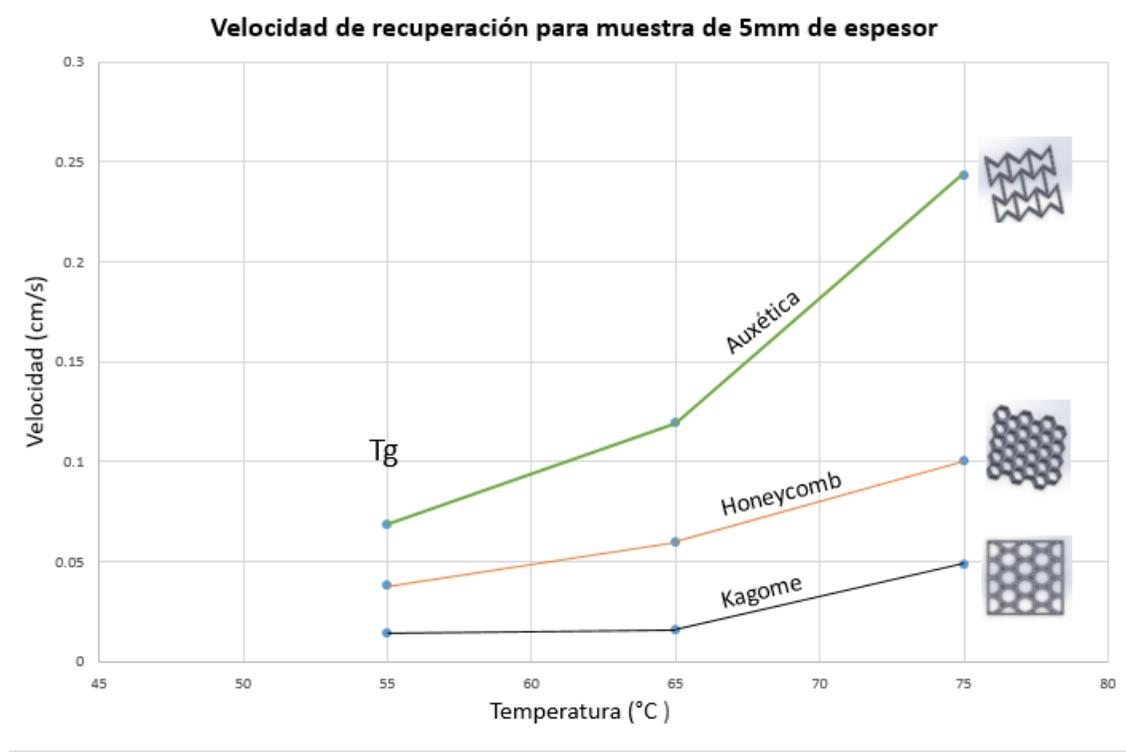


Figura 72. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 5mm de espesor

El efecto de recuperación de forma para el material polimérico de PLA/PHA se logra activar a partir de la temperatura de transición vítrea conocida comúnmente como Tg. En el gráfico mostrado, la velocidad de recuperación se activa a partir de los 55°C (temperatura de transición vítrea registrada por el proveedor) y a medida que aumenta la temperatura (65°C y 75°C) las velocidades de recuperación aumentan. Es posible visualizar que las estructuras auxéticas poseen un mejor comportamiento de recuperación (velocidad de recuperación) en comparación con las estructuras de honeycomb y de kagome.

A partir del gráfico es posible entender que la geometría y temperatura juegan un papel importante para la recuperación de forma pues en todos los casos se visualiza un efecto de recuperación y/o velocidad de recuperación que aumenta a medida del incremento de la temperatura. Además de ello la densificación de los materiales influyen en el proceso de memoria de forma pues a mayor contenido de material menor es la velocidad de recuperación. Considerando estas variables mencionadas, es posible entender la razón por la cual la estructura auxética presente una velocidad de recuperación eficaz.

COMPARATIVA DE VELOCIDAD DE RECUPERACION PARA DIFERENTES GEOMETRIAS INFLUIDAS POR LA TEMPERATURA (PARA ESPESORES DE 7.5MM)

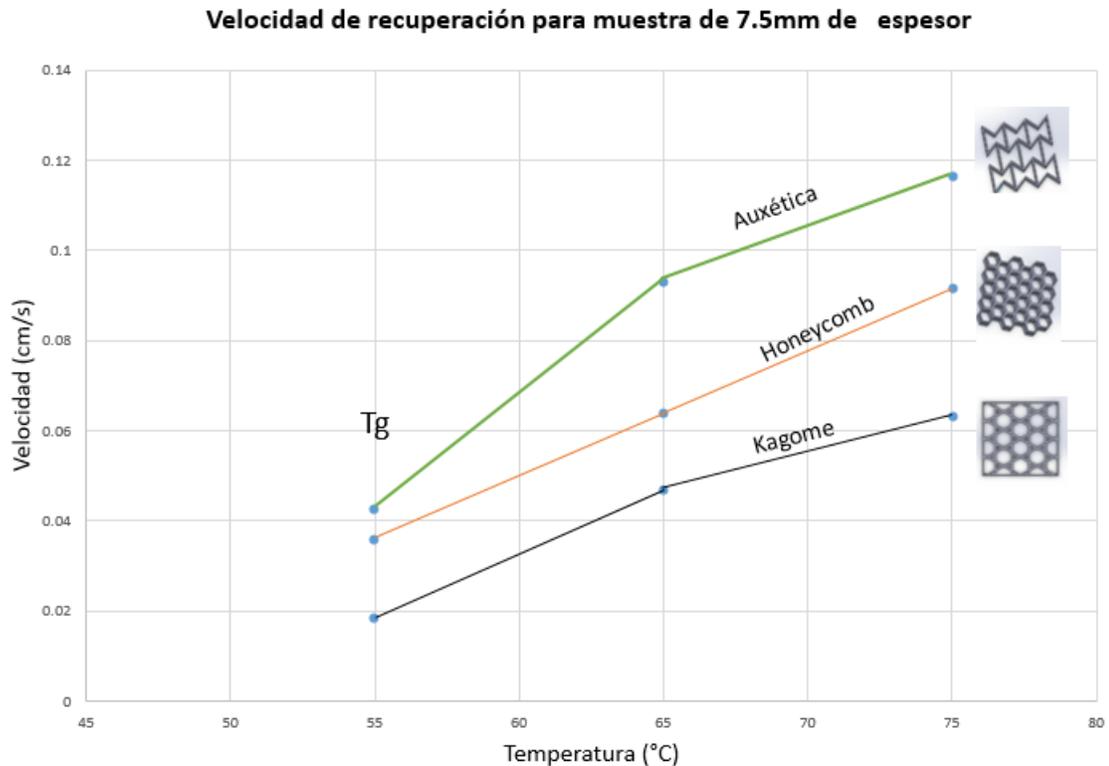


Figura 73. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 7.5mm de espesor

El comportamiento de recuperación para las muestras de 7.5mm de espesor se logra caracterizar por ser muy parecidas a las de las estructuras de 5mm de espesor. Si bien todas las muestras presentan una recuperación de forma óptima, las estructuras auxéticas presentan un comportamiento y/o velocidad de recuperación mayor en comparación con el resto de las geometrías.

A partir del gráfico, se hace un análisis de las muestras impresas con el fin de verificar y comparar el efecto de recuperación (velocidad de recuperación) de los distintos tipos de geometría en relación a sus espesores. Para el caso de las muestras de 7.5 mm de espesor es posible entender que la geometría y temperatura juegan un papel importante para la recuperación de forma pues en todos los casos se visualiza un efecto de recuperación y/o velocidad de recuperación que aumenta a medida del incremento de la temperatura. Además de ello la densificación de los materiales influyen en el proceso de memoria de forma pues a mayor contenido de material menor es la velocidad de recuperación eficaz.

COMPARATIVA DE VELOCIDAD DE RECUPERACION PARA DIFERENTES GEOMETRIAS INFLUIDAS POR LA TEMPERATURA (PARA ESPESORES DE 10MM)

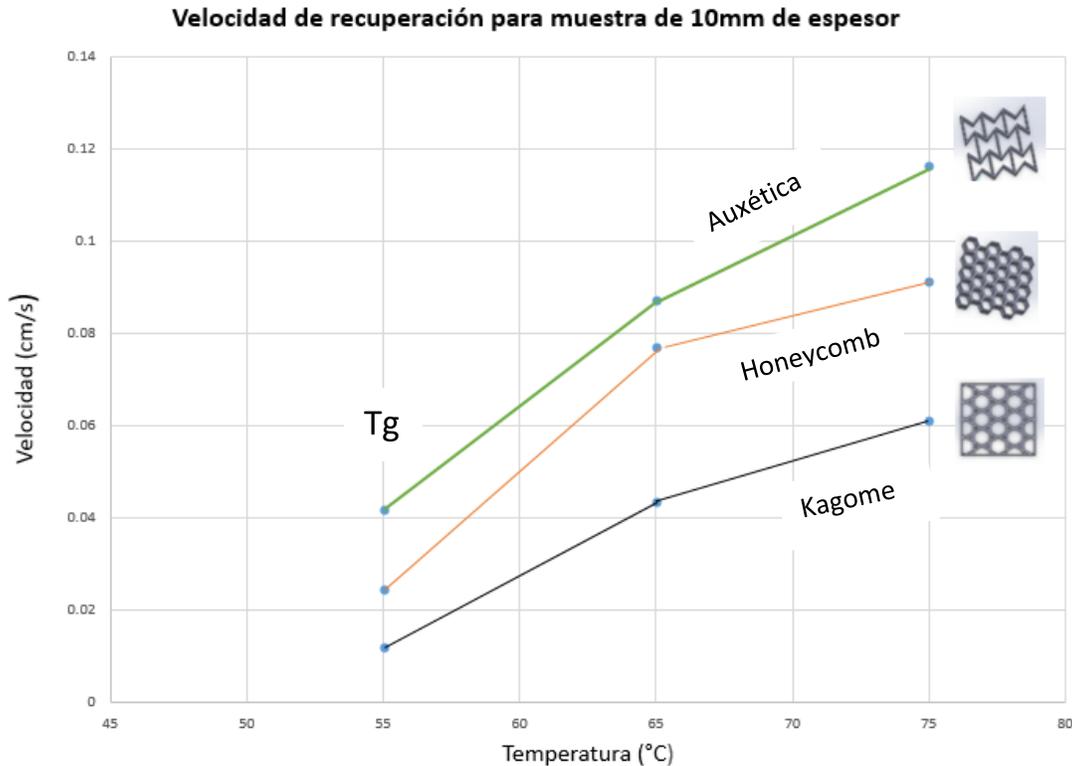
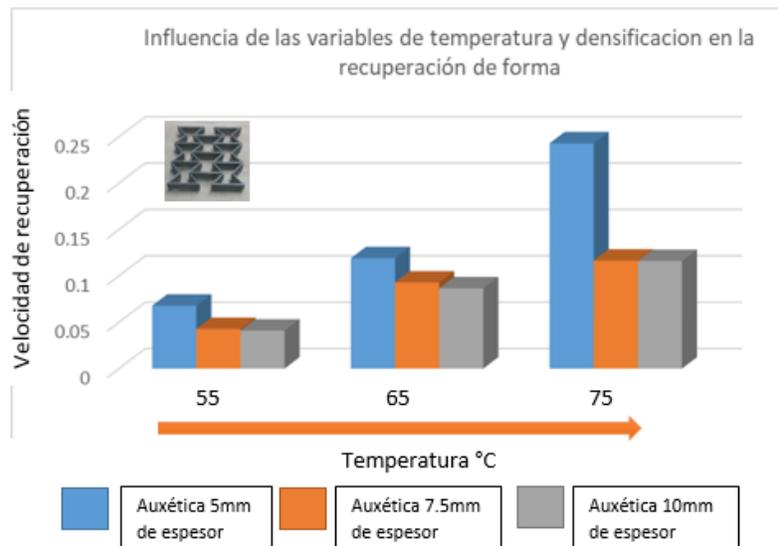


Figura 74. Gráfico Velocidad vs Temperatura para diferentes geometrías de 10mm de espesor

Al igual que las muestras de 5 y 7.5mm de espesor, las estructuras de 10mm de espesor poseen un comportamiento similar pues las formas auxéticas destacan por poseer una velocidad de recuperación mayor que aumenta a medida del incremento de la temperatura, para el caso de las estructuras que poseen menor velocidad de recuperación (formas de kagome) el efecto de memoria de forma se evidencia en menor cantidad. El efecto de recuperación de forma para este tipo de material se logra activar a partir de la temperatura de transición vítrea conocida comúnmente como Tg. En el gráfico mostrado, la velocidad de recuperación se activa a partir de los 55°C (temperatura de transición vítrea registrada por el proveedor) y a medida que aumenta la temperatura (65°C y 75°C) las velocidades de recuperación aumentan.

A partir del gráfico es posible entender que la geometría y temperatura juegan un papel importante para la recuperación de forma. Además de ello la densificación de los materiales influyen en el proceso de memoria de forma pues a mayor contenido de material menor es la velocidad de recuperación.

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE TEMPERATURA Y DENSIFICACIÓN EN LA RECUPERACIÓN DE FORMA

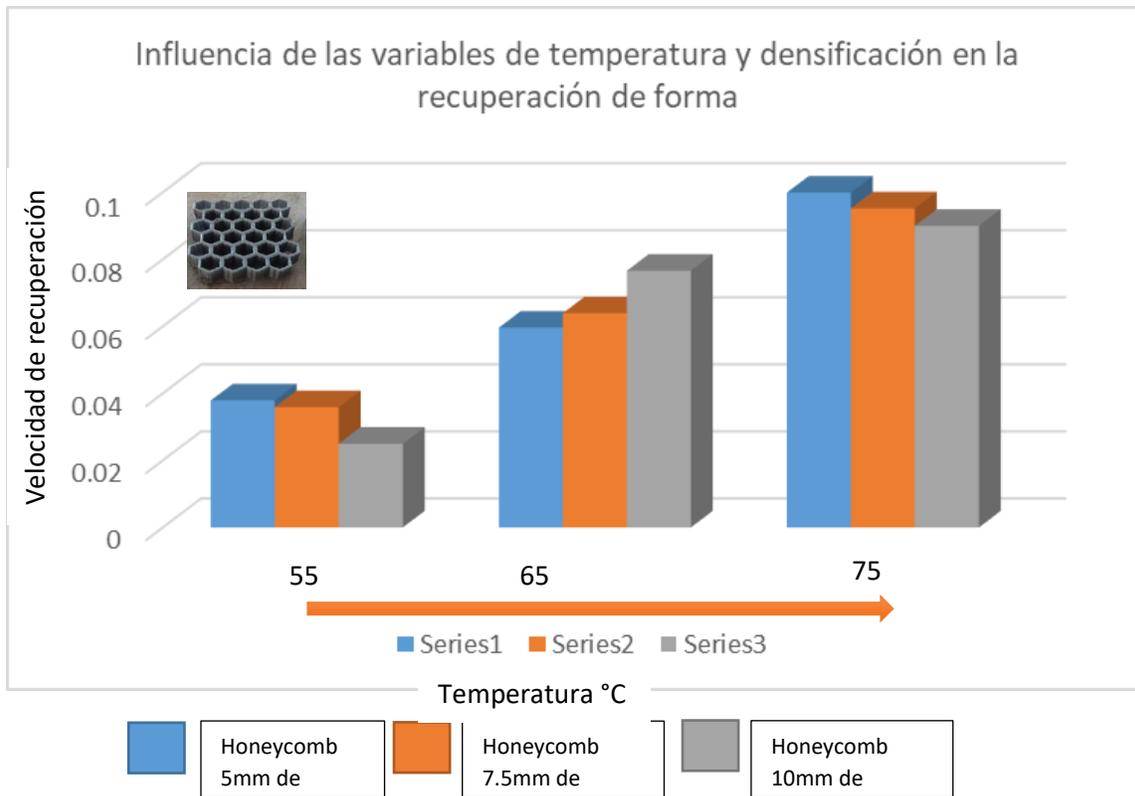


[Figura 75. Gráfico velocidad de recuperación vs Temperatura considerando las distintas densificaciones para muestras auxéticas.](#)

En el gráfico presentado se contempla como la densificación (contenido de material en las muestras) junto con la temperatura, influyen en el proceso de recuperación de forma.

