



**Estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de
forma**

Gordón Rosero, Freddy Alexis

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio, PhD

25 de agosto de 2023



Gordon_Freddy_Antiplagio.docx

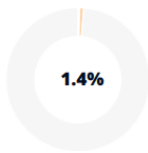
Scan details

Scan time:
August 25th, 2023 at 16:55 UTC

Total Pages:
77

Total Words:
19037

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	0.4%	72
● Minor Changes	0%	0
● Paraphrased	1%	186
● Omitted Words	0%	0

AI Content Detection



Text coverage
● AI text
● Human text



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de forma”** fue realizado por el señor **Gordón Rosero, Freddy Alexis**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio, PhD

C.C. 0603247362



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Gordón Rosero, Freddy Alexis**, con cédula de ciudadanía n°1723600019, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de forma** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

Gordón Rosero, Freddy Alexis

C.C. 1723600019



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo, **Gordón Rosero, Freddy Alexis**, con cédula de ciudadanía n°1723600019, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de forma** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto de 2023

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Freddy Alexis Gordón Rosero', is positioned above a horizontal dotted line.

Gordón Rosero, Freddy Alexis

C.C. 1723600019

Dedicatoria

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

Por el apoyo y amor incondicional, por su sacrificio diario para poder completar esta etapa importante de mi vida y por los valores que han sembrado en mí. Gracias a mis padres, Janina y Freddy.

A mis hermanos, por ser parte de este camino y recordarme que el apoyo y amor es indispensable en toda meta y logro que cada uno alcancemos. Gracias Mafe y Fernando.

A quien es como mi segunda madre. Por sembrar en mí una buena persona y darme todo lo que necesite. Gracias tía Gloria.

Por demostrarme que el apoyo se encuentra también en personas ajenas a nuestra familia, por tu ayuda en cada momento de fragilidad, por tu lealtad y amor incondicional. Gracias Daya.

Al Ingeniero Hernán Lara, por su dedicación, tiempo y profesionalismo. Por su ayuda en todo lo que he necesitado para desarrollar este trabajo. Por su incentivo a realizar siempre proyectos de calidad. Gracias totales.

A mis compañeros y amigos con quienes he compartido este camino de formación profesional. Por brindarme su apoyo en cada momento tanto académico como personal. Por los momentos de estudio y diversión.

Finalmente, al ser vivo más leal que me ha acompañado en cada uno de mis desvelos, que con su inocencia y amor me ayudó a tener un motivo más por el cual superarme y seguir adelante. Gracias a mi mascota, July.

Índice de Contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Índice de Contenidos	8
Índice de Tablas	13
Índice de Figuras	14
Resumen	19
Abstract	20
Capítulo I	21
Introducción	21
Antecedentes	21
Justificación e importancia	23
Alcance del proyecto	24
Objetivos	26
Objetivo General.....	26
Objetivos Específicos	26
Capítulo II	27
Revisión de Literatura.....	27
Manufactura Aditiva	27
Estructuras tipo Celosías o lattices.....	27

Robótica blanda	31
Ventajas	31
Aplicaciones	32
Ejemplo de proyectos con robótica blanda	32
Impresión 3D (Estereolitografía)	34
Resina para impresión 3D	34
Importancia de la caracterización de resina.....	35
Orientaciones de impresión	36
Proceso de poscurado.....	37
Materiales con memoria de forma	37
Nitinol.....	38
Introducción	38
Temperatura de transformación	39
Estructura austenita.....	39
Estructura martensita	40
Curva de temperaturas de transformación.....	40
Obtención de la curva de temperaturas de transformación	41
Memoria de forma de 1 camino	44
Entrenamiento del Nitinol para memoria de forma de 1 camino	45
Memoria de forma de 2 caminos	45
Entrenamiento del Nitinol para memoria de forma de 2 caminos.....	46

	10
Capítulo III	48
Metodología.....	48
Selección y Caracterización de resina	49
Selección.....	49
Caracterización.....	50
Diseño y fabricación de probetas.....	51
Ensayo de tracción	52
Caracterización del alambre de Nitinol.....	53
Característica eléctrica	53
Característica física	59
Característica térmica.....	63
Diseño de plataforma de productos para aplicaciones de impresión 3D con actuación de aleaciones con memoria de forma	66
Tabla de diseño.....	66
Diseño experimental	70
Especificación de la meta	70
Factores y niveles.....	70
Método del diseño experimental.....	72
Diseño y fabricación del componente para impresión 3D.....	72
Diseño de estructuras porosas tipo celosías	73
Diseño CAD del componente y fabricación en 3D	76
Entrenamiento del alambre de Nitinol	78

	11
Entrenamiento de memoria de forma de 1 camino	79
Entrenamiento de memoria de forma de doble camino	83
Integración de componentes y método de actuación y evaluación.....	85
Integración del alambre de Nitinol	86
Método de actuación y evaluación.....	87
Método de Validación.....	89
Materiales y equipos.....	89
Capítulo IV.....	91
Análisis y discusión de resultados	91
Resultados caracterización de resina Elastic 50A Formlabs	91
Esfuerzo de tracción último	91
Porcentaje de Elongación.....	92
Resultados caracterización del alambre de Nitinol.....	93
Resultado de la característica eléctrica	93
Resultados de la característica física	98
Resultados de la característica térmica	101
Resultado del entrenamiento del alambre de Nitinol	104
Resultado entrenamiento de memoria de forma de 1 camino.....	104
Resultado entrenamiento de memoria de forma de doble camino.....	107
Resultado de la integración de componentes.....	109
Resultado del diámetro del agujero	109

Resultado de la impresión del componente 3D 110

Resultado de pruebas de funcionamiento 115

Resultados del diseño experimental..... 116

Resultados del Ángulo de inclinación 116

Resultados del Tiempo 118

Resultados para el Tipo de Celosía 119

Diseño y fabricación de un componente con celosía Gyroid 121

Validación 123

Diseño y fabricación del prototipo final 123

Resultados de Ángulo de inclinación y Tiempo 124

Resultados de Fuerza 126

Capítulo V 130

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro 130

Conclusiones 130

Recomendaciones 131

Trabajo futuro..... 131

Bibliografía..... 132

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Tabla de diseño – Celosía Hexagonal.</i>	67
Tabla 2 <i>Valores m, n y p para cada tipo de celosía.</i>	69
Tabla 3 <i>Factores y niveles para el diseño experimental.</i>	71
Tabla 4 <i>Valores para Temperatura Media y Máxima de las 3 pruebas.</i>	98
Tabla 5 <i>Resultado para la Fuerza de las 5 pruebas.</i>	101
Tabla 6 <i>Valores para As y Af del alambre de Nitinol.</i>	103
Tabla 7 <i>Valores para As y Af del alambre de Nitinol entrenado y no entrenado.</i>	105
Tabla 8 <i>Relaciones Señal/Ruido para el Ángulo de inclinación.</i>	116
Tabla 9 <i>Relaciones Señal/Ruido para el Tiempo.</i>	118
Tabla 10 <i>Resultado para el Ángulo de inclinación alcanzado de las 4 celosías propuestas.</i>	122
Tabla 11 <i>Resultado para el Tiempo de las 4 celosías propuestas.</i>	123
Tabla 12 <i>Resultado para el Ángulo de inclinación alcanzado y Tiempo del Prototipo final.</i>	126
Tabla 13 <i>Resultado para la Fuerza de las 5 pruebas del Prototipo final.</i>	128

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Aplicación de robótica blanda en una prótesis de mano.</i>	21
Figura 2 <i>Prótesis de un dedo impreso en 3D con cables de SMA.</i>	22
Figura 3 <i>Diagrama propuesto para el desarrollo y alcance del proyecto.</i>	24
Figura 4 <i>Componente mecánico obtenido por manufactura aditiva.</i>	27
Figura 5 <i>Optimización de material con estructuras tipo celosías.</i>	28
Figura 6 <i>Estructura 3D con celosía plana de patrón Triangular.</i>	29
Figura 7 <i>Estructura 3D con celosías basadas en puntales.</i>	30
Figura 8 <i>Estructuras 3D con celosías TPMS.</i>	31
Figura 9 <i>Robot Octobot.</i>	32
Figura 10 <i>Micro robot Caterpillar.</i>	33
Figura 11 <i>Exo-Glove Poly.</i>	33
Figura 12 <i>Impresión 3D por estereolitografía.</i>	34
Figura 13 <i>Orientación de los ejes de la plataforma de impresión.</i>	36
Figura 14 <i>Ejemplo de orientaciones de impresión.</i>	36
Figura 15 <i>Concepto de memoria de forma.</i>	38
Figura 16 <i>Estructuras o fases de transformación del Nitinol.</i>	39
Figura 17 <i>Curvas de temperaturas de transformación del Nitinol.</i>	40
Figura 18 <i>Longitud del material vs temperatura en un ensayo de carga constante.</i>	42
Figura 19 <i>Curva DSC típica para alambres de Nitinol.</i>	43
Figura 20 <i>Curva Af activo típica para alambres de Nitinol.</i>	44
Figura 21 <i>Efecto de Memoria de forma simple o de 1 camino.</i>	45
Figura 22 <i>Efecto de Doble Memoria de forma o de 2 caminos.</i>	46
Figura 23 <i>Diagrama de flujo que engloba la metodología del trabajo.</i>	48