Las velocidades de recuperación se encuentran directamente relacionadas al aumento de temperatura, es decir, a mayor temperatura mayor es la velocidad de recuperación. Además de ello, es posible ver cómo el contenido de material o masa influye en la recuperación de las muestras pues a menor densificación mayor es la velocidad de recuperación.

Este proceso se repite no solo para las muestras auxéticas sino también para las estructuras de honeycomb y de kagome.



[Figura 76. Grafico velocidad de recuperación vs Temperatura considerando las distintas densificaciones para muestras honeycomb](#)

Para el caso del gráfico de muestras honeycomb, se observa como hay un comportamiento similar al del gráfico de estructuras auxéticas (figura 75), sin embargo, existe un ligero cambio en su comportamiento pues en la sección de 65°C las muestras honeycomb aumentan su velocidad de recuperación en virtud del aumento de la densificación. La posible explicación por el cual ocurre este tipo de comportamiento se deba a la geometría de la estructura en su proceso de impresión y en la forma de llevar a cabo la programación de deformación (deformación manual).

ANÁLISIS POR DSC PARA LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA

Con el objetivo de verificar la temperatura de transición vítrea, se llevó a cabo el análisis de caracterización por DSC a las muestras poliméricas de PLA/PHA.

La idea de esta prueba, se basaba en verificar si la Tg del PLA/PHA son 55°C pues esta es la temperatura indicada por el proveedor.

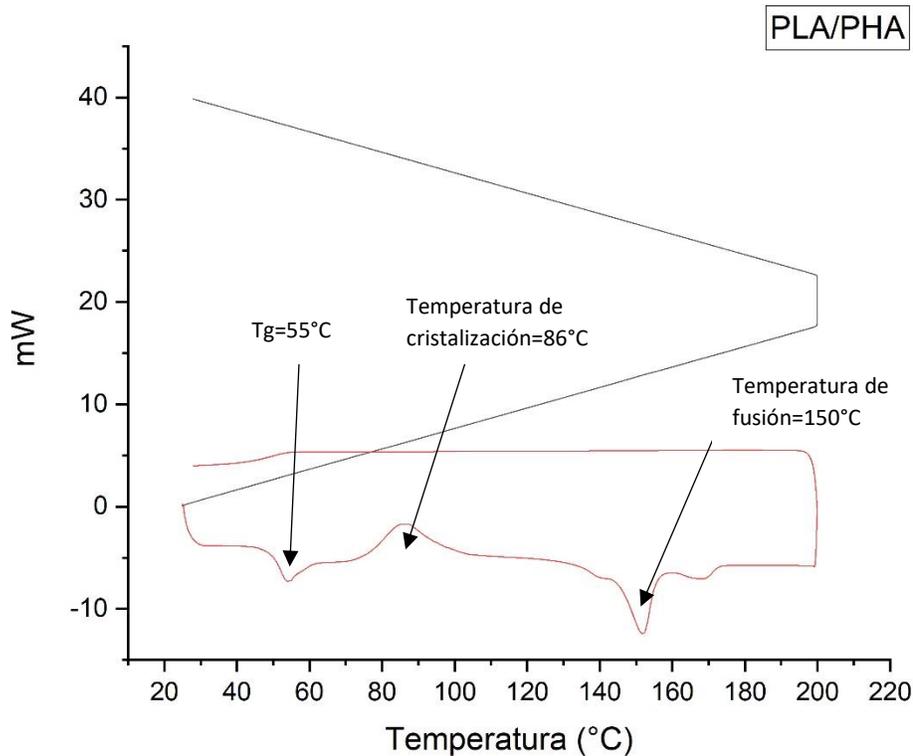


Figura 77. Gráfico DSC para el polímero de PLA/PHA

En el análisis por calorimetría diferencial de barrido es posible observar un pico o valle característico en la curva color rojo, este valor señala lo que se conoce como temperatura de transición vítrea comúnmente conocido como Tg. También es posible ver la temperatura de cristalización así como la temperatura de fusión (segundo y tercer pico respectivamente).

Con estos datos es posible corroborar que los valores señalados por el proveedor (Temperatura de transición) es la misma obtenida por medio de las pruebas de caracterización. La idea de verificar la temperatura de transición vítrea es por el hecho de verificar y señalar el punto clave que permite el efecto de memoria de forma, es decir el efecto de poder recuperar la forma cuando el material se encuentra deformado.

ANÁLISIS POR DMA PARA LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VITREA

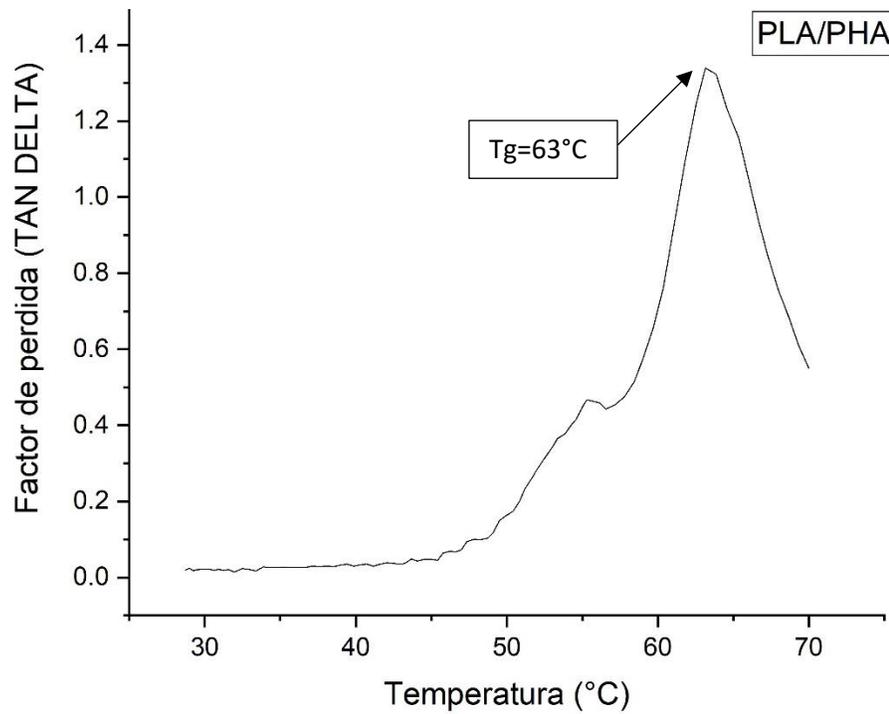
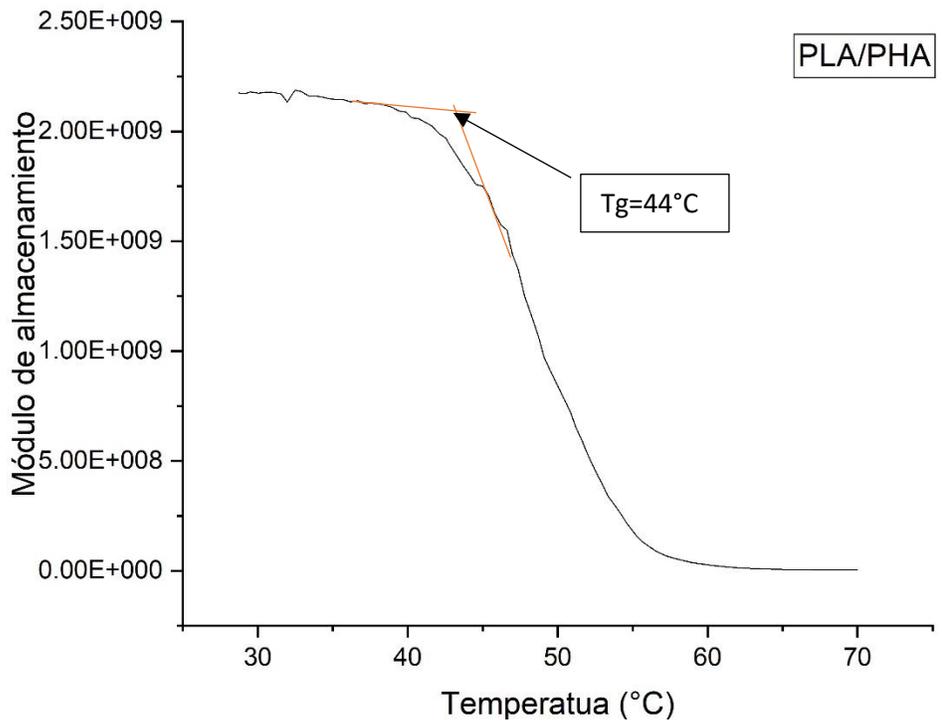


Figura 78. Gráficos DMA para el polímero de PLA/PHA

Otro de los estudios de caracterización para verificar la temperatura de transición vítrea fue por medio del análisis dinámico-mecánico conocido simplemente como DMA. Esta una técnica en la que se aplica una pequeña deformación a una muestra de manera cíclica lo que permite que se estudie la respuesta de los materiales al estrés, la temperatura, la frecuencia y otros valores.

Mediante este tipo de estudio es posible observar 2 valores distintivos asociados a la Tg. Para el primer caso del gráfico existe un declive en un valor de 44°C para el segundo gráfico el valor asociado al punto máximo es de un valor de 63°C. Es preciso mencionar que en las pruebas DMA normalmente la temperatura de transición es diferente en comparación con la prueba DSC.

ANÁLISIS DE LA LEY CONSTRUCTAL

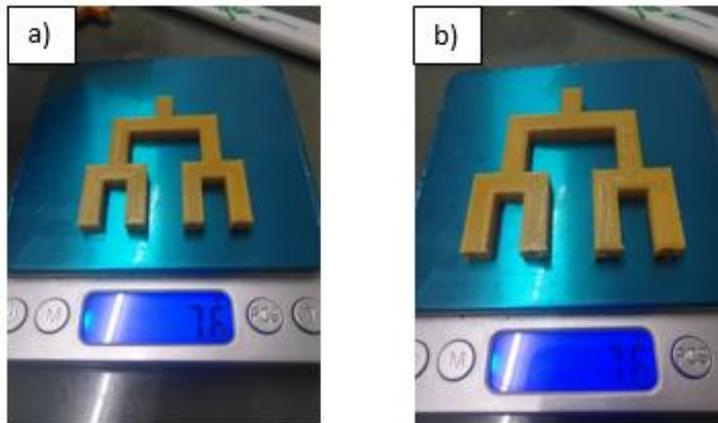


Figura 79. Estructura ramificada recta. a) Forma sólida b) forma hueca

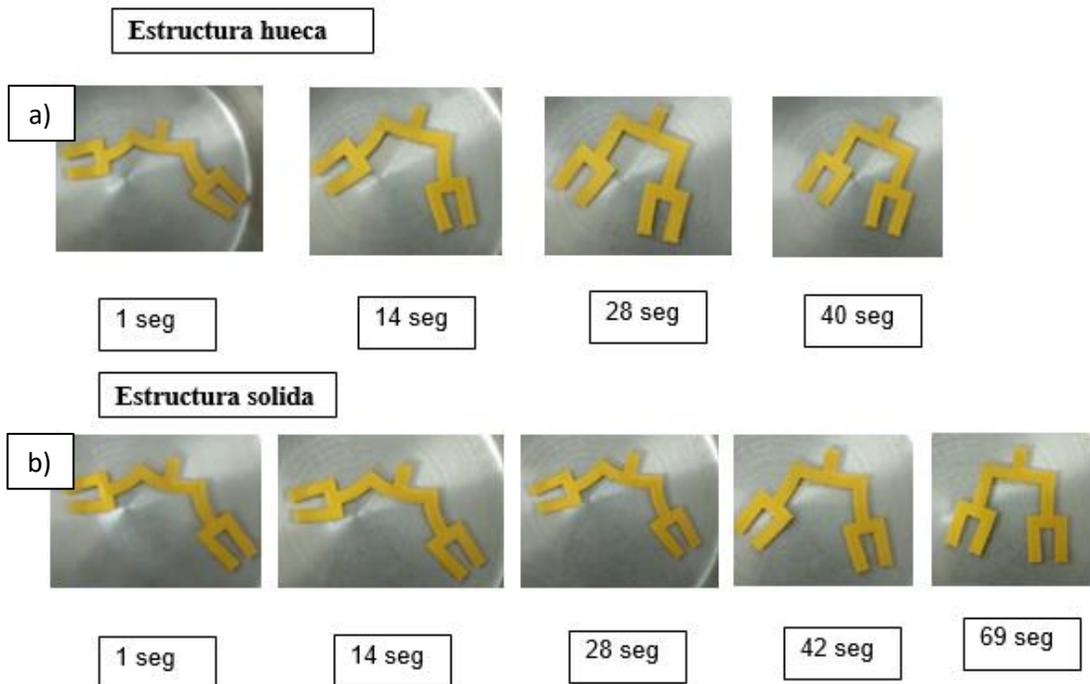


Figura 80. Efecto de recuperación por estímulo hidrotérmico en estructuras ramificadas. a) Recuperación de forma a los 40 seg para estructura hueca b) Recuperación de forma a los 69 seg para estructura sólida.

Partiendo del hecho de que la densificación es uno de los factores o variables que influyen en el proceso de recuperación, se distinguen dos tipos de impresiones con la misma masa (7.6 gramos), la diferencia entre cada muestra radica en el interior de la estructura pues una es totalmente sólida, mientras que otra se encuentra en forma de cavidad o hueco. El análisis de la ley constructal señala que las formas ramificadas permiten un mejor flujo de

energía de manera que para una estructura ramificada hueca, existe un mejor flujo de energía térmica por el interior de la muestra existiendo una mejor recuperación en cuanto al tiempo se refiere.