Figura 24 <i>Comparación de características entre resina Elastic 50A y Flexible 80A.</i>	49
Figura 25 <i>Diagrama de flujo para el proceso de Caracterización de resina Elastic 50A.</i>	50
Figura 26 <i>Medidas de la probeta propuestas por la norma ASTM D1708.</i>	51
Figura 27 <i>Diagrama de flujo para el proceso de Caracterización del alambre de Nitinol.</i>	53
Figura 28 <i>Diagrama del circuito AC.</i>	54
Figura 29 <i>Diagrama del circuito DC-1 para la solución 1.</i>	56
Figura 30 <i>Diagrama del circuito DC-1 para la solución 2.</i>	57
Figura 31 <i>Diagrama del circuito DC-2.</i>	58
Figura 32 <i>Diagrama del circuito propuesto para medir la fuerza del alambre de Nitinol.</i>	60
Figura 33 <i>Acople para el alambre de Nitinol impreso en 3D.</i>	61
Figura 34 <i>Circuito final para medir la fuerza del alambre de Nitinol.</i>	61
Figura 35 <i>Interfaz del software EDMS.</i>	62
Figura 36 <i>Diagrama del circuito para obtención de curva típica de TTRs.</i>	64
Figura 37 <i>Ejemplo de un ángulo de inclinación medido con AutoCAD.</i>	65
Figura 38 <i>Dimensiones del prototipo propuesto referentes a la Tabla 1.</i>	67
Figura 39 <i>Diagrama de Ishikawa para determinar factores y niveles influyentes en el estudio.</i> 71	
Figura 40 <i>Diagrama para el diseño y fabricación del componente para impresión 3D.</i>	72
Figura 41 <i>Programación en Grasshopper para Celosía Planar Hexagonal.</i>	73
Figura 42 <i>Programación en Grasshopper para Celosía Planar Romboide.</i>	74
Figura 43 <i>Programación en Grasshopper para Celosía Planar Triangular.</i>	75
Figura 44 <i>Diagrama del proceso para obtención del archivo CAD.</i>	77
Figura 45 <i>Alambre de Nitinol longitud 80 milímetros y forma de fábrica.</i>	78
Figura 46 <i>Nueva forma propuesta para el alambre de Nitinol.</i>	79
Figura 47 <i>Diseño CAD para la placa de acero inoxidable.</i>	80

Figura 48 <i>Placa de acero inoxidable fabricada mediante corte láser en metal.</i>	81
Figura 49 <i>Alambre de Nitinol con la forma deseada sobre la placa de acero inoxidable.</i>	82
Figura 50 <i>Integración del alambre de Nitinol en el componente 3D.</i>	86
Figura 51 <i>Diseño CAD del componente de prueba para la integración del Nitinol.</i>	86
Figura 52 <i>Diagrama del método de evaluación.</i>	88
Figura 53 <i>Diagrama para el método de medición de fuerza del componente final.</i>	89
Figura 54 <i>Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según las orientaciones de impresión.</i>	91
Figura 55 <i>Gráfica de intervalos para Porcentaje de Elongación según las orientaciones de impresión.</i>	92
Figura 56 <i>Gráfica de dispersión de Esfuerzo vs Deformación de las cinco probetas con orientación ZX.</i>	93
Figura 57 <i>Funcionamiento del Circuito AC en el alambre de Nitinol.</i>	95
Figura 58 <i>Medición de temperatura en el Circuito AC.</i>	95
Figura 59 <i>Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 1.</i>	96
Figura 60 <i>Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 2.</i>	97
Figura 61 <i>Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 3.</i>	97
Figura 62 <i>Circuito implementado para medir la fuerza del alambre de Nitinol.</i>	98
Figura 63 <i>Alambre de Nitinol con curvatura en “C” para el ensayo.</i>	99
Figura 64 <i>Gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas.</i>	100
Figura 65 <i>Comparación de las formas del alambre de Nitinol en su Fase Austenita antes y después.</i>	100
Figura 66 <i>Implementación del circuito para la Prueba Af activo.</i>	102
Figura 67 <i>Gráfica de las TTRs (As y Af) del alambre de Nitinol sin entrenamiento.</i>	103

Figura 68 <i>Gráfica de las TTRs (As y Af) del alambre de Nitinol con enfriamiento rápido.</i>	104
Figura 69 <i>Gráfica de las TTRs (As y Af) del alambre de Nitinol con enfriamiento rápido.</i>	105
Figura 70 <i>Alambre de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de 1 camino.</i>	106
Figura 71 <i>Alambre de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de doble camino.</i>	107
Figura 72 <i>Alambres de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de 1 y 2 caminos.</i> ...	108
Figura 73 <i>Integración del alambre de Nitinol con el componente impreso en sus 3 diámetros propuestos.</i>	109
Figura 74 <i>Archivo CAD del componente 3D obtenido mediante SolidWorks.</i>	110
Figura 75 <i>Configuración del STL en PreForm.</i>	111
Figura 76 <i>Componente sobre la plataforma de impresión.</i>	112
Figura 77 <i>Proceso de lavado en máquina Creality.</i>	112
Figura 78 <i>Proceso de poscurado con luz UV en máquina Creality.</i>	113
Figura 79 <i>Comparación de tres componentes impresos con días de diferencia.</i>	113
Figura 80 <i>Resultado final de los tres componentes impresos con días de diferencia.</i>	114
Figura 81 <i>Componente Final con circuito eléctrico de actuación apagado.</i>	115
Figura 82 <i>Componente Final con circuito eléctrico de actuación encendido.</i>	115
Figura 83 <i>Gráfica de efectos principales para medias del Grado de inclinación.</i>	117
Figura 84 <i>Gráfica de efectos principales para medias del Tiempo.</i>	119
Figura 85 <i>Gráfica Peso vs Porcentaje de Porosidad para los 3 tipos de Celosías.</i>	120
Figura 86 <i>Diseño del componente con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.</i> ...	121
Figura 87 <i>Componente con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50% impreso.</i>	122
Figura 88 <i>Diseño del Prototipo Final con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.</i> 124	
Figura 89 <i>Prototipo Final con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.</i>	124
Figura 90 <i>Prototipo Final con el circuito eléctrico de actuación apagado.</i>	125

Figura 91 <i>Prototipo Final con el circuito eléctrico de actuación encendido.</i>	125
Figura 92 <i>Implementación del circuito para medir la fuerza del Prototipo final.</i>	126
Figura 93 <i>Gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas del Prototipo Final.</i>	127

Resumen

El uso de la impresión 3D con tecnología de Estereolitografía cada vez es más usada para el desarrollo de prototipos o piezas de alta complejidad o de características que no se puedan obtener con la manufactura tradicional, características como flexibilidad, optimización de material con estructuras porosas, personalización de formas y dimensiones, etc.

El presente estudio proporciona una guía para la integración entre un componente flexible impreso en 3D mediante estereolitografía que posee estructura porosa tipo celosía y una aleación de memoria de forma como el alambre de Nitinol, para desarrollar un prototipo con características de robótica blanda capaz de generar una actuación mecánica sin el uso de motores o cualquier tipo de actuador mecánico.

En el presente trabajo se usó un alambre de Nitinol de 1 [mm] de diámetro con una temperatura de transición de 40 [°C] de la marca Nexmetal. Se presentan los resultados de implementar el método Af activo para determinar las temperaturas de transición (TTRs), las cuales tuvieron un valor de 30,61 [°C] para la temperatura de inicio de fase austenita (As) y un valor de 41,02 [°C] para la temperatura de fin de fase austenita (Af) demostrando que el método a pesar de no usar equipo sofisticado, brinda buenos resultados. También se presentan resultados de los mejores métodos para entrenar el alambre de Nitinol con memoria de forma de 1 camino y de doble camino.

El estudio también demuestra que el tipo de celosía en el componente flexible no influye en el comportamiento de actuación del prototipo final, sin embargo, el porcentaje de porosidad si es un factor que afecta directamente a la actuación mecánica.

Palabras clave: memoria de forma, entrenamiento de 1 camino, entrenamiento de doble camino, temperaturas de transición (TTRs), celosía.

Abstract

The use of 3D printing with Stereolithography technology is increasingly being employed for the development of prototypes or parts with high complexity or characteristics that cannot be obtained through traditional manufacturing, such characteristics include flexibility, material optimization with porous structures, customization of shapes and dimensions, etc.

This present study provides a guide for integrating a 3D printed flexible component using Stereolithography, which features a lattice-like porous structure, with a shape memory alloy like Nitinol wire, to develop a prototype with soft robotics characteristics capable of generating mechanical movement without the use of motors or any type of mechanical actuator.

In this work, a 1 [mm] diameter Nitinol wire with a transition temperature of 40 [°C] from the Nexmetal brand was used. The results of implementing the active Af method to determine the Transition Temperature Ranges (TTRs) are presented, these had a value of 30.61 [°C] for the austenite phase start temperature (As) and a value of 41.02 [°C] for the austenite phase end temperature (Af), demonstrating that the method, despite not using sophisticated equipment, provides good results. Results of the best methods for training the 1-way and double-way shape memory Nitinol wire are also presented.

The study also demonstrates that the lattice type in the flexible component does not influence the performance behavior of the final prototype. However, the percentage of porosity is a factor that directly affects the mechanical performance.

Key words: shape memory, 1-way training, double-way training, transition temperatures (TTRs), lattice.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Hoy en día la manufactura de piezas de ingeniería va más allá del uso de técnicas tradicionales como mecanizado, fundición, molde, etc., permitiendo así, la creación de piezas más complejas. Entre estas nuevas técnicas de manufactura se destaca la impresión 3D, una pieza impresa en 3D tiene la característica de poder estar formada por varias sub piezas pero no necesariamente mediante el proceso de ensamble, sino que, se imprime en un solo cuerpo y adicional puede tener estructuras huecas o porosas en su interior.

Figura 1

Aplicación de robótica blanda en una prótesis de mano.



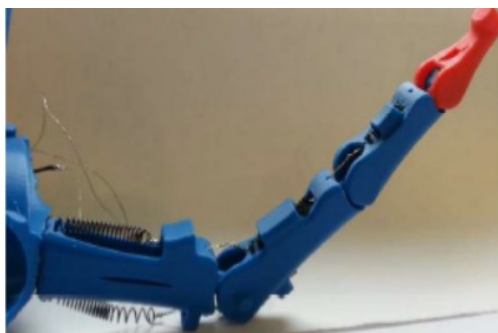
Nota. Tomado de (Rastogi, n.d.).

Con el avance de la tecnología, cada vez surgen nuevas aplicaciones en donde se ve involucrada la impresión 3D, una de ellas es la robótica blanda donde, los robots tienen características de flexibilidad y deformación. Estas características son clave en aplicaciones donde se requiere movimientos fluidos, suaves y parecidos a los que realizan los seres vivos, generalmente estos robots son fabricados con materiales flexibles o materiales con memoria de forma (Rastogi, n.d.).

Entre estos materiales capaces de cambiar su forma y volver a su estado original se encuentran las aleaciones con memoria de forma (SMA por sus siglas en inglés), estas aleaciones se usan en actuadores para aplicaciones como la biomecánica, investigaciones espaciales, industria automotriz, robótica blanda, entre otras (Ersin et al., 2021).

Figura 2

Prótesis de un dedo impreso en 3D con cables de SMA.



Nota. Cables de SMA usados para simular músculos y tejidos. Tomado de (Ersin et al., 2021).

Varios estudios se han realizado para analizar el comportamiento del Nitinol como aleación con memoria de forma, uno de estos es *Análisis del comportamiento de los cables con memoria de forma bajo sollicitación externa mediante el análisis de elementos finitos (FEA)* (Burlacu et al., 2020), este trabajo proporciona información sobre la deformación y comportamiento de diferentes alambres aplicando cuatro fuerzas de deformación y a diferentes condiciones de temperatura ambiente (23°C y 80°C).

Otro trabajo es *Medición de temperatura y desplazamiento con actuadores NiTi bajo ciertas condiciones eléctricas* (Ersin et al., 2021), en donde se analizó el comportamiento mecánico del Nitinol bajo diferentes valores de corriente eléctrica.

Ambos trabajos presentan información sobre el comportamiento del alambre de Nitinol como aleación de memoria de forma, sin embargo, son estudios que no se relacionan con componentes impresos en 3D, por lo tanto, en el presente trabajo se estudiará la combinación de la impresión 3D con el alambre de Nitinol para simular un mecanismo que reaccione a estímulos o fuerzas externas y que sea capaz de cambiar su forma y doblarse.

Justificación e importancia

La impresión 3D se ve involucrada cada vez más en la solución a problemas de la vida diaria, un claro ejemplo es en el campo de la medicina, que hoy en día se imprimen huesos, prótesis y hasta órganos. Sin embargo, el avance tecnológico y el uso de la robótica blanda permiten, por ejemplo, que un órgano impreso en 3D tenga la capacidad de adaptarse a su entorno (células del paciente) y cambiar su forma para una mejor integración en el cuerpo humano (Lucia, 2019).

Para esto, se usan materiales complejos como, polímeros con memoria de forma, elastómeros de cristal líquido, hidrogeles, entre otros (YúbalFM, 2020).

Como esta, existen múltiples aplicaciones y no se requiere el uso estricto de estos materiales complejos, sino que se puede integrar la impresión 3D con materiales flexibles y materiales capaces de cambiar su forma ante estímulos externos, para de esta forma tener resultados similares.

Uno de estos materiales son las aleaciones con memoria de forma (SMA) que se están usando en múltiples aplicaciones como la biomédica, aeroespacial, automotriz, entre otras. Se ha estudiado el comportamiento del cable de SMA para simular músculos y tejidos en un dedo robótico y así obtener actuadores mecánicos flexibles con características de bajo peso, alta resistencia y buena biocompatibilidad (Ersin et al., 2021).

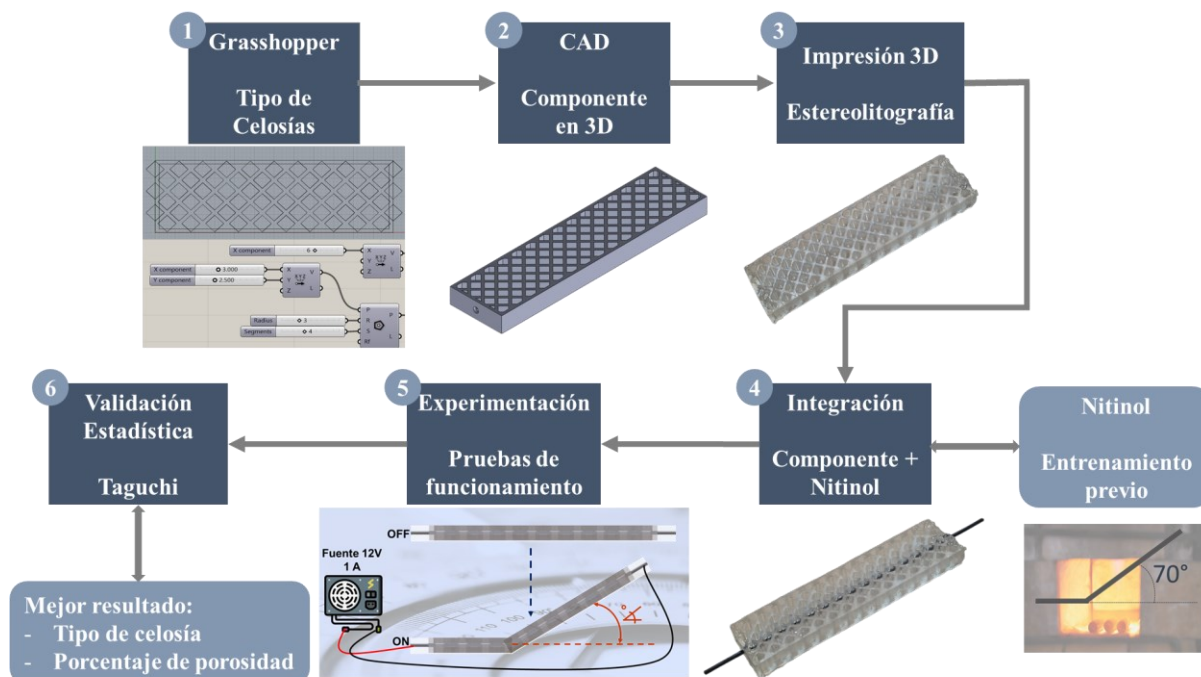
Haciendo referencia al estudio experimental del artículo (Ersin et al., 2021), se sabe el comportamiento del Nitinol bajo diferentes valores de corriente eléctrica, en cuanto a cantidad de desplazamiento, fuerza y resistencia. Sin embargo, la combinación de la impresión 3D con el Nitinol es un tema de estudio poco abordado, es por eso que, en este trabajo se propone generar una plataforma o guía para lograr la mejor integración entre un componente impreso en 3D y el Nitinol y así crear un actuador inteligente para aplicaciones mecatrónicas capaz de reaccionar a estímulos o fuerzas externas que se encuentren en su entorno.

Alcance del proyecto

El alcance del proyecto se encuentra compuesto por el diagrama de la Figura 3.

Figura 3

Diagrama propuesto para el desarrollo y alcance del proyecto.



Primero, con la herramienta Grasshopper del software Rhino7® (Rhinceros, V7 estudiantil) se plantea tener un modelo base de tipos de celosías, esto con el objetivo de variar parámetros y así tener diferentes tipos de celosías planas en cuanto a su forma y porcentaje de porosidad. El resultado será un modelo 2D de la estructura de celosía escogida.

Segundo, obtener el modelo CAD en 3D a partir del modelo 2D, esto a través del software SolidWorks® (Dassault Systèmes, V2020 SP3.0). El objetivo es obtener un componente de dimensiones 60x15x4,5 milímetros cuyo núcleo corresponda a la estructura de celosía plana previamente diseñada, además, se agregará 1 agujero pasante de 1,5 milímetros de diámetro en el eje axial del componente.

Tercero, realizar la impresión 3D por estereolitografía con la resina Elastic 50A con los siguientes parámetros de impresión: espesor de capa 0,1 milímetros y orientación 90° respecto al plano XY, es decir, en dirección del agujero pasante.

Cuarto, realizar la integración del alambre de Nitinol con el componente impreso, esto consiste en introducir el alambre por el agujero pasante del componente. Es importante mencionar que se estudiará el comportamiento de esta integración, es decir, si el Nitinol se adhiere correctamente al componente impreso sin resbalarse o si en las pruebas de funcionamiento el componente impreso presenta alguna quemadura por el calentamiento.

Previo a esta integración, el alambre de Nitinol debe estar programado con una forma específica que se aprecia en la esquina inferior derecha de la Figura 3, debe tener una inclinación de 70° . La programación del Nitinol consiste en introducirlo en un horno con la forma antes mencionada y calentarlo a una temperatura de 500°C durante 45 minutos, con esto, el alambre de Nitinol al calentarse obtendrá esta nueva forma programada.