Para medir el efecto de recuperación se contempló el ángulo o abertura deformada de la muestra tal y como se muestra en la imagen.

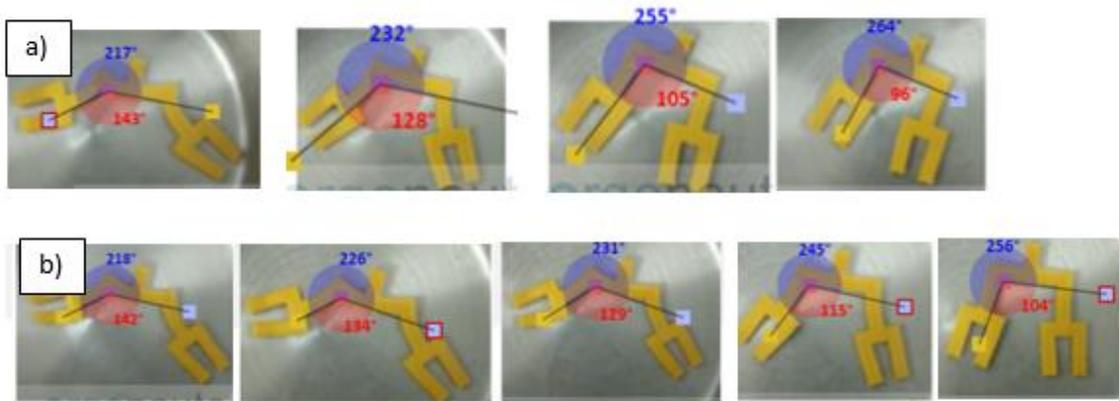


Figura 81. Angulo de recuperación para muestras constructales. a) estructura hueca b) estructura sólida

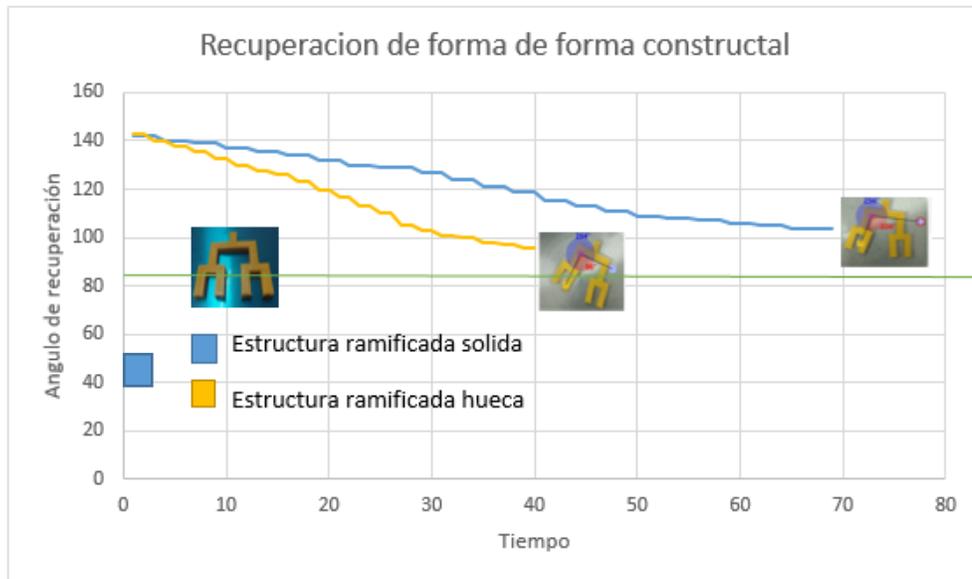


Figura 82. Comparativa de recuperación para muestras constructales. Las muestras huecas presentan una mejor recuperación (ángulo más cercano a 90°)

Si bien tanto la muestra constructal hueca como la sólida no recuperan su forma al 100%, es posible ver en el grafico (Fig 82) como la estructura con cavidad hueca tiene una mejor

recuperación (ángulo de 96°) en un tiempo menor en comparación con la muestra sólida donde su ángulo de recuperación son 104° en un tiempo de 69 segundos.

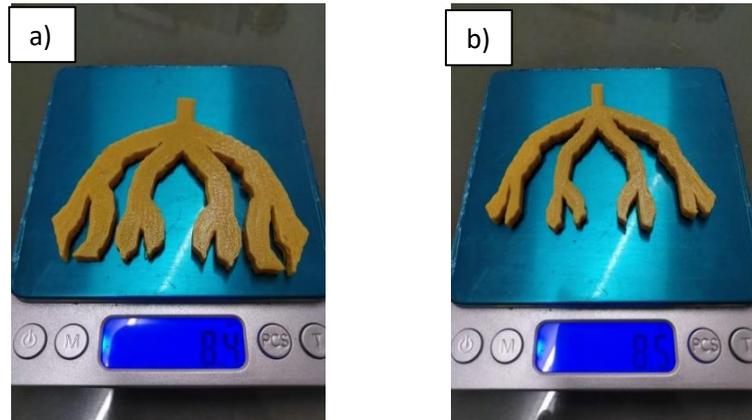


Figura 83. Estructura ramificada constructal. a) Forma hueca b) forma sólida

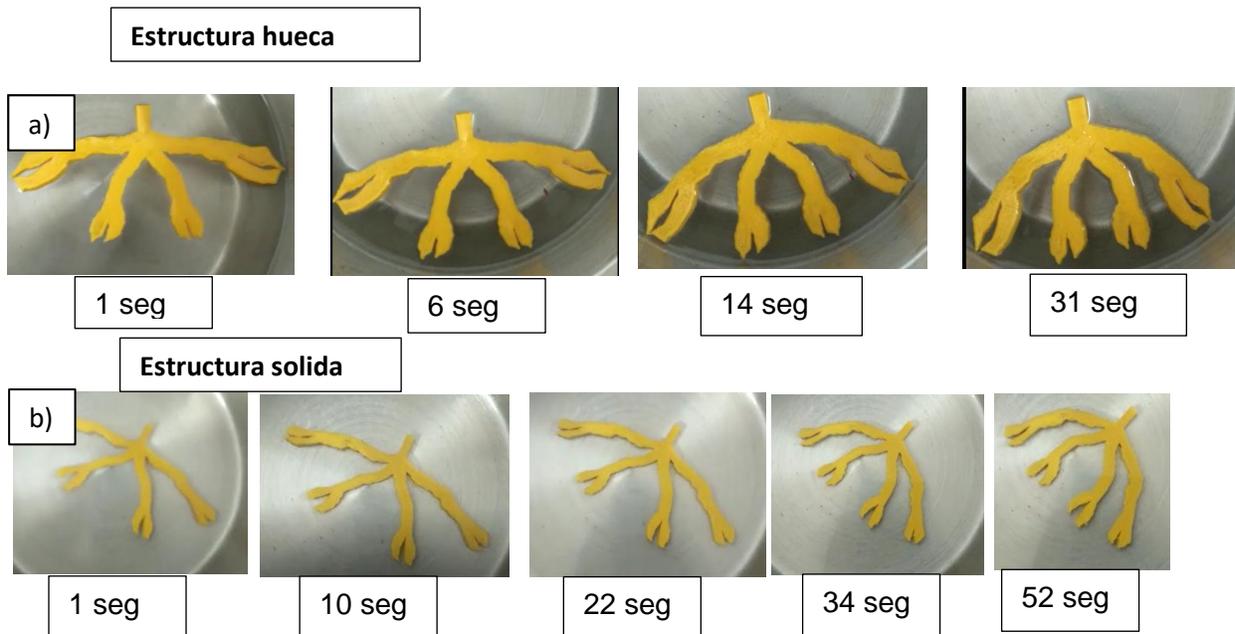


Figura 84. Efecto de recuperación por estímulo hidrotérmico en estructuras ramificadas. a) Recuperación de forma a los 31 seg para estructura hueca b) Recuperación de forma a los 52 seg para estructura sólida.

La recuperación de forma para las muestras constructales que se observa en las imágenes contempla la comparativa entre la muestra ramificada hueca y la muestra ramificada sólida ambos en un peso de 8.5 gramos aproximadamente. Se observa que el efecto de recuperación en las muestras huecas es mejor en cuestión de la comparativa de la muestra sólida respecto a la variable del tiempo.



*Figura 85. Formas ramificadas constructales originales
129 y 144 °*

Para medir el efecto de recuperación se contempló el ángulo o abertura deformada de la muestra tal y como se muestra en la imagen

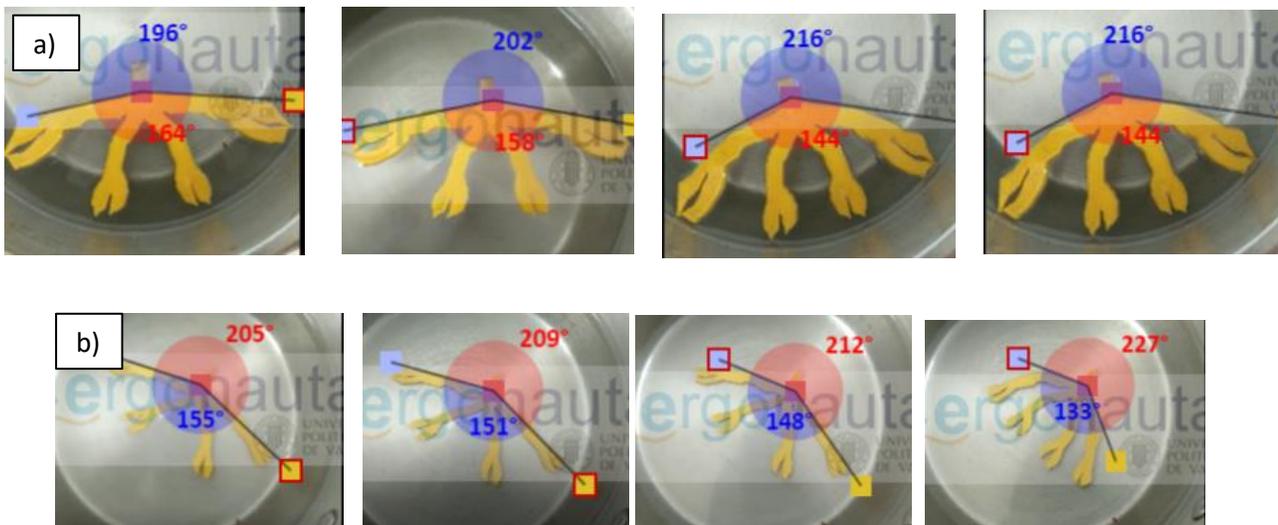


Figura 86. Angulo de recuperación para muestras constructales. a) estructura hueca b) estructura sólida

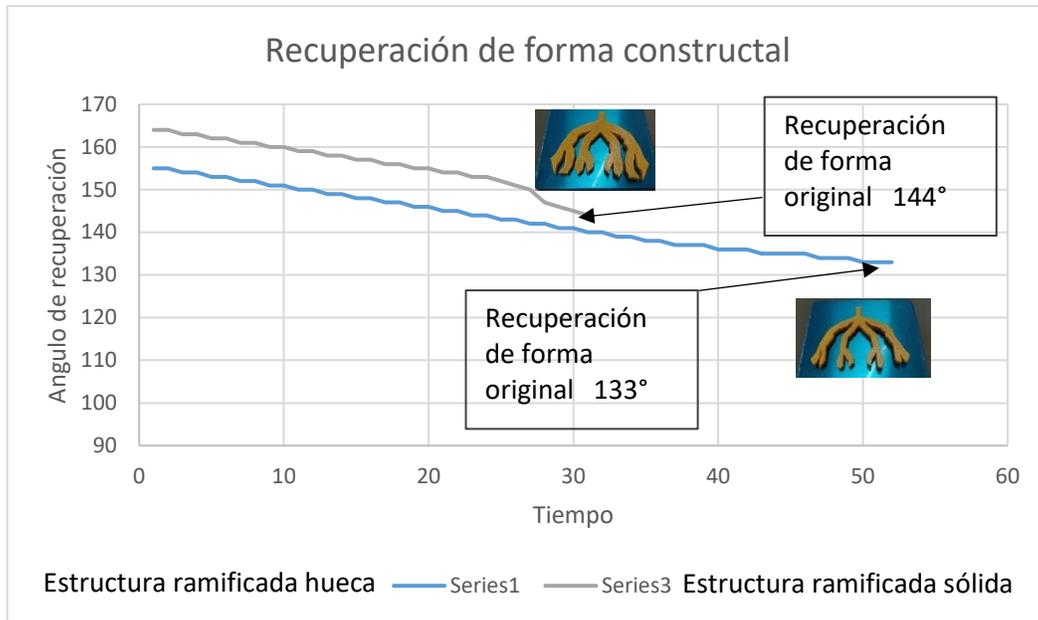


Figura 87. Comparativa de recuperación para muestras constructales. Las muestras huecas presentan una mejor recuperación (ángulo de 144°)

Las muestras constructales que se aprecian en el gráfico es posible apreciar el efecto de recuperación en virtud de su ángulo de deformación. Las muestras ramificadas huecas presentan una mejor recuperación del 100% en comparativa con las muestras constructales sólidas. Además, el tiempo de recuperación en las formas huecas se lleva a cabo en un menor tiempo (31 segundos) comparado con la muestra constructal sólida (52 segundos).

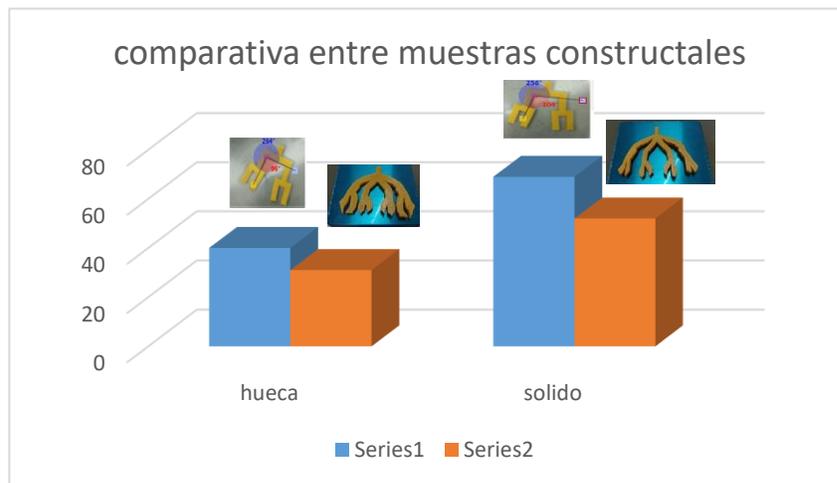


Figura 88. Comparativa de recuperación para muestras constructales, estructura hueca y sólida

En la figura 88 se hace una comparativa de recuperación entre las dos muestras desarrolladas y es posible observar como las estructuras huecas tienen una recuperación efectiva en un menor tiempo respecto a las estructuras sólidas.