Quinto, para la experimentación se evaluará la capacidad de doblado de cada componente, es decir, se aplicará un estímulo eléctrico con una fuente de voltaje AC de 12V y 1A al alambre de Nitinol y este al estar totalmente recto e introducido en el componente impreso, tenderá a inclinarse los 70° previamente programados pero esta vez con el componente incluido, luego se medirán los grados de inclinación que alcanzó cada componente y se realizará un análisis estadístico para validar los resultados.

Sexto, para la validación estadística se realizará un diseño de Taguchi y así se compararán los resultados obtenidos con los diferentes componentes, para obtener los mejores resultados en cuanto a cuál tipo de celosía es la mejor y con qué porcentaje de porosidad para una aplicación de robótica blanda.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de forma.

Objetivos Específicos

1. Diseñar una plataforma de productos para aplicaciones de impresión 3D con actuación de aleaciones con memoria de forma.
2. Diseñar y fabricar las estructuras porosas tipo celosía para actuadores mecánicos.
3. Integrar los componentes de actuación con memoria de forma.
4. Realizar pruebas de funcionamiento y validación estadística.

Capítulo II

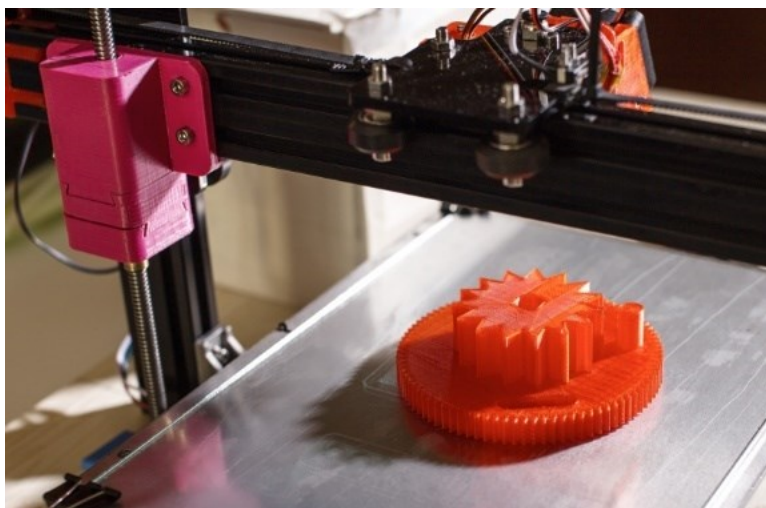
Revisión de Literatura

Manufactura Aditiva

Contrario a las técnicas tradicionales de obtención de una pieza a partir de un bloque de materia prima, ya sea por mecanizado, molde, etc., la manufactura aditiva (MA) se refiere a la creación de una pieza donde se agrega material capa por capa, permitiendo crear piezas con forma y geometría de mayor complejidad, así como, con canales internos. Otra característica de la MA es que se puede personalizar una pieza o cambiarle detalles específicos con mayor facilidad ya que no se requiere un molde genérico (México, 2022).

Figura 4

Componente mecánico obtenido por manufactura aditiva.



Nota. Tomado de (Plastico, 2019).

Estructuras tipo Celosías o lattices

La MA permite crear piezas con estructuras complejas, una de estas estructuras son las celosías, cuya principal aplicación es la optimización de material, como se observa en la Figura 5, en donde se tiene un cuerpo 100% sólido y con el uso de estas celosías se puede reducir el material hasta obtener un cuerpo hueco por dentro o poroso, pero sin comprometer el funcionamiento y resistencia del mismo.

Figura 5

Optimización de material con estructuras tipo celosías.



Nota. Tomado de (Iber 3D, 2018).

Según su forma, las celosías se clasifican en:

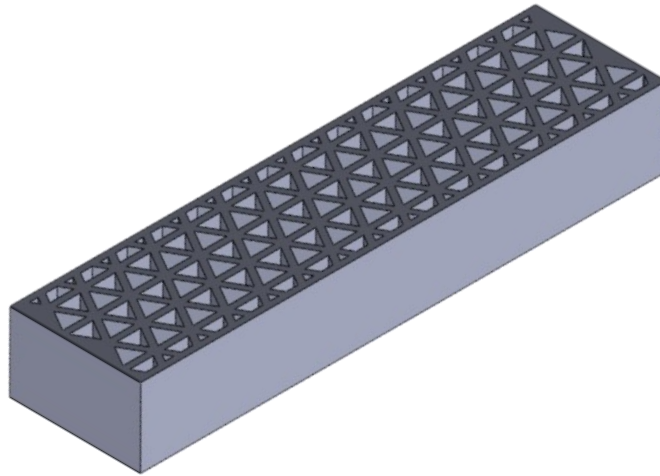
Celosías planas. Corresponden a celosías que tienen una forma regular de mallado, por ejemplo, las más comunes son:

- Hexagonales
- Romboides
- Triangulares
- Cuadradas
- Circulares

Estas estructuras se obtienen creando un patrón periódico sobre un plano 2D y luego se extruyen en una sola dirección para crear una estructura 3D como se muestra en la Figura 6 (Gen3D, 2021).

Figura 6

Estructura 3D con celosía plana de patrón Triangular.



Nota. Esta estructura fue obtenida mediante el software SolidWorks.

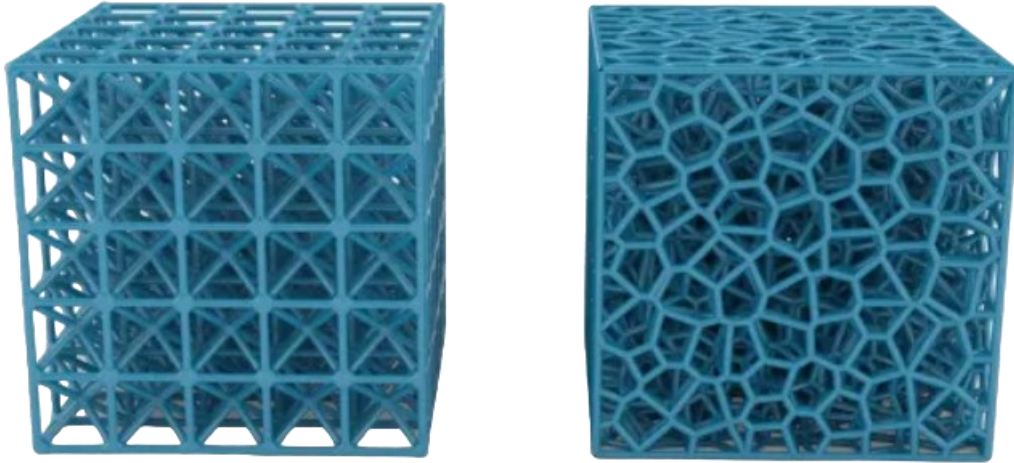
Estas celosías son mayormente usadas en cuerpos donde se requiere maximizar, por ejemplo, esfuerzos a compresión (celosía Hexagonal) o esfuerzos a tracción (celosía cuadrada o lineal) pero realizando la optimización de material.

Celosías basadas en puntales. Son estructuras cuyas celosías (tipo varillas) están conectadas en diferentes orientaciones formando así diferentes celdas unitarias. La celda unitaria se refiere a la mínima fracción del cuerpo.

Si la celda unitaria de una celosía basada en puntales es repetitiva a lo largo de todo el cuerpo, esta se conoce como celosía periódica, por otro lado, si las celdas se conectan de manera aleatoria, se trata de una celosía estocástica (Gen3D, 2021).

Figura 7

Estructura 3D con celosías basadas en puntales.



Nota. La estructura de la izquierda se trata de una celosía periódica y la estructura de la derecha es una celosía estocástica. Adaptado de (Gen3D, 2021).

Estas celosías estocásticas son comúnmente usadas en aplicaciones biomédicas ya que las celdas aleatorias pueden conectarse con estructuras óseas del cuerpo humano.

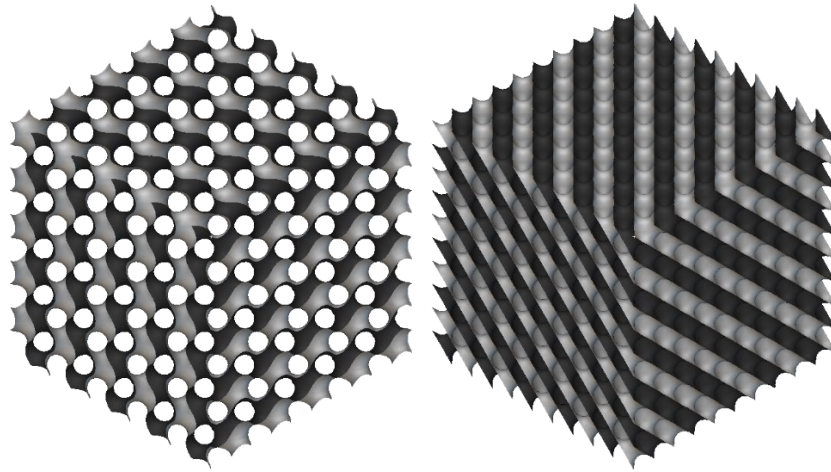
Celosías basadas en superficies. El subconjunto de estas celosías son las llamadas Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS), las cuales se definen mediante ecuaciones (Gen3D, 2021).

Las más usuales son:

- Gyroid
- Voronoid
- Diamond

Figura 8

Estructuras 3D con celosías TPMS.