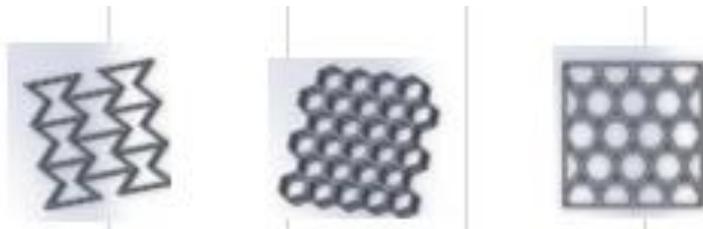
CONCLUSIONES

De las diferentes pruebas que se efectuaron al material polimérico de PLA/PHA, se resumen los siguientes aspectos:

- El polímero de PLA/PHA posee la característica de ser un material inteligente, esto debido a que presenta el efecto de memoria de forma (SME) ante un estímulo externo (aire caliente y agua caliente).
- La temperatura de transición vítrea o Tg es el factor clave para poder llevar a cabo las recuperaciones de las muestras una vez que ya se encuentran deformadas. Para el caso del PLA/PHA la Tg corresponde a los 55°C.
- A temperaturas inferiores a los 55°C, el material polimérico no presenta ningún efecto de recuperación.
- A temperaturas superiores a los 55°C, el material polimérico presenta mejor efecto de recuperación en lo que respecta a las velocidades pues estas aumentan. (velocidad promedio de recuperación).
- El estímulo hidrotérmico (agua caliente) determina una mejor recuperación de forma que el estímulo por medio de aire caliente. Esto en virtud del tiempo de recuperación.
- Las geometrías juegan un papel importante en el efecto de recuperación de forma.
- A medida que la cantidad de material aumenta en una estructura o geometría específica, las velocidades de recuperación se ven afectadas pues estas disminuyen.
- En el proceso de recuperación de forma de todas las estructuras propuestas, ninguna de las muestras tuvo una recuperación del 100%.
- Las geometrías auxéticas presentan un mejor comportamiento de recuperación (velocidad promedio de recuperación) que las geometrías de honeycomb y de kagome.
- Las ramificaciones o cavidades huecas en los materiales permiten un mejor flujo de energía térmica y por ende una mejor recuperación de forma.
- Las pruebas de caracterización DSC y DMA demuestran que la Tg para el filamento de PLA/PHA es la indicada por el proveedor.

En el marco de la impresión 4D, los materiales inteligentes y en específico los polímeros con memoria de forma o SMP resultan ser materiales con ventajas y aplicaciones en diversas áreas como lo es el sector aeronáutico, automotriz, alimenticio entre otros.

Si bien existen muchos aspectos y parámetros a estudiar así como muchas mejoras a desarrollar, los polímeros con memoria de forma pueden resultar bastante útiles por sus propiedades que poseen. En el caso del polímero de PLA/PHA es posible distinguir características de efecto de recuperación, es decir propiedades inteligentes. Esta propiedad puede ser de gran utilidad para el sector aeronáutico pues el material polimérico de PLA/PHA al presentar deformaciones puede recuperar su forma ante un estímulo hidrotérmico. Sin embargo, no solamente el material influye en este proceso pues las geometrías también juegan un papel importante ya que con ello se determina la velocidad de recuperación. La comparativa entre estructuras auxéticas, honeycomb y de kagome (Fig 88) demuestra un ejemplo claro de ello pues de acuerdo al análisis desarrollado se visualizó un efecto de recuperación (velocidad de recuperación) más efectivo en las muestras auxéticas. Esto de acuerdo a los datos obtenidos en las pruebas de regresión lineal para la obtención de la velocidad de recuperación.



[Figura 89. Muestras impresas.](#)

REFERENCIAS

- Kalia, S., & Avérous, L. (2011). *Biopolymers: Biomedical and Environmental Applications*. Wiley-Scrivener.
- Khanna, S., & Srivastava, A. (2008). A Simple Structured Mathematical Model for Biopolymer (PHB) production. *Biotechnology Progress*, 3, 830-838.
- Yoshida, Y., Dhandayuthapani, B., Maekawa, T., & Kumar, D. (2011). Polymeric Scaffolds in Tissue Engineering Application: A Review. *International Journal of Polymer Science*, 2011, 1-19.
- Bearzotti, L. (2018). Industria 4.0 y la Gestión de la Cadena de Suministro: el desafío de la nueva revolución industrial. *Gaceta Sansana*, 01-06.
- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55, 155-162. doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003
- Gardan, J. (2018). Smart materials in additive manufacturing: state of the art and trends. *Virtual and Physical Prototyping*, 14, 01-18. doi:https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1518016
- Garlotta, D. (2001). A Literature Review of Poly(Lactic Acid). *Journal of Polymers and the Environment*, 9, 63-84.
- Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., & Schuber, U. (2015). Shape memory polymers: Past, present and future developments. *Progress in Polymer Science*, 49-50, 03-33.
- Joshi, S., Krishna, R., C, K., Rajamohan, V., Tom Mathew, A., Koziol, K., . . . A.S.S, B. (2019). 4D printing of materials for the future: Opportunities and challenges. *Applied Materials Today*, 18, 01-22. doi:https://doi.org/10.1016/j.apmt.2019.100490
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., & Martin, N. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to. *Materials and Design*, 96, 106-114.
- Leist, S. K., Gao, D., Chiou, R., & Zhou, J. (2017). Investigating the shape memory properties of 4D printed polylactic acid (PLA) and the concept of 4D printing onto nylon fabrics for thecreation of smart textiles. *Virtual and Physical Prototyping*, 12, 290-300. doi:https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1341815
- Maestro, B., & Sanz, J. (2017). Polyhydroxyalkanoate-associated phasins as phylogenetically heterogeneous, multipurpose proteins. *Microbial Biotechnology*, 10, 1323-1337.
- Raviv, D., Tibbits, S., Zhao, W., Mcknelly, C., Papadopoulou, A., Kadambi, A., . . . Olgún, C. (2014). Active Printed Materials for Complex. *Scientific Reports*, 4, 01-08. doi:10.1038/srep07422
- Rayate, A., & K. Jain, P. (2018). A review on 4D printing material composites and their applications. *Material today: proceedings*, 5, 20474-20484. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.424
- Román, J. L. (2016). *Industria 4.0: la transformación digital de la industria*. Bilbao: codiinforme.
- Santo, L., Quadrini, F., Accettura, A., & Villadei, W. (2014). Shape memory composite for self deployable structures in aerospace applications. *Procedia Enginnering*, 88, 42-47.

- Shameli, K., Bin Ahmad, M., Wan Yunus, W., Azowa Ibrahim, N., Rahman, R., Jokar, M., & Darroudi, M. (2010). Silver/poly (lactic acid) nanocomposites: preparation, characterization, and antibacterial . *International Journal of Nanomedicine*, 5, 573-579.
- Wache, H., Tartakowska, D., Hentrich, A., & Wagner , M. (2003). Development of polymer stent with shape memory effect as a drug delivery system. *Journal of materials science: materials in medicine*, 14, 109-112. doi:10.1023/A:1022007510352

ANEXO A. Gráfico de estructuras auxéticas a 65 y 75°C

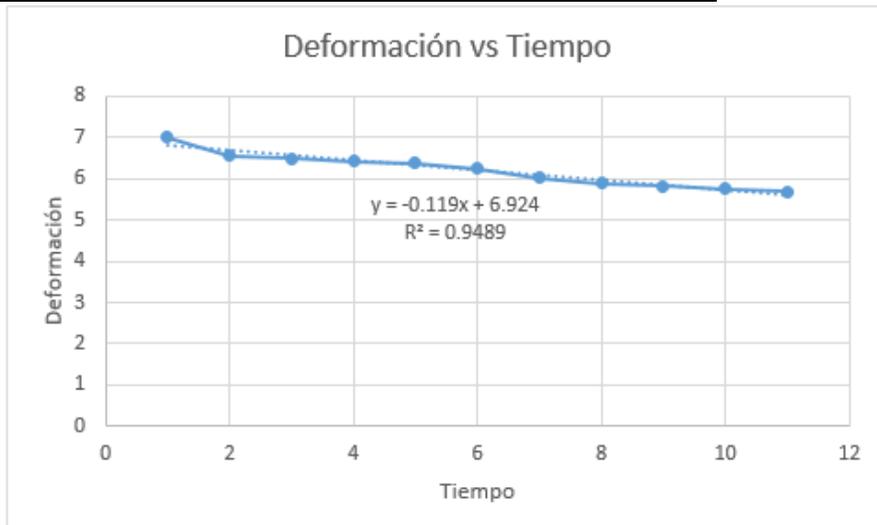


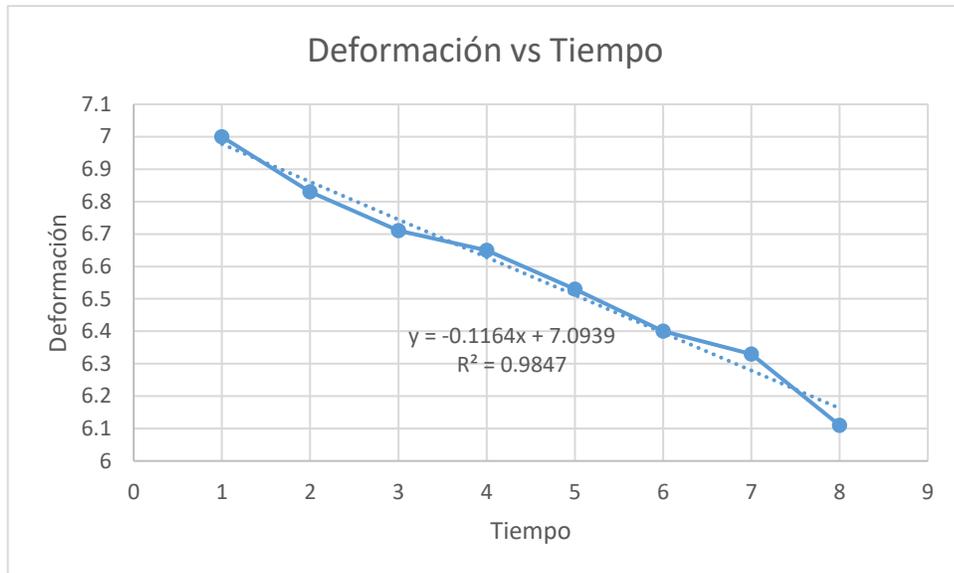
Figura 90. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 5mm de espesor a 65°C



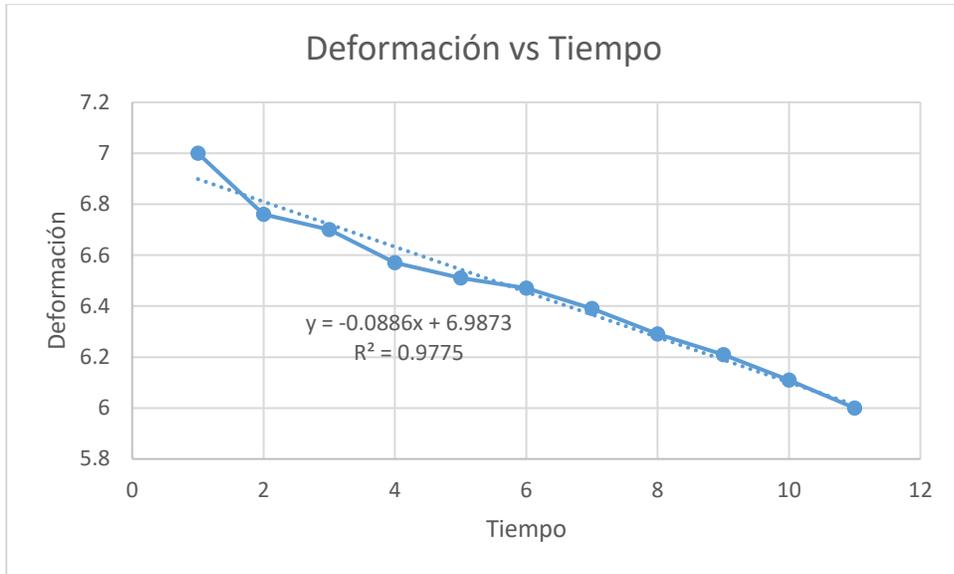
Figura 91. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 5mm de espesor a 75°C



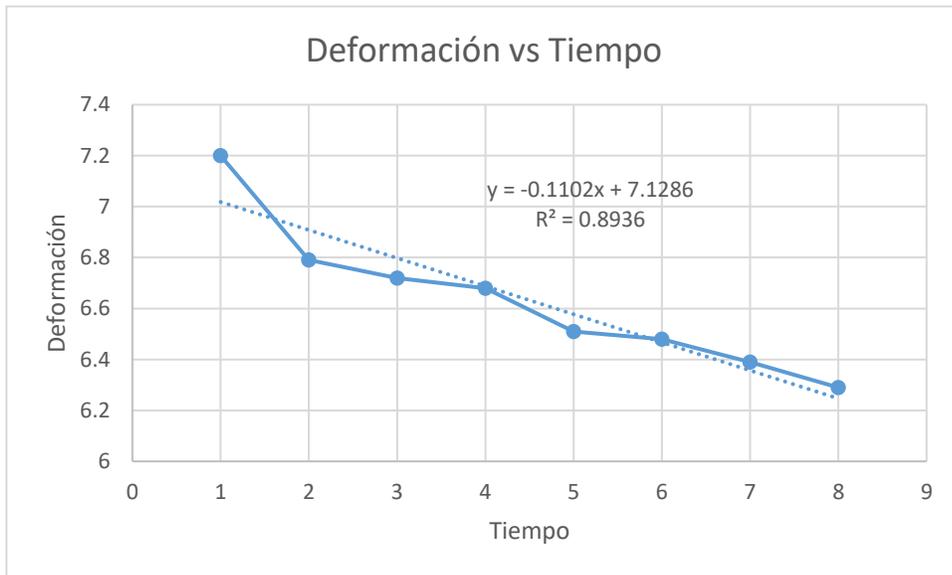
[Figura 93. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 7.5mm de espesor a 65°C](#)



[Figura 92. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 7.5mm de espesor a 75°C](#)



[Figura 94. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 10mm de espesor a 65°C](#)



[Figura 95. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura auxética de 10mm de espesor a 75°C](#)

ANEXO B. Gráfico de estructuras honeycomb a 65 y 75°C



Figura 96. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 5mm de espesor a 65°C