Nota. A la izquierda se aprecia una estructura Gyroid y a la derecha una estructura Diamond. Estas estructuras fueron obtenidas mediante el software nTop® (nTopology Inc., V7.4.3 estudiantil).

El uso de estas estructuras generalmente se destaca en intercambiadores de calor, en donde al tener esta forma aleatoria el aire caliente o frío pasa a lo largo de toda esta estructura obteniendo un excelente intercambio térmico.

Robótica blanda

Se trata de una rama de la robótica, la cual estudia el diseño y fabricación de robots con característica suave y flexible y cuyos movimientos se asemejan a los de los organismos vivos (Rastogi, n.d.).

Estos robots usan materiales deformables y flexibles para su construcción, mientras que para su método de actuación generalmente se usan materiales piezoeléctricos o materiales con memoria de forma.

Ventajas

- Interactuar con su entorno con mayor facilidad debido a movimientos fluidos
- Sufrir gran deformación gracias a su estructura flexible

- Mejor interacción con seres humanos gracias a su maniobrabilidad biológica
- Robots más livianos

Aplicaciones

- Automotriz
- Biomédica
- Medicina, entre otras

Ejemplo de proyectos con robótica blanda

Robot Octobot

Figura 9

Robot Octobot



Nota. Fue el primer robot blando totalmente autónomo. Tomado de (Rastogi, n.d.).

Desarrollado por investigadores de la Universidad de Harvard e inspirado en un pulpo, no posee estructura esquelética y su mecanismo de acción es neumático, posee un gas a presión el cual mediante una reacción química puede inflar los tentáculos como un globo, logrando así su movimiento.

Micro robot Caterpillar

Desarrollado por investigadores de la Universidad de Varsovia e inspirado en una oruga, mide 15 milímetros y puede moverse a través de superficies planas, estrechas e incluso subir pendientes transportando cargas hasta 10 veces su propia masa. Está construido con una cinta de elastómero sensible a la luz.

Figura 10

Micro robot Caterpillar.



Nota. Tomado de (Rastogi, n.d.).

Exo-Glove Poly**Figura 11**

Exo-Glove Poly.



Nota. Tomado de (Rastogi, n.d.).

Desarrollado por Kyu-Jin Cho de la Universidad Nacional de Seúl, se trata de un exo-guante que aumenta la capacidad de agarre en personas con dificultad de movilidad de sus dedos o manos. El dispositivo es resistente al agua, flexible y funciona con cables y actuadores sensibles. Su método de actuación mediante cables es similar al movimiento que realizar los tendones en el cuero humano.

Impresión 3D (Estereolitografía)

La impresión 3D es un proceso de manufactura aditiva, y así mismo, existen múltiples métodos y tecnologías de impresión 3D, entre los cuales se encuentra la estereolitografía (SLA). Esta tecnología de impresión se basa en la fotopolimerización de resinas fotosensibles, en otras palabras, en un tanque se coloca la resina y con una fuente de luz ultravioleta, esta se cura y se endurece, creando una capa de material, y con múltiples capas se obtiene la pieza final, la cual presenta mejores detalles y acabados superficiales que con otras tecnologías de impresión 3D (FormLabs, 2022).

Figura 12

Impresión 3D por estereolitografía.



Nota. Tomado de (Formlabs, 2022).

Resina para impresión 3D

La resina que se usa para impresión 3D por estereolitografía es un material fotosensible, es decir, en presencia de luz ultravioleta la resina de estado líquido se cura o solidifica.

Según el alcance del proyecto que busca el desarrollo de un mecanismo de robótica blanda, es necesario el uso de un material flexible para su construcción, así mismo, la impresora que se usará debido a la disponibilidad es la Form3 de la marca Formlabs, por lo tanto, se tienen 2 resinas posibles para trabajar.

Elastic 50A. Su característica principal es ser altamente deformable y tener una rápida capacidad de recuperación elástica. Se utiliza para ingeniería blanda, piezas que puedan doblarse, estirarse, comprimirse y resistir una gran cantidad de ciclos sin desgarrarse para después volver rápidamente a su forma original (FormLabs, 2022).

Flexible 80A. Su característica principal es ser rígida pero de tacto blando, la mayor diferencia con la resina Elastic 50A es que presenta mayor resistencia a la tracción o flexión pero su capacidad de recuperación elástica es más lenta, es de uso típico en piezas para amortiguación y absorción de impactos (FormLabs, 2022).

Importancia de la caracterización de resina

Todo fabricante proporciona la ficha técnica de las características de su material y para el caso de las resinas no es excepción.

El fabricante Formlabs nos menciona que los datos de su ficha técnica para cada resina pueden variar según la geometría de la pieza, orientación de impresión, e incluso cómo se realizaron los ensayos y bajo que normas. Es por esta razón que, una caracterización propia de un material es importante realizarla para saber que propiedades reales tiene el material con el que se va a trabajar.

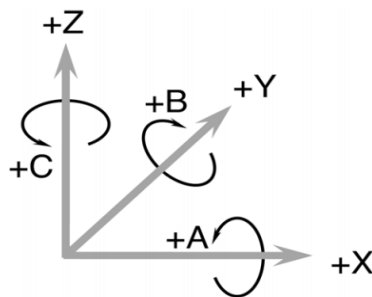
Una caracterización consiste en realizar los ensayos que el fabricante propone, para determinar las propiedades mecánicas reales que tiene el material bajo condiciones específicas propias.

Orientaciones de impresión

La orientación de impresión se refiere a cómo están orientadas las capas que conforman la pieza final respecto a la plataforma de impresión. Según la Norma ASTM 52921 – 2013 (Standard Terminology for Additive Manufacturing - Coordinate Systems and Test Methodologies), la orientación de los ejes de la plataforma se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Orientación de los ejes de la plataforma de impresión.

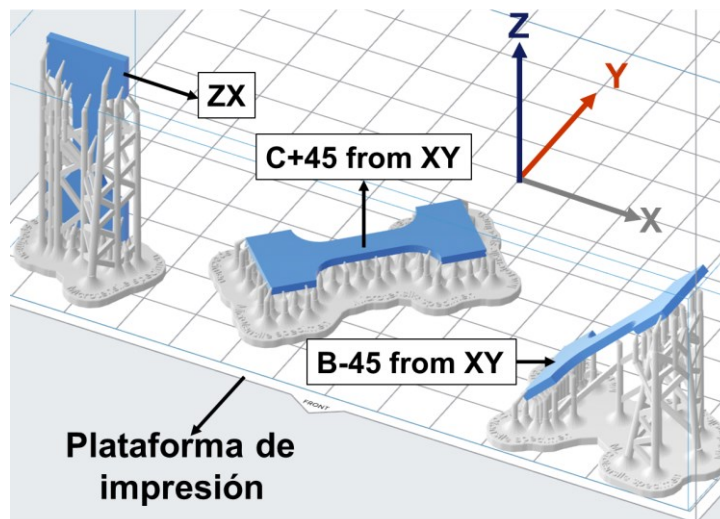


Nota. Orientaciones positivas siguiendo la regla de la mano derecha (ASTM, 2011).

En la Figura 14 como ejemplo, se muestra 3 diferentes orientaciones.

Figura 14

Ejemplo de orientaciones de impresión.



Nota. Las orientaciones están respecto al sistema de referencia de la plataforma de impresión.

Ejemplificación realizada en el software PreForm® (Formlabs Inc., V3.29.1).

La orientación de impresión no afecta en el acabado estético de la pieza, sin embargo, puede afectar en la resistencia, principalmente en ensayos de tracción debido al ordenamiento de las capas.

Proceso de poscurado

La impresión 3D de resina (SLA), requiere de un proceso de poscurado luego de obtener la pieza de impresión, este proceso es necesario para que la resina adquiera las características propias de su tipo.

El poscurado consiste en un lavado en alcohol isopropílico (generalmente al 97%) y posteriormente un curado en luz ultravioleta (UV) sobre una cama caliente, parámetros como tiempo y temperatura son propios para cada resina.

En el caso de Formlabs, la recomendación para los parámetros de poscurado para sus 2 resinas de característica flexible son:

Poscurado – Elastic 50A

- *Tiempo de lavado:* 20 minutos.
- *Tiempo de exposición a luz UV:* 20 minutos.
- *Temperatura de la cama:* 60°C (Formlabs, 2020a).

Poscurado – Flexible 80A

- *Tiempo de lavado:* 10 minutos.
- *Tiempo de exposición a luz UV:* 10 minutos
- *Temperatura de la cama:* 60°C (Formlabs, 2020b).

Materiales con memoria de forma

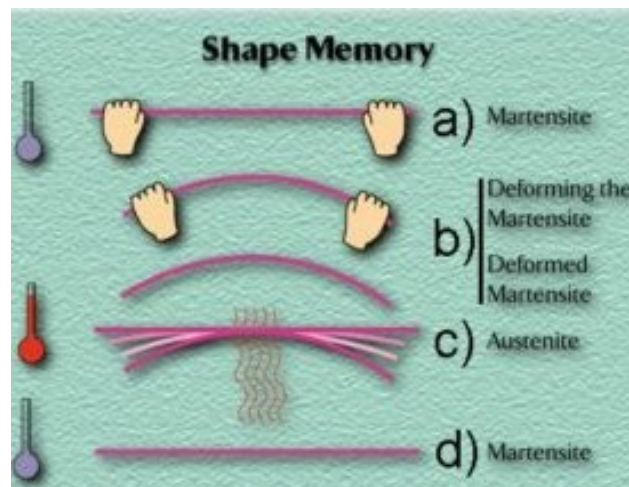
Son materiales capaces de recordar su forma, que luego de sufrir una deformación vuelven a su forma original. Este efecto de memoria se puede producir aplicando un cambio térmico o magnético y son capaces de realizar este efecto una infinidad de veces sin sufrir deterioro (Seas, 2016).

En la Figura 15 se puede observar lo siguiente:

- a) **Fase Martensita:** se tiene un alambre totalmente recto a temperatura ambiente.
- b) **Martensita deformada:** se aplica una fuerza con las manos y se deforma el alambre, luego se retira esta fuerza, pero el alambre sigue deformado.
- c) **Fase Austenita:** al calentar el alambre, este vuelve a su forma original sin necesidad de aplicar una fuerza física.
- d) **Fase Martensita:** el alambre se enfría y se puede volver a deformar.

Figura 15

Concepto de memoria de forma.



Nota. Tomado de (Seas, 2016).

Nitinol

Introducción

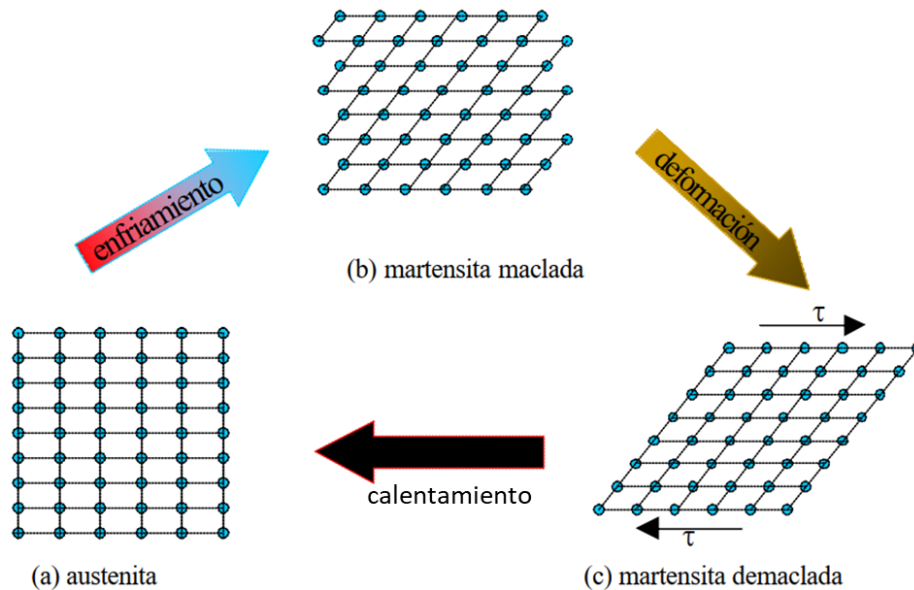
Corresponde a la familia de materiales con memoria de forma, siendo una Aleación con memoria de forma (SMA) por sus siglas en inglés, se trata de una aleación de Níquel y Titanio en proporciones casi equivalentes, esta aleación además de tener memoria de forma, presenta muy buenas propiedades eléctricas y mecánicas, resistencia a la fatiga y a la corrosión (Seas, 2016).

Temperatura de transformación

Es la temperatura necesaria para que el material sufra los cambios de fase o estructura. Esta temperatura la obtiene el material a partir de su fabricación y se pueden tener diferentes valores dependiendo de la aplicación en la cual va a actuar la aleación de memoria de forma.

Figura 16

Estructuras o fases de transformación del Nitinol.



Nota. La estructura austenita (a) se enfría por debajo de la temperatura de transformación para convertirse en martensita maclada (b) sin sufrir cambio de forma. Luego se deforma y se obtiene martensita demaclada (c), calentado (b) y (c) se volverá a la estructura o forma original (a). Adaptado de (Qu et al., 2011).

Estructura austenita

Es una fase de alta temperatura, también conocida como fase generatriz y de estructura cúbica. Se refiere a la fase en donde el material vuelve a su forma original siempre y cuando éste alcance y/o supere la temperatura de transformación, esto se aprecia en la Figura 15 literal c.

Estructura martensita

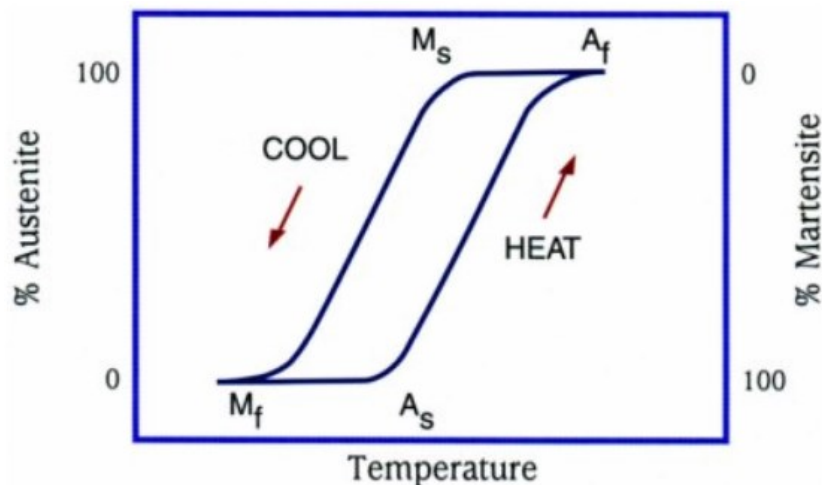
Cuando el material se enfría por debajo de la temperatura de transición, pasa a una estructura martensita, en donde su límite de elasticidad es muy bajo y puede ser deformado con facilidad, el material mantendrá esta nueva forma, sin embargo, al ser calentado nuevamente y sobrepasar su temperatura de transformación, este experimenta un cambio en la estructura volviendo a su forma original y si el material se encuentra con algún tipo de fuerza externa o resistencia durante esta transformación, puede generar grandes fuerzas (Seas 2016).

Curva de temperaturas de transformación

Para entender correctamente la memoria de forma, la Figura 17 representa un gráfico con las curvas de temperaturas de transición (TTRs).

Figura 17

Curvas de temperaturas de transformación del Nitinol.



Nota. Tomado de (Machado & Lagoudas, 2008).

La Figura 17 representa las curvas de TTRs respecto a la formación en porcentajes de las estructuras Austenita y Martensita, donde:

- **Mf:** corresponde con la temperatura en la que el Nitinol es 100% Martensítico y 0% Austenítico, es decir, la temperatura más baja a la cual se puede comenzar a deformar el material sin ningún esfuerzo.

- **Af:** corresponde con la temperatura en la que el Nitinol es 0% Martensítico y 100% Austenítico, es decir, la temperatura de transformación necesaria para que el material vuelva a su forma original.
- **Ms:** corresponde con la temperatura en la que el Nitinol pasa de ser totalmente Austenítico a ser levemente Martensítico, es decir, cuando el material empieza a enfriarse. Aquí se observa un comportamiento elástico ya que el material puede ser deformado, pero éste ofrece resistencia y vuelve a su forma original rápidamente.
- **As:** corresponde con la temperatura en la que el Nitinol pasa de ser totalmente Martensítico a ser levemente Austenítico, es decir, cuando el material empieza a calentarse y por consecuencia empieza a tomar su forma original pero lentamente.

Obtención de la curva de temperaturas de transformación

Para cualquier aplicación con el uso del Nitinol es recomendable determinar las TTRs reales que posee, para ello se pueden realizar 3 métodos de obtención.

Método 1. Consiste en aplicar una carga conocida y constante al Nitinol e ir variando la temperatura tanto en incremento como decremento e ir observando la deformación del material.

Materiales y equipos

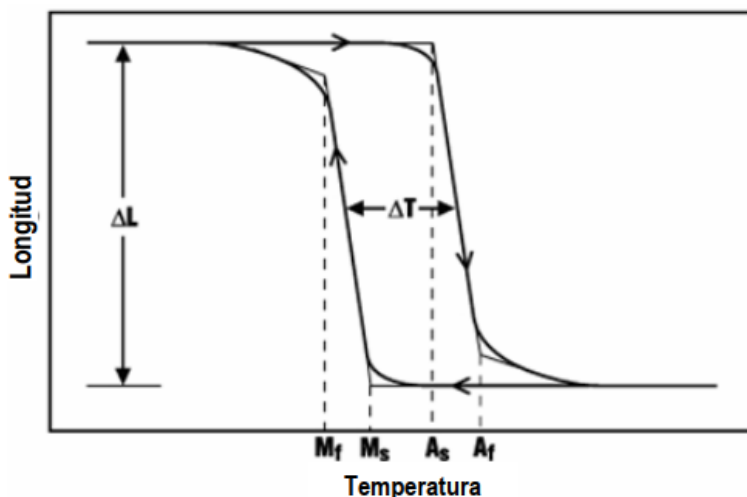
- Máquina de ensayos con cámara de control de temperatura.
- Alambre de Nitinol.

TTRs obtenidas

El resultado de este método nos proporciona las cuatro TTRs (Ms, Mf, As y Af) que se observan en la gráfica de la Figura 18.

Figura 18

Longitud del material vs temperatura en un ensayo de carga constante.



Nota. El ensayo consiste en la elongación y contracción del material. Tomado de (Qu et al., 2011).