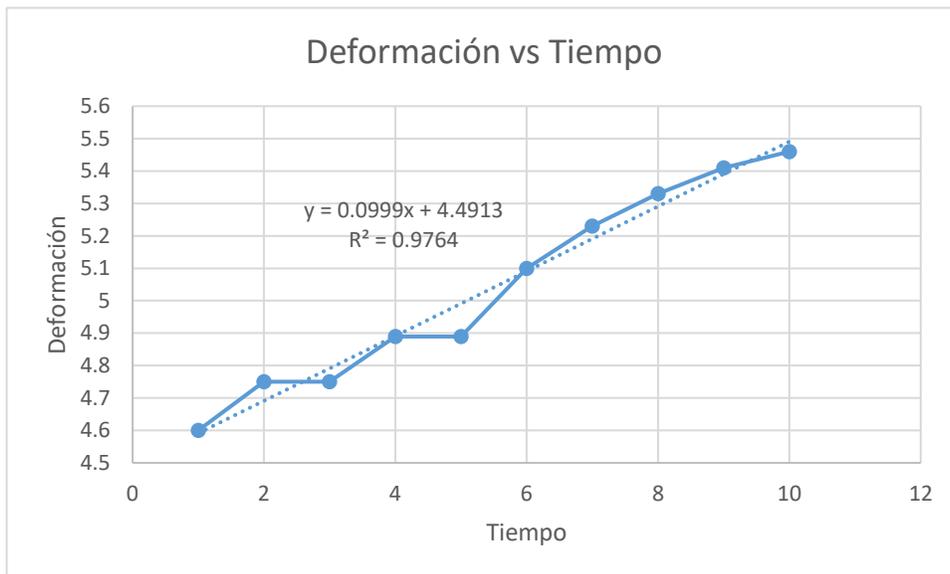
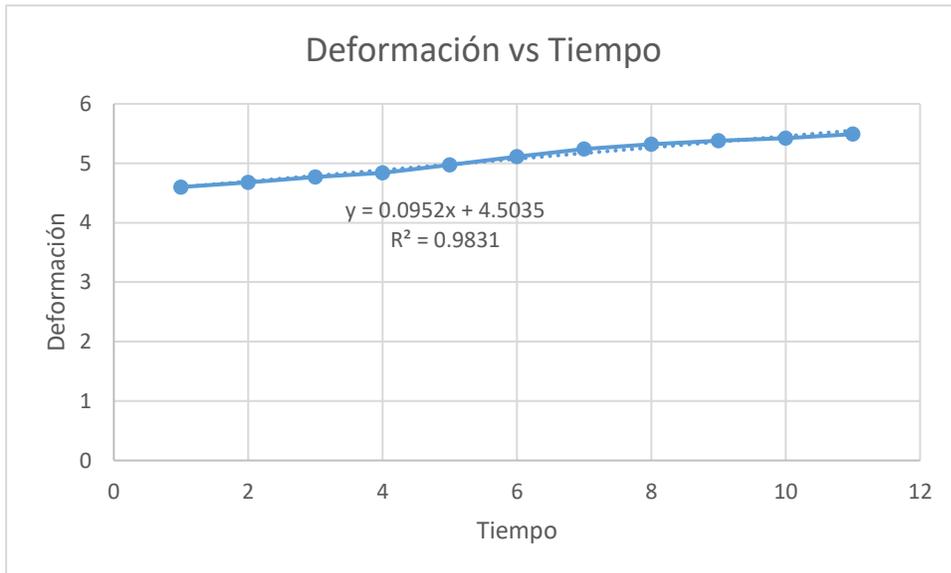


Figura 97. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 5mm de espesor a 75°C



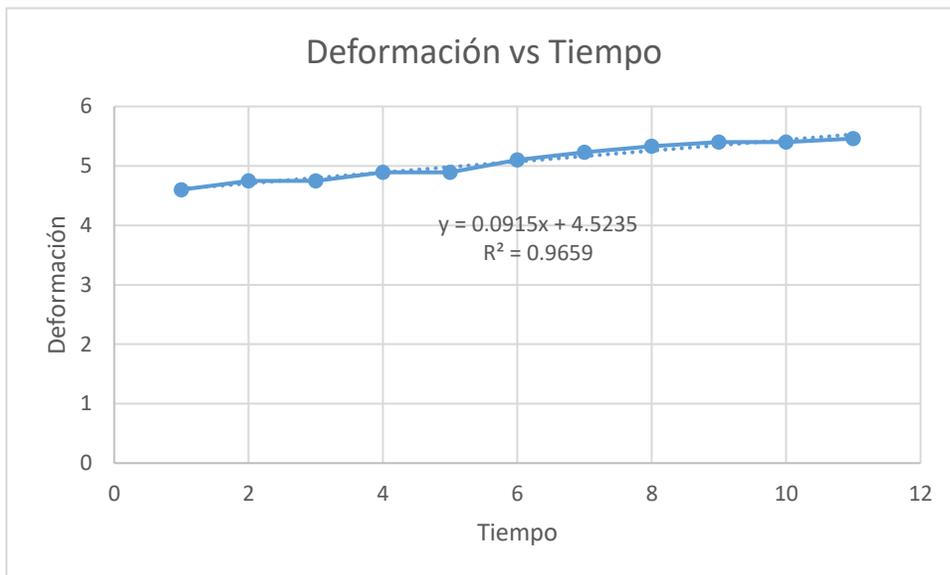
[Figura 98. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor a 65°C](#)



[Figura 99. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 7.5mm de espesor a 75°C](#)



[Figura 100. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 10mm de espesor a 65°C](#)



[Figura 101. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura honeycomb de 10mm de espesor a 75°C](#)

ANEXO C. Gráfico de estructuras de kagome a 65 y 75°C

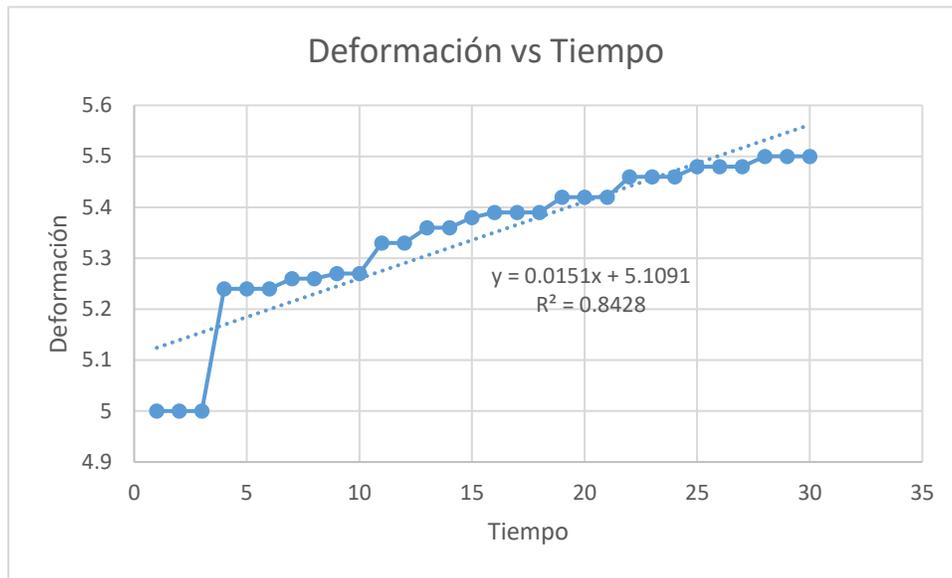


Figura 102. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 5mm de espesor a 65°C

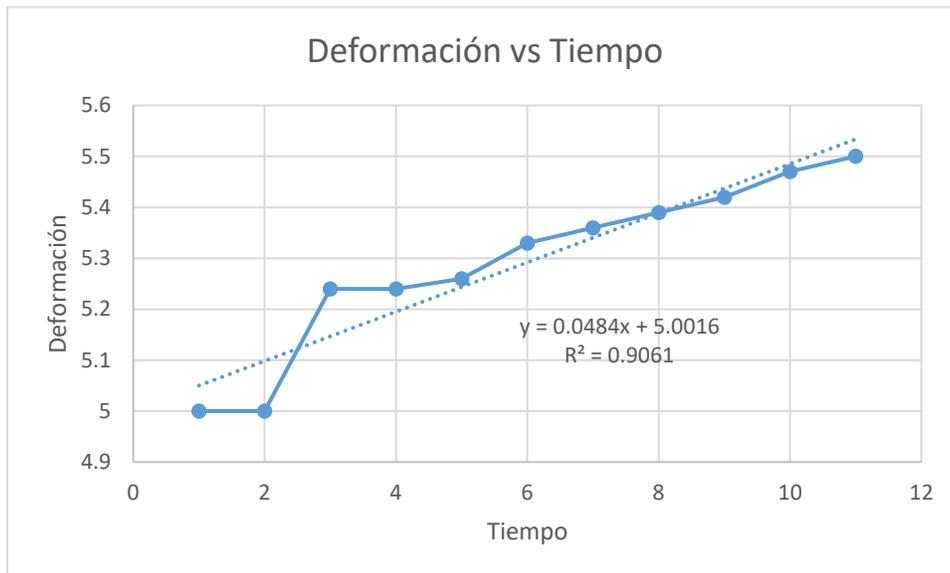


Figura 103. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 5mm de espesor a 75°C

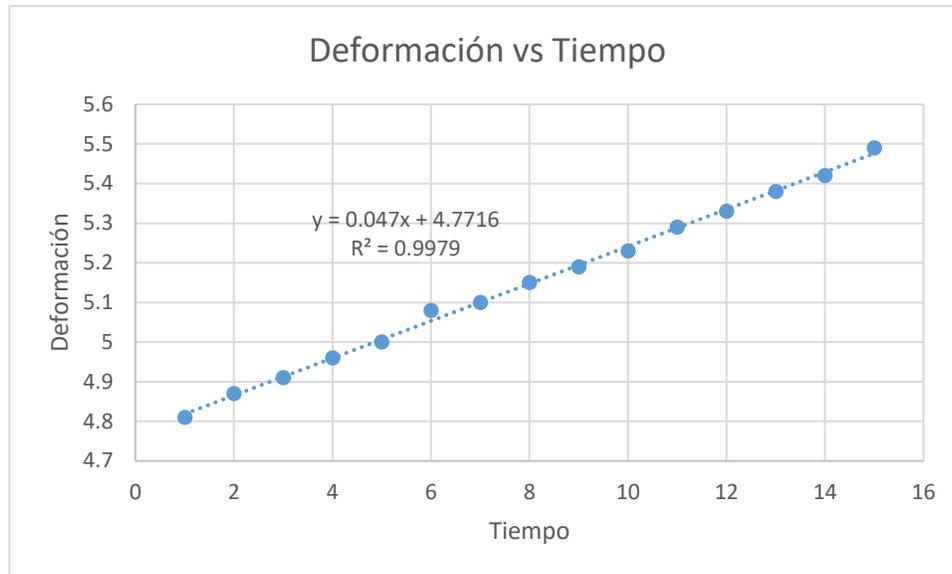


Figura 104. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 7.5mm de espesor a 65°C

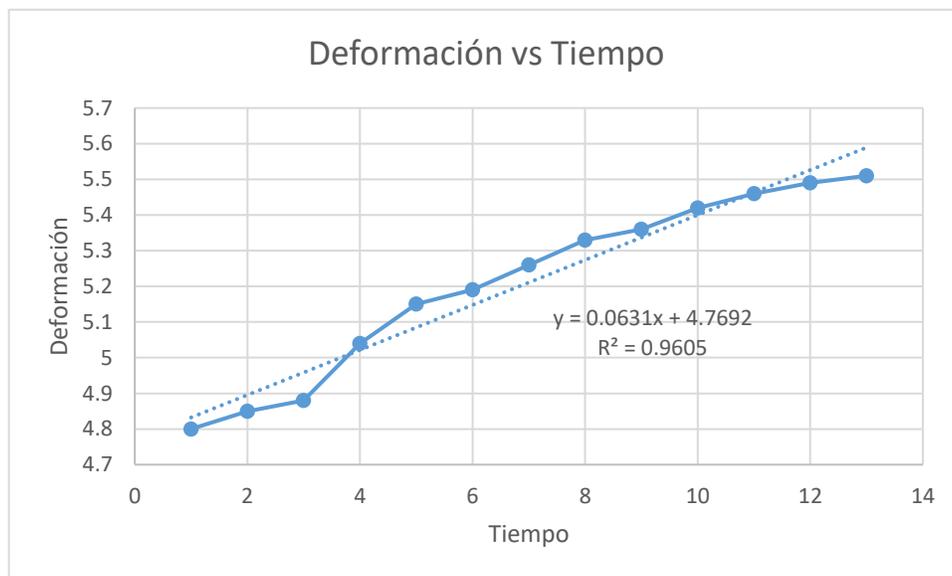


Figura 105. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 7.5mm de espesor a 75°C

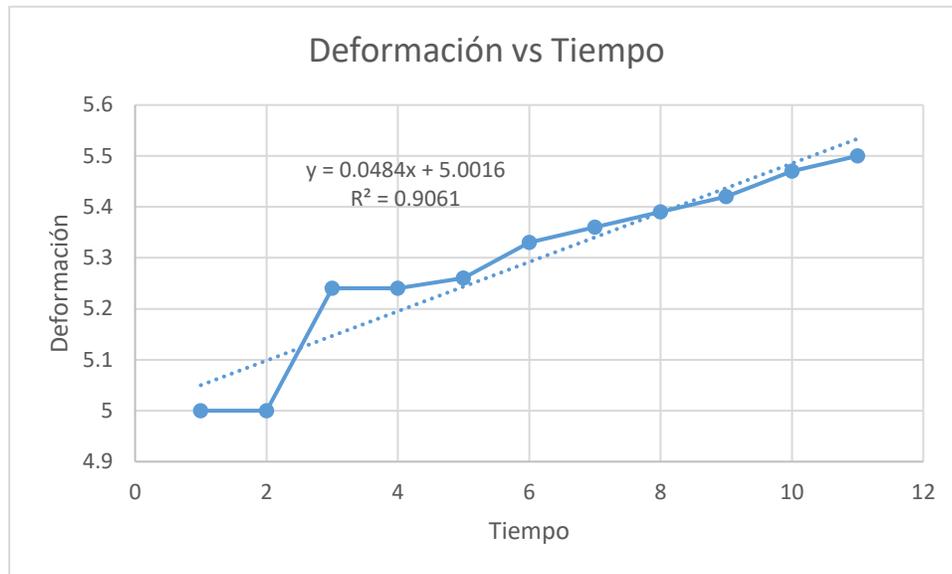


Figura 106. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 10mm de espesor a 65°C