Limitaciones

La principal limitante en la aplicación de este método es la dificultad de acceder a una máquina de ensayos con una cámara de control de temperatura, ya que es importante aislar el ambiente y tener un control total de la temperatura durante el ensayo, caso contrario los resultados no serán favorables.

Método 2. Consiste en el uso de un calorímetro diferencial de barrido donde se va midiendo la cantidad de calor emitida y absorbida por el material mientras es enfriado y calentado.

Materiales y equipos

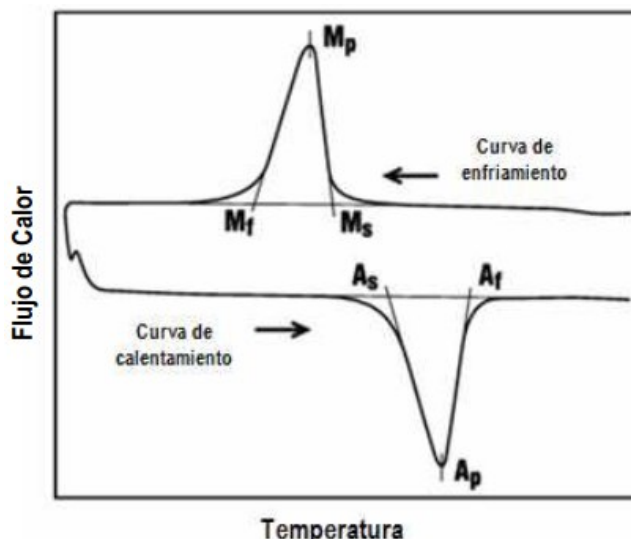
- Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC).
- Alambre de Nitinol.

TTRs obtenidas

El resultado de este método también nos proporciona las cuatro TTRs (M_s , M_f , A_s y A_f) que se observan en la gráfica de la Figura 19.

Figura 19

Curva DSC típica para alambres de Nitinol.



Nota. Los valores de M_p y A_p se refieren a las temperaturas donde el material alcanzó el máximo pico tanto en el flujo de enfriamiento como en el de calentamiento. Tomado de (Qu et al., 2011).

Limitaciones

El equipo DSC necesario resulta muy costoso de conseguir.

Método 3. Conocido como prueba de A_f activo, consiste en un baño de agua o alcohol en donde el material se encuentra deformado en forma de “U”, luego se procede a calentar el baño y registrar la recuperación de forma, es decir, en ángulos de deformación de 0 a 180° (siendo 180° la forma en U y 0° forma recta u original).

Materiales y equipos

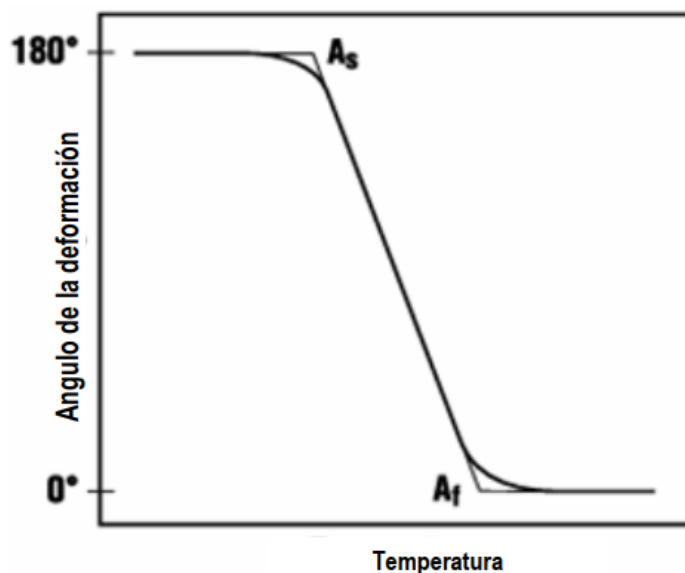
- Recipiente para el baño con agua o alcohol.
- Instrumento de medición de temperatura (termómetro)
- Cámara fotográfica para registro de ángulos.
- Alambre de Nitinol.

TTRs obtenidas

El resultado de este método nos proporciona solo dos TTRs (A_s y A_f) ya que solo se puede registrar la recuperación de forma del material en la etapa de calentamiento. La gráfica obtenida se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Curva A_f activo típica para alambres de Nitinol.



Nota. Debido a que el método solo se hace para calentamiento, las temperaturas M_s y M_f no pueden ser obtenidas. Tomado de (Qu et al., 2011).

Limitaciones

Este método nos limita a obtener únicamente las TTRs de A_s y A_f , sin embargo, por la facilidad de materiales y equipos que se necesitan, resulta el método más conveniente. Así mismo, la obtención de las TTRs de A_s y A_f , son suficientes para conocer la temperatura de transformación real del Nitinol.

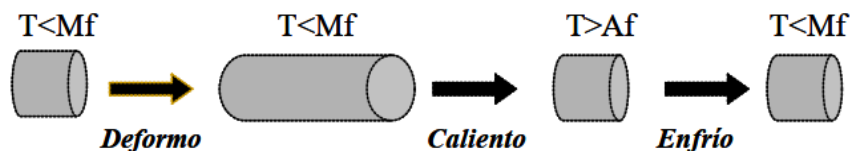
Memoria de forma de 1 camino

En la Figura 21 podemos observar la actuación de memoria de forma simple de un alambre de Nitinol, en donde, partiendo de la forma original (longitud corta) y a una temperatura menor a M_f el alambre puede ser deformado (alargado) mediante una fuerza externa, luego el

alambre se calienta por encima de la temperatura A_f y éste vuelve a su forma original (longitud corta). Finalmente, de nuevo se enfría el alambre por debajo de la temperatura M_f y se puede observar cómo no cambia su forma, es decir, se mantiene en su forma original.

Figura 21

Efecto de Memoria de forma simple o de 1 camino.



Nota. La forma original del alambre de Nitinol es la de longitud corta. Adaptado de (de la Flor, 2005).

Entrenamiento del Nitinol para memoria de forma de 1 camino

Primero es importante conocer que generalmente los alambres de Nitinol que se encuentran en el mercado pueden ser en forma de resortes o en rollos como cualquier otro alambre. Para el caso de los alambres de Nitinol encontrados en rollos (como es el caso del que se usa en este proyecto), estos tienen una forma original establecida de fábrica (en línea recta).

Debido a que el alambre de Nitinol tiene una forma de fábrica ya establecida, es necesario entrenar el material para que éste obtenga una nueva forma acorde a las necesidades de cierta aplicación.

Para el entrenamiento de memoria de forma simple o de 1 camino, existe un solo método que consiste en calentar el alambre (dada la forma deseada) a altas temperaturas (mayores a 300°C) en un horno durante 40 minutos o según la recomendación del fabricante.

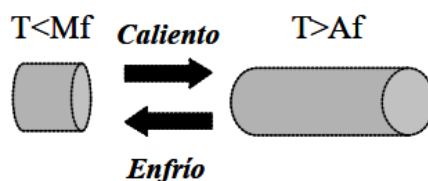
Memoria de forma de 2 caminos

En la Figura 22 se aprecia el efecto de doble memoria de forma de un alambre de Nitinol, en donde, el material partiendo de su forma original (longitud corta) es calentado por

encima de la temperatura A_f y sufre deformación o alargamiento sin la acción de una fuerza externa y, cuando el material se enfría por debajo de la temperatura M_f éste vuelve a su forma original (longitud corta). En otras palabras, el alambre de Nitinol tiene 2 formas y se llega a estas calentándolo o enfriándolo, pero sin interacción de una fuerza externa.

Figura 22

Efecto de Doble Memoria de forma o de 2 caminos.



Nota. La forma original del alambre de Nitinol es la de longitud corta. Adaptado de (de la Flor, 2005).

Entrenamiento del Nitinol para memoria de forma de 2 caminos

Para el entrenamiento de doble memoria de forma o de 2 caminos se tienen 4 métodos:

Método de entrenamiento Activo. Consiste en tener el alambre de Nitinol en su fase Austenita (temperatura mayor a A_f), luego se enfría rápidamente hasta una temperatura menor a M_f (obteniendo su fase Martensita) en donde se deforma el alambre hasta la forma deseada. Finalmente se calienta hasta volver a su fase Austenita en donde recupera su forma inicial. Este proceso se repite varias veces (no hay un número de veces establecidas, sino que se hace según experiencia y resultados propios) y se obtendrá un alambre de Nitinol de tal manera que al calentarse obtiene la forma deseada y al enfriarse vuelve a la forma inicial.

Método de entrenamiento Pasivo I. Este proceso igualmente parte de la fase Austenita (temperatura mayor a A_f) y se enfría gradualmente hasta obtener la fase Martensita (temperatura menor a M_f) en donde se deforma el alambre hasta su forma deseada, se aplica una tensión sobre esta nueva forma y a la vez se calienta para llegar nuevamente a la fase Austenita, pero con una Martensita inducida por tensión. Enfriando y calentando sucesivamente

n veces el alambre con la tensión aplicada, se obtiene un alambre de Nitinol de doble memoria de forma.

Método de entrenamiento Pasivo II. Partiendo de la fase Austenita y manteniendo una temperatura mayor a A_f se ejerce una tensión dando la forma deseada al alambre hasta obtener Martensita inducida por tensión, luego se retira la tensión para volver a la fase Austenita. Esta carga y descarga de tensión se repite n veces para obtener un alambre de Nitinol de doble memoria de forma.