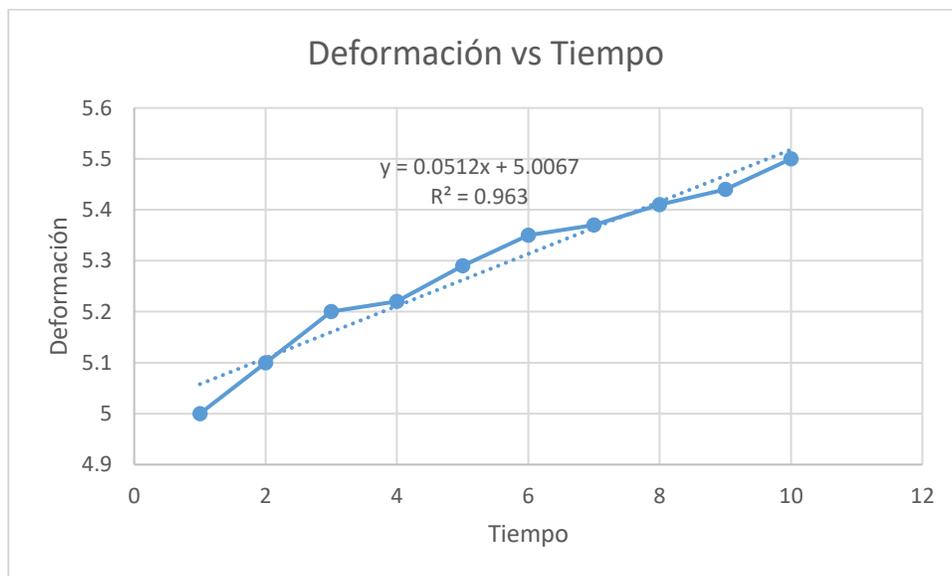


Figura 107. Gráfico Deformación vs Tiempo y ecuación de regresión lineal para estructura de kagome de 10mm de espesor a 75°C

ANEXO D. Prueba de recuperación para estructuras auxéticas a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

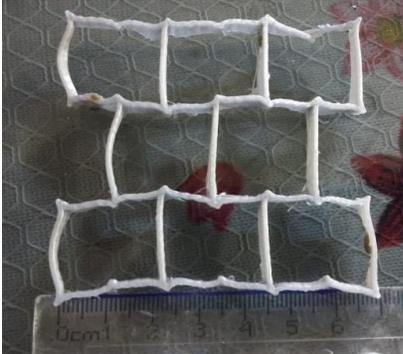
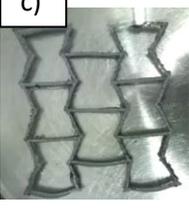
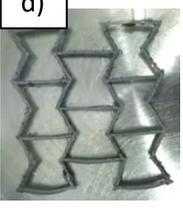
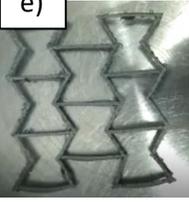
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN	
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7cm $D_{MAX} = 7cm$</p>	
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>9 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>17 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 17 segundos</p>	

Figura 108. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 17 segundos.

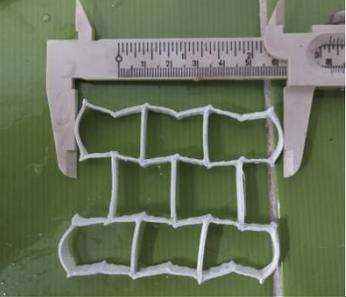
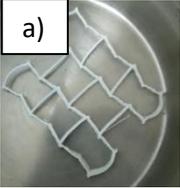
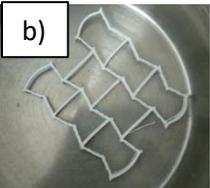
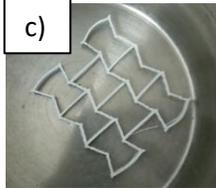
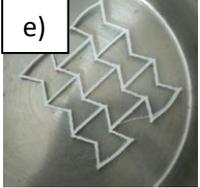
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 8cm $D_{MAX} = 8cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>9 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>21 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 21 segundos</p>

Figura 109. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 21 segundos.

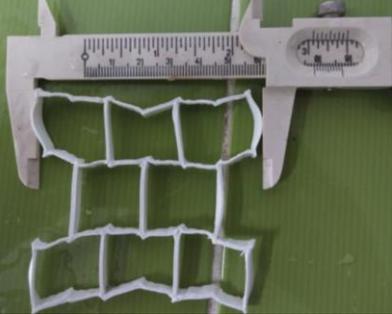
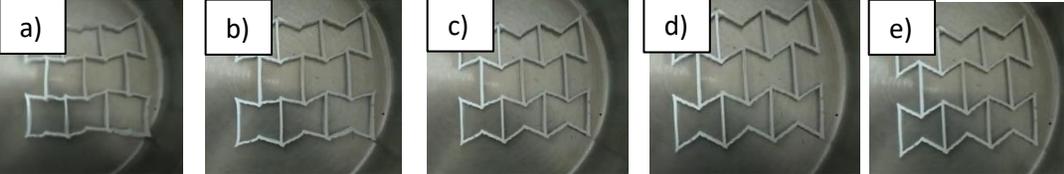
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.8cm $D_{MAX} = 7.8cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>1 seg 5 seg 9 seg 13 seg 18 seg</p> <p>Recuperación de forma 18 segundos</p>

Figura 110. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 18 segundos.

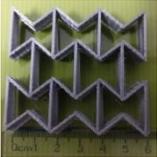
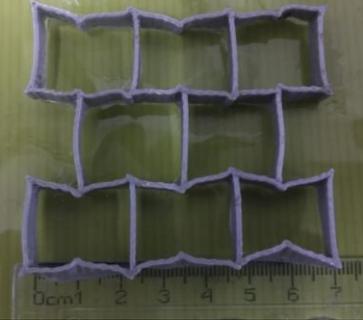
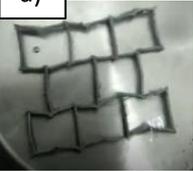
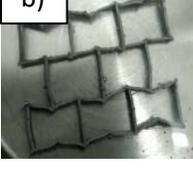
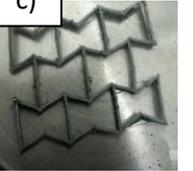
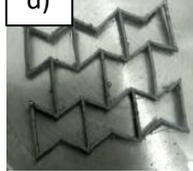
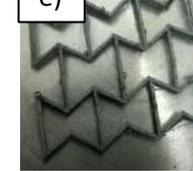
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7cm $D_{MAX} = 7cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>17 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>23 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 23 segundos</p>

Figura 111. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.

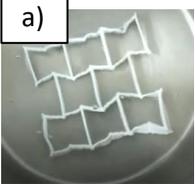
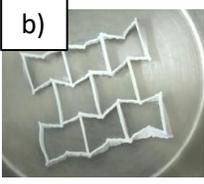
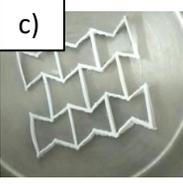
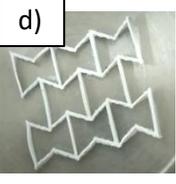
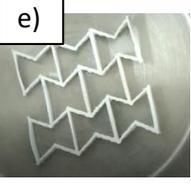
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.1cm $D_{MAX} = 7.1cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>17 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>20 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 20 segundos</p>

Figura 112. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.

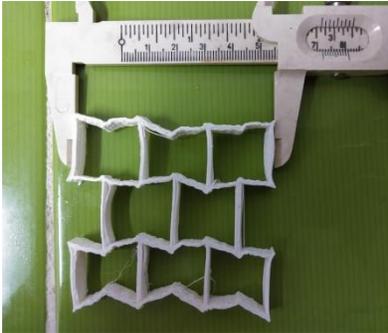
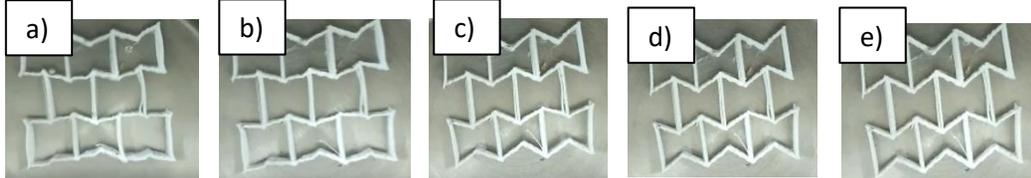
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.2cm $D_{MAX} = 7.2cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>a) 1 seg b) 5 seg c) 13 seg d) 17 seg e) 21 seg</p> <p>Recuperación de forma 21 segundos</p>

Figura 113. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 21 segundos.

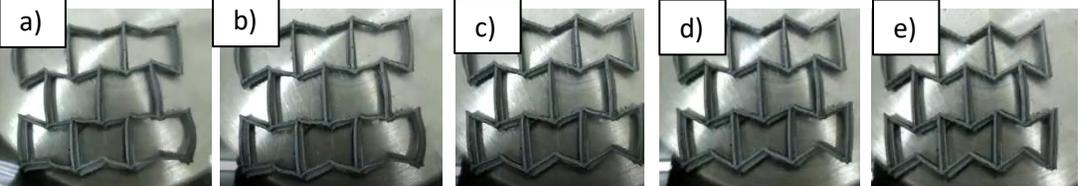
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7cm $D_{MAX} = 7cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>1 seg 5 seg 13 seg 17 seg 25 seg</p> <p>Recuperación de forma 25 segundos</p>

Figura 114. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 25 segundos.

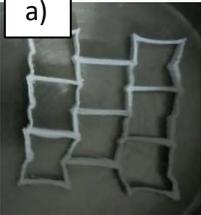
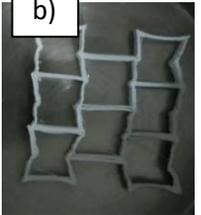
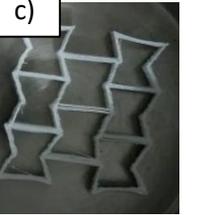
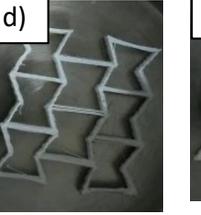
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.2cm D_{MAX} = 7.2cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 5 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 13 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 17 seg </div> <div style="text-align: center;">  e) 23 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 23 segundos</p>

Figura 115. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 23 segundos.

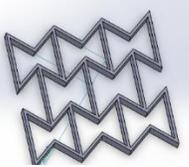
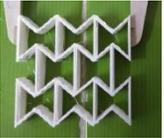
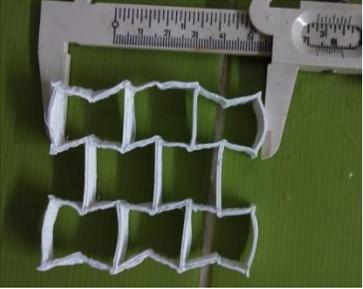
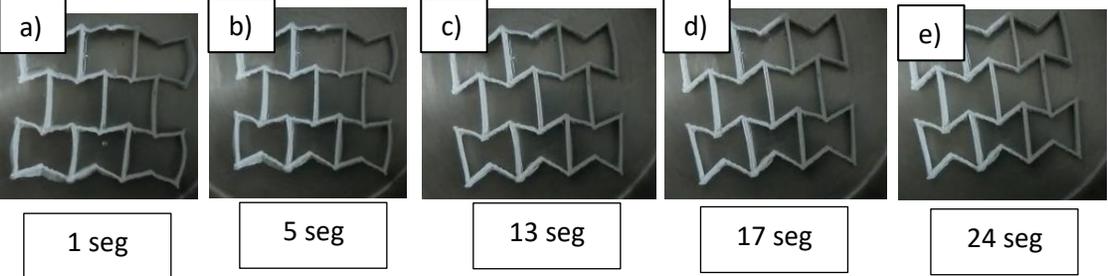
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.2cm $D_{MAX} = 7.4cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>Recuperación de forma 24 segundos</p>

Figura 116. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5, 13 y 17 segundos, e) recuperación de forma a los 24 segundos.

ANEXO E. Prueba de recuperación para estructuras honeycomb a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

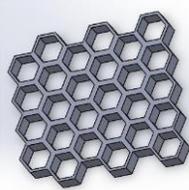
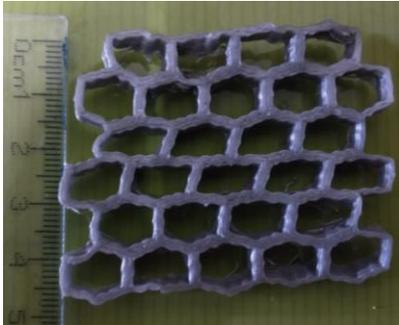
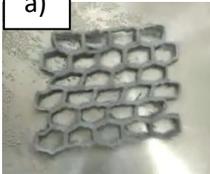
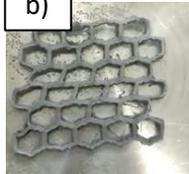
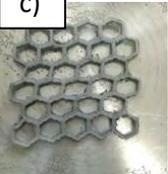
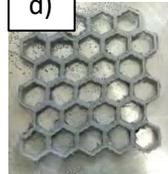
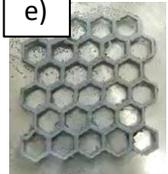
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 7 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 9 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 13 seg </div> <div style="text-align: center;">  e) 26 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 26 segundos</p>

Figura 117. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 26 segundos

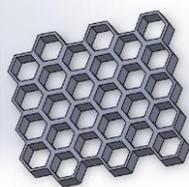
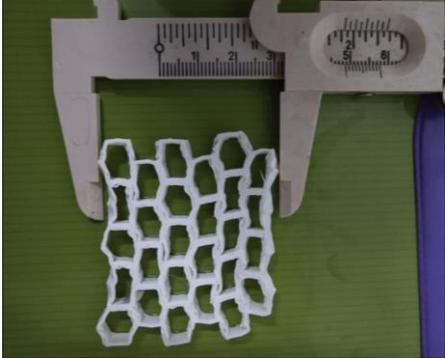
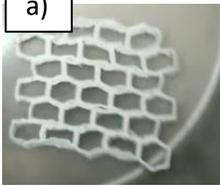
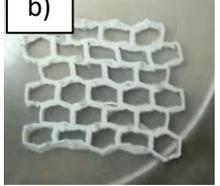
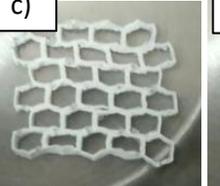
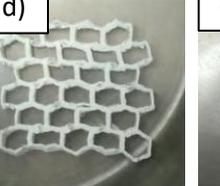
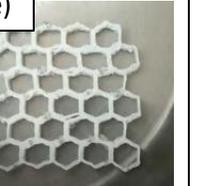
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.9 cm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">7 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">9 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">13 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">27 seg</div> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 27 segundos</p>

Figura 118. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 27 segundos

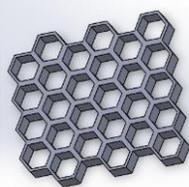
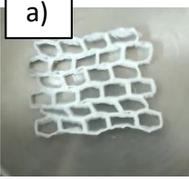
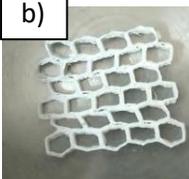
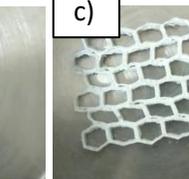
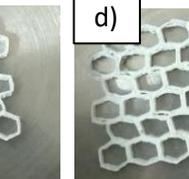
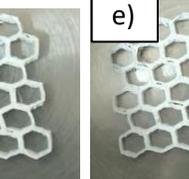
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.3 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  1 seg </div> <div style="text-align: center;">  7 seg </div> <div style="text-align: center;">  9 seg </div> <div style="text-align: center;">  13 seg </div> <div style="text-align: center;">  24 seg </div> </div> <p>Recuperación de forma 24 segundos</p>

Figura 119. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 9 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 24 segundos

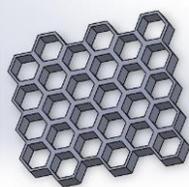
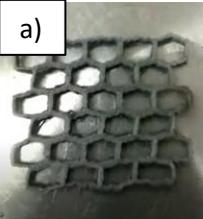
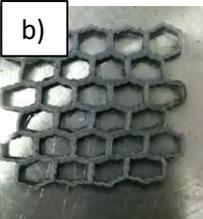
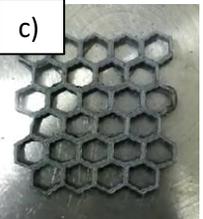
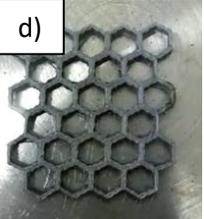
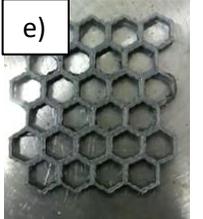
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 8 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 22 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 25 seg </div> <div style="text-align: center;">  e) 32 seg </div> </div> <p>Recuperación de forma 30 segundos</p>

Figura 120. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 22 y 25 segundos, e) recuperación de forma a los 32 segundos

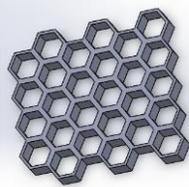
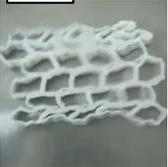
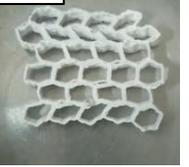
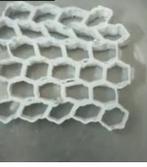
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 3.7 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>a)</p>  <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>b)</p>  <p>8 seg</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>c)</p>  <p>22 seg</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>d)</p>  <p>25 seg</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>e)</p>  <p>32 seg</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>f)</p>  <p>48 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 48 segundos</p>

Figura 121. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) e) proceso de recuperación a los 8, 22, 25 y 32 segundos, f) recuperación de forma a los 48 segundos

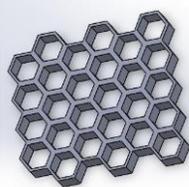
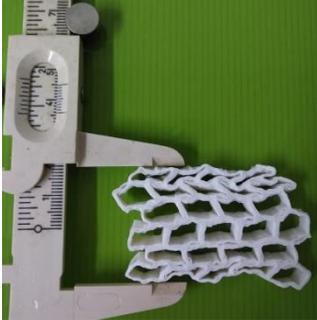
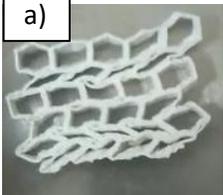
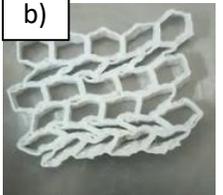
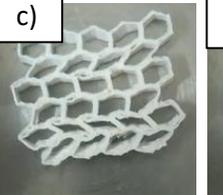
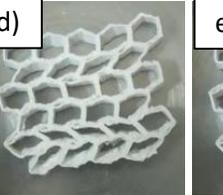
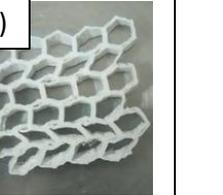
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 3.5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 8 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 22 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 25 seg </div> <div style="text-align: center;">  e) 32 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">La recuperación de forma no es efectiva.</p>

Figura 122. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 22 y 25 segundos, e) recuperación de forma a los 32 segundos

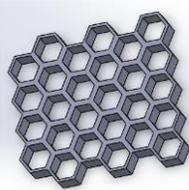
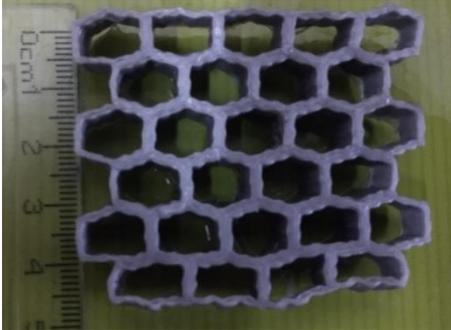
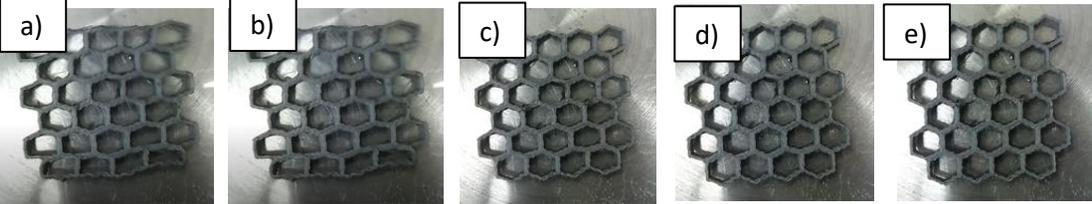
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>a) 1 seg b) 7 seg c) 20 seg d) 26 seg e) 35 seg</p> <p>Recuperación de forma 35 segundos</p>

Figura 123. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 35 segundos

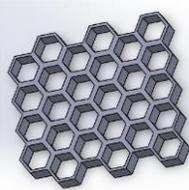
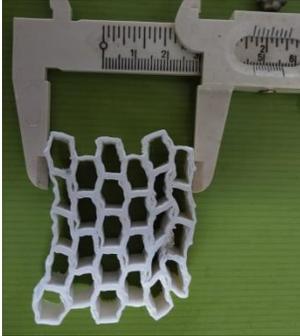
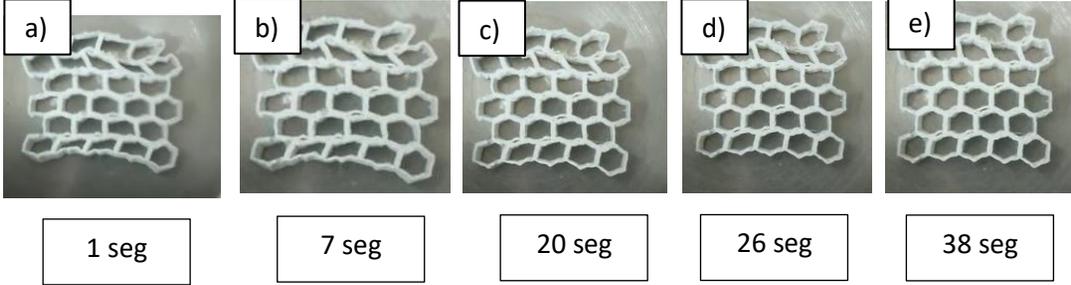
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>Recuperación de forma 38 segundos</p>

Figura 124. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 38 segundos

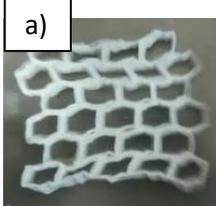
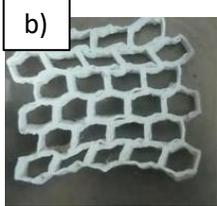
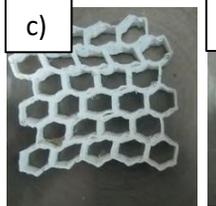
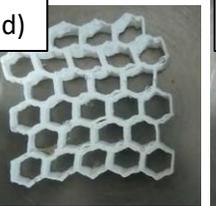
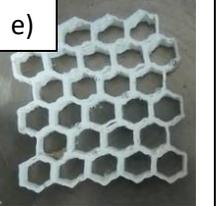
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>7 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>20 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>26 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>39 seg</p> </div> </div> <p>Recuperación de forma 39 segundos</p>

Figura 125. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 20 y 26 segundos, e) recuperación de forma a los 39 segundos

ANEXO F. Prueba de recuperación para estructuras de kagome a 55°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

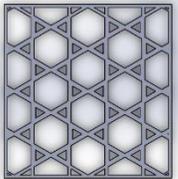
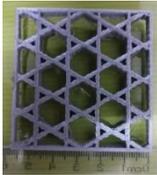
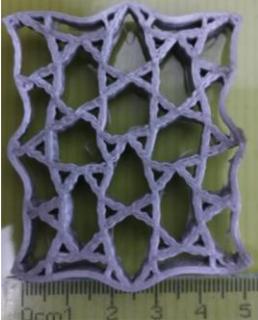
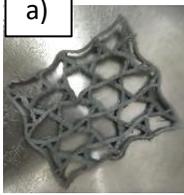
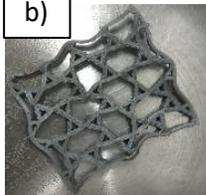
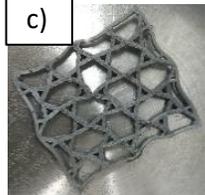
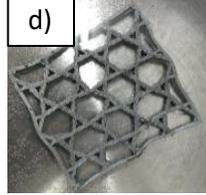
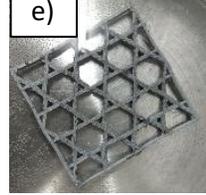
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50px; margin: 0 auto;">1 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50px; margin: 0 auto;">7 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50px; margin: 0 auto;">13 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50px; margin: 0 auto;">20 seg</div> </div> <div style="text-align: center;">  <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: 50px; margin: 0 auto;">36 seg</div> </div> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Recuperación de forma 36 segundos</p>

Figura 126. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 36 seg

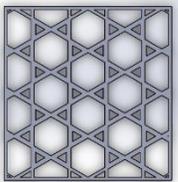
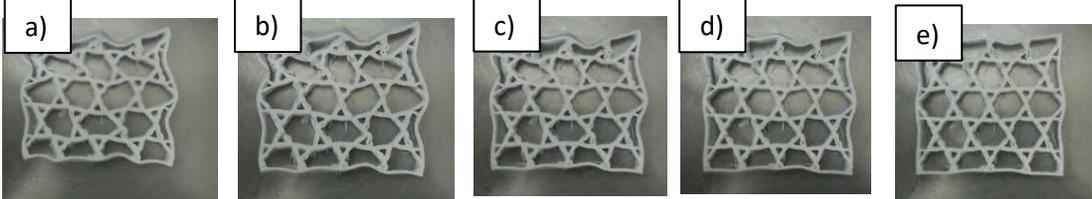
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.9 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>a) b) c) d) e)</p> <p>1 seg 7 seg 13 seg 20 seg 40 seg</p> <p>Recuperación de forma 40 segundos</p>

Figura 127. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 40 seg

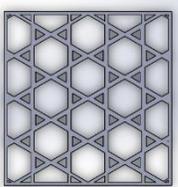
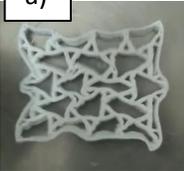
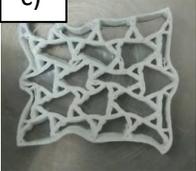
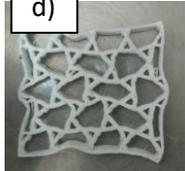
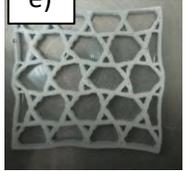
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.6 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>7 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>20 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>40 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 40 segundos</p>

Figura 128. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7, 13 y 20 segundos, e) recuperación de forma a los 40 seg

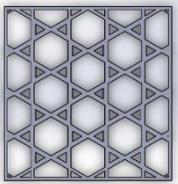
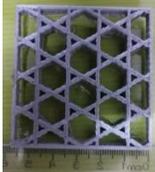
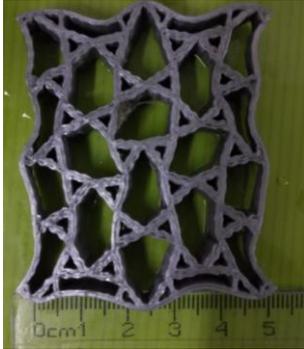
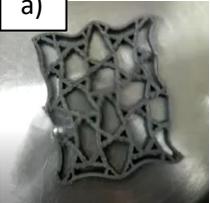
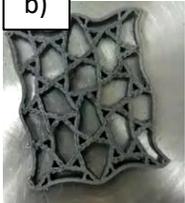
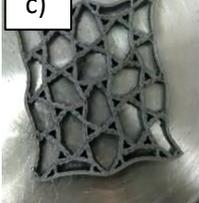
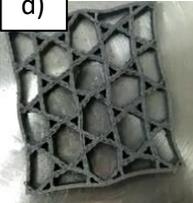
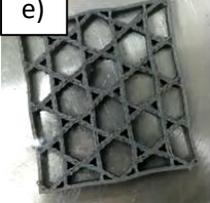
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>8 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>14 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>27 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>44 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 44 segundos</p>

Figura 129. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 44 seg

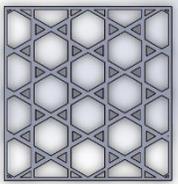
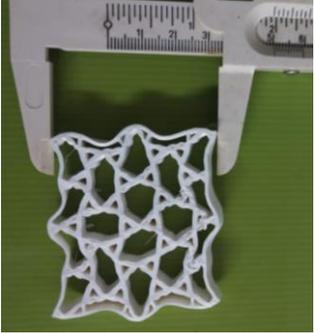
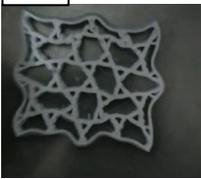
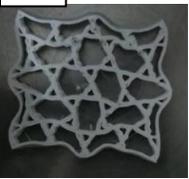
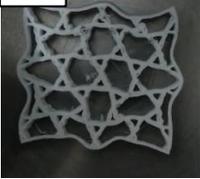
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>8 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>14 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>27 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>44 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 44 segundos</p>

Figura 130. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 44 seg

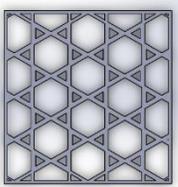
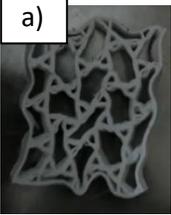
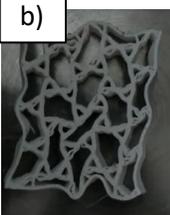
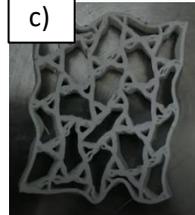
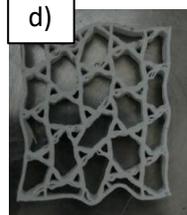
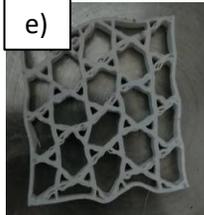
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.9 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>8 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>14 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>27 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>54 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 54 segundos</p>

Figura 131. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 54 seg

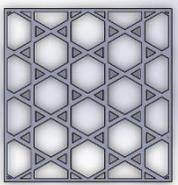
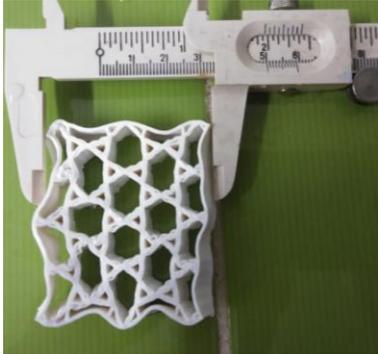
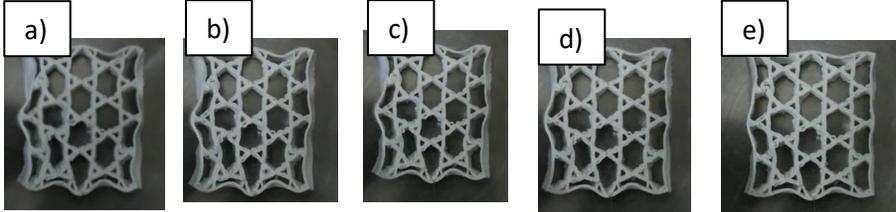
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>1 seg 8 seg 14 seg 27 seg 55 seg</p> <p>Recuperación de forma 47 segundos</p>

Figura 132. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 55 seg

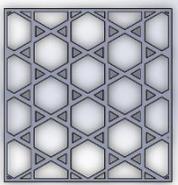
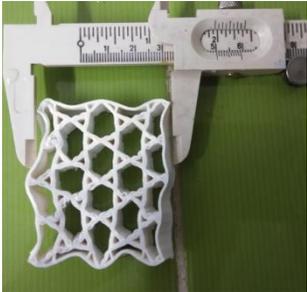
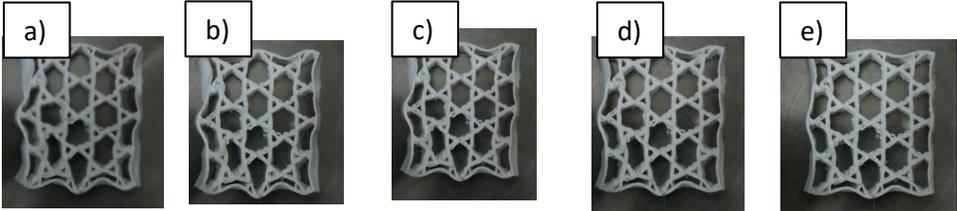
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>1 seg 8 seg 14 seg 27 seg 54 seg</p> <p>Recuperación de forma 54 segundos</p>

Figura 133. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 55°C para muestra kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 8, 14 y 27 segundos, e) recuperación de forma a los 54 seg

ANEXO G. Prueba de recuperación para estructuras auxéticas a 65°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

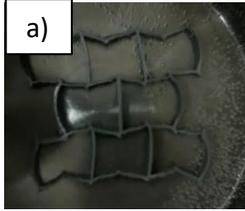
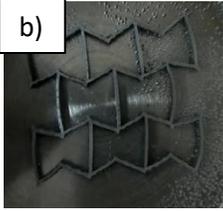
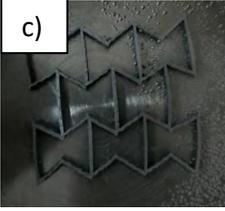
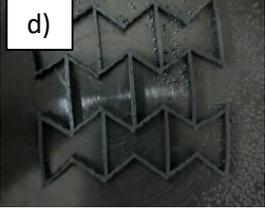
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.7cm $D_{MAX} = 7.7cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>4 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>7 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>11 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 11 segundos</p>

Figura 134. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra auxética de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 4 y 7 segundos, d) recuperación de forma a los 11 seg

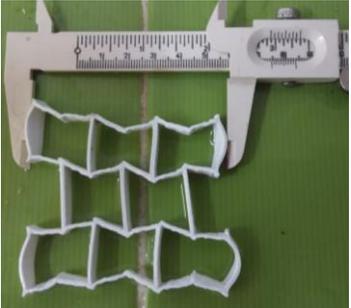
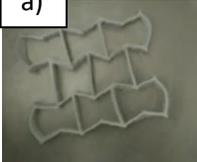
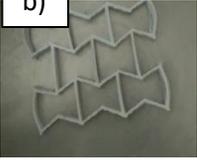
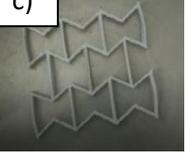
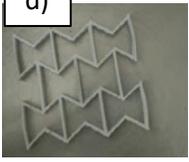
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.7cm $D_{MAX} = 7.7cm$</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 2 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 4 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 10 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 10 segundos</p>

Figura 135. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Auxética de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 2 y 4 segundos, d) recuperación de forma a los 10 segundos

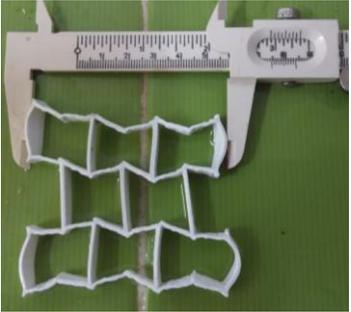
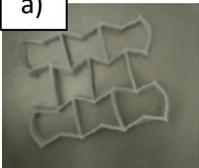
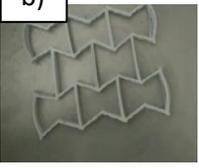
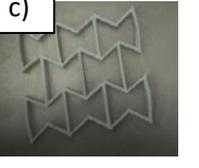
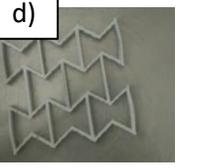
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO= 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud máxima de estiramiento = 7.4cm $D_{MAX} = 7.4cm$</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 2 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 5 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 11 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 11 segundos</p>

Figura 136. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Auxética de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c) proceso de recuperación a los 2 y 5 segundos, d) recuperación de forma a los 11 segundos

ANEXO H. Prueba de recuperación para estructuras auxéticas a 65°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

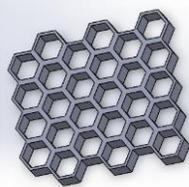
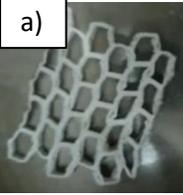
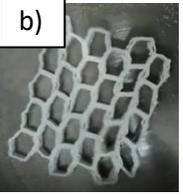
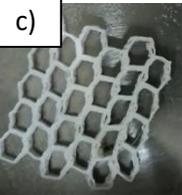
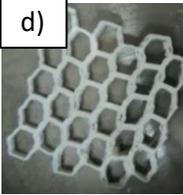
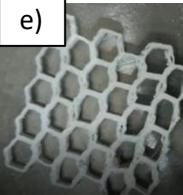
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.5 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  a) 1 seg </div> <div style="text-align: center;">  b) 4 seg </div> <div style="text-align: center;">  c) 7 seg </div> <div style="text-align: center;">  d) 13 seg </div> <div style="text-align: center;">  e) 16 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 16 segundos</p>

Figura 137. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 16 segundos

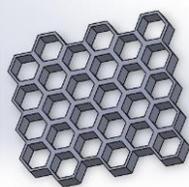
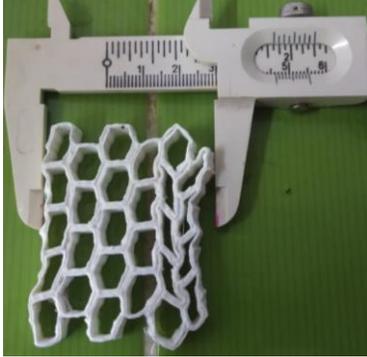
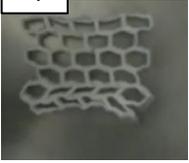
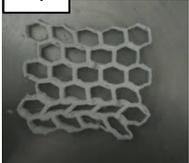
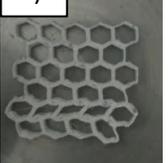
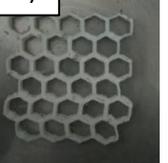
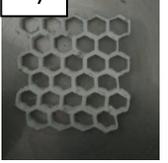
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.5 cm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  1 seg </div> <div style="text-align: center;">  4 seg </div> <div style="text-align: center;">  7 seg </div> <div style="text-align: center;">  13 seg </div> <div style="text-align: center;">  15 seg </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 15 segundos</p>

Figura 138. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 15 segundos

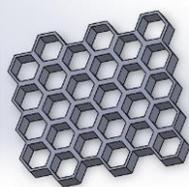
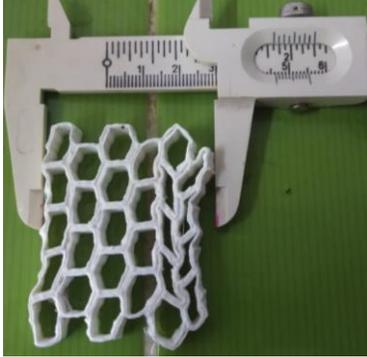
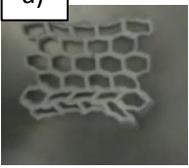
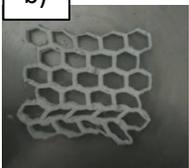
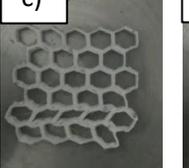
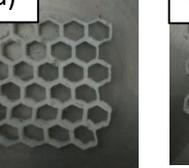
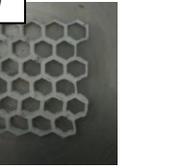
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p> <p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.1 cm</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  1 seg </div> <div style="text-align: center;">  4 seg </div> <div style="text-align: center;">  7 seg </div> <div style="text-align: center;">  13 seg </div> <div style="text-align: center;">  19 seg </div> </div> <p>Recuperación de forma 15 segundos</p>

Figura 139. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra Honeycomb de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c), d) proceso de recuperación a los 4, 7 y 13 segundos, e) recuperación de forma a los 19 segundos

ANEXO I. Prueba de recuperación para estructuras auxéticas a 65°C de espesores 5mm, 7,5mm y 10mm.

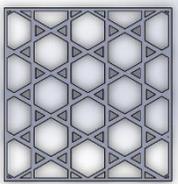
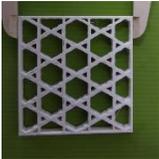
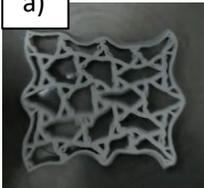
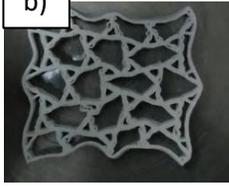
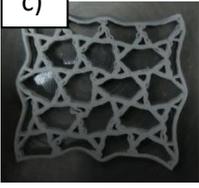
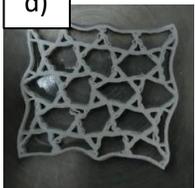
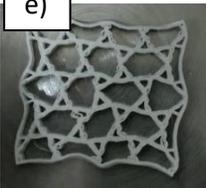
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.7 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>7 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>13 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>21 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>30 seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 32 segundos</p>

Figura 140. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 7,13 y 21 segundos, e) recuperación de forma a los 30 segundos

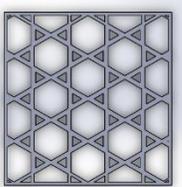
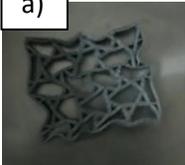
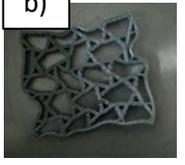
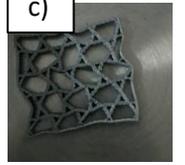
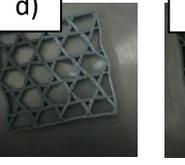
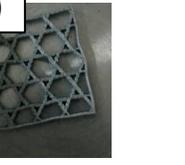
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 7.5mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.7 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>8 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>12 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>15seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 15 segundos</p>

Figura 141. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 7.5mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5,8 y 12 segundos, e) recuperación de forma a los 15 segundos

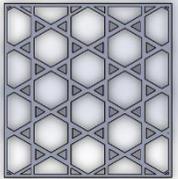
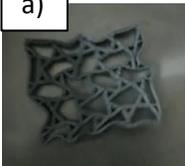
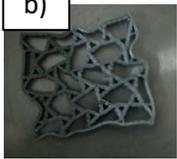
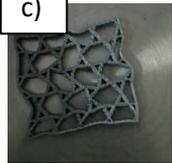
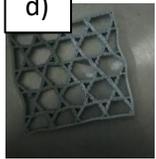
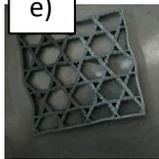
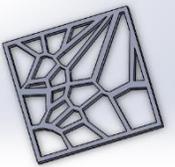
MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 10mm</p>		<p>Deformación por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 4.7 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 65°C</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>a)</p> <p>1 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b)</p> <p>5 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>c)</p> <p>7 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>d)</p> <p>9 seg</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>e)</p> <p>11seg</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">Recuperación de forma 11 segundos</p>

Figura 142. Recuperación de forma por estímulo hidrotérmico a 65°C para muestra de Kagome de 10mm de espesor. a) Forma temporal al exponerse al estímulo hidrotérmico, b),c),d) proceso de recuperación a los 5,7 y 9 segundos, e) recuperación de forma a los 11 segundos

MODELO CAD SOLIDWORKS	MUESTRA IMPRESA FORMA ORIGINAL	CONDICIÓN DE ENTORNO	DEFORMACIÓN
 <p>LARGO =5.7cm ANCHO = 5.5cm ALTO= 5mm</p>		<p>Deformacion por inmersión térmica.</p>	 <p>Longitud a compresión = 3.7 cm</p>
		<p>Recuperación de forma por inmersión térmica 55°C</p>	 <p>1 seg 5 seg 14 seg 23 seg 32 seg</p> <p>Recuperación de forma 32 segundos</p>

ISMAEL MOSCOSO PARTE 2

TESIS ISMAEL MOSCOSO PEREZ -2.docx

Resumen de fuentes

8%

SIMILITUD GENERAL

1	www.solarpedi INTERN	2%
2	Universidad Continental on TRABAJO	1%
3	Esumer Institucion Universitaria on TRABAJO	1%
4	www.fzalindosoria. INTERN	< %
5	docplayer. INTERN	< %
6	es.wikipedia. INTERN	< %
7	Universidad Politécnica de Madrid on 2018-07-22 TRABAJO	< %

Se excluyeron los depósitos de búsqueda:

- Ninguno

Excluido del Informe de Similitud:

- Ninguno

Se excluyeron las fuentes:

- Ninguno