Método de entrenamiento Pasivo III. Parte de la fase Austenita (temperatura mayor a A_f) donde se aplica tensión dando la forma deseada al alambre, luego se enfría por debajo de la temperatura M_f manteniendo la tensión hasta obtener la fase Martensita inducida por tensión y temperatura. Se retira la tensión y se calienta nuevamente hasta la fase Austenita. Este proceso se repite n veces hasta obtener un alambre de Nitinol de doble memoria de forma.

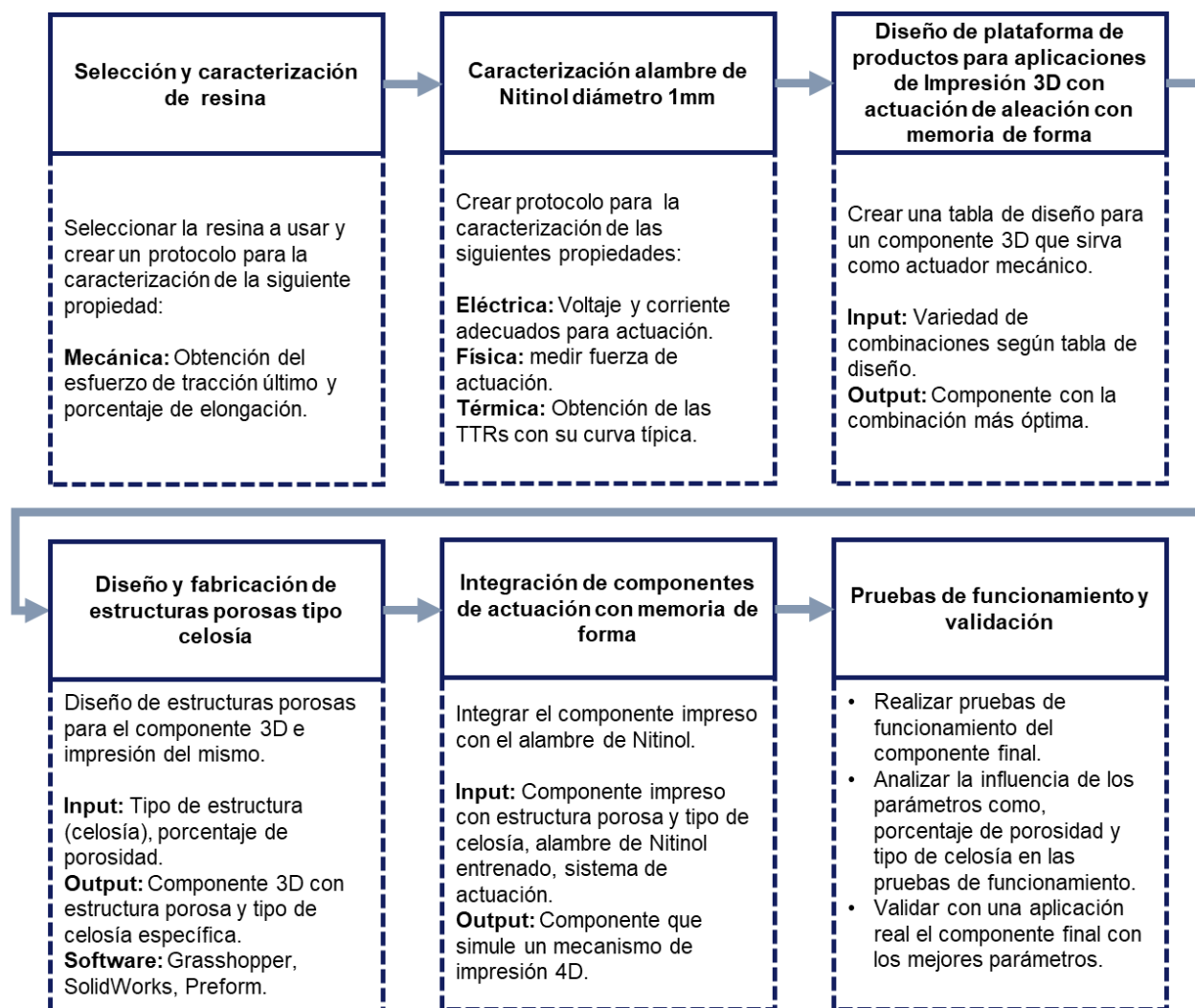
Capítulo III

Metodología

La metodología propuesta se presenta en el diagrama de la Figura 23, en donde se engloba desde la caracterización de los materiales a usar como son, resina y el alambre de Nitinol, hasta las pruebas de funcionamiento y validación del componente final que resulta de la integración de ambos materiales.

Figura 23

Diagrama de flujo que engloba la metodología del trabajo.



Selección y Caracterización de resina

Selección

Formlabs ofrece 2 resinas para trabajar en aplicaciones de robótica blanda como es el caso del presente proyecto.

La Figura 24 presenta las características de ambas resinas.

Figura 24

Comparación de características entre resina Elastic 50A y Flexible 80A.

Resina Elastic 50A	Resina Flexible 80A
<ul style="list-style-type: none"> • Doblado • Estirado • Compresión • Rápida recuperación elástica • Resistencia a la rotura por tracción: 3,23 [MPa] (poscurada) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rigidez • Compresión • Absorción de impactos • Lenta recuperación elástica • Resistencia a la rotura por tracción: 8,9 [MPa] (poscurada)

Nota. Características tomadas de las fichas técnicas del fabricante (Formlabs, 2020a, 2020b).

Según las características de la Figura 24, y tomando en cuenta el alcance del proyecto de diseñar y fabricar un mecanismo de robótica blanda cuya aplicación específica es la simulación de un dedo de una prótesis de mano, se escoge la resina Elastic 50A por lo siguiente:

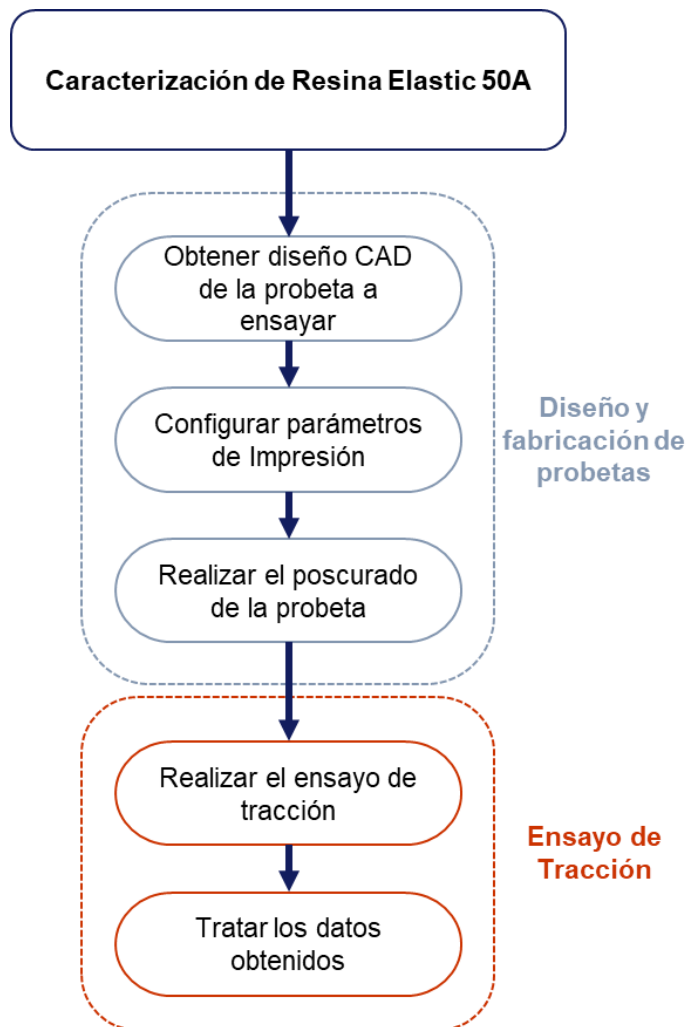
- Se da prioridad a la rápida recuperación elástica.
- Es importante que pueda doblarse.
- La aplicación no necesita absorción de impactos.
- La aplicación no estará bajo esfuerzo de tracción.

Caracterización

El proceso a seguir para la caracterización de la resina se muestra en la Figura 25, donde se divide en 2 subprocesos.

Figura 25

Diagrama de flujo para el proceso de Caracterización de resina Elastic 50A.



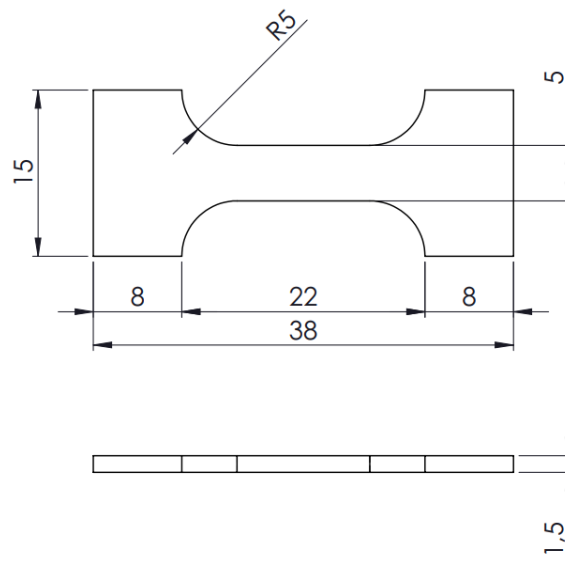
Como se estudió en el Capítulo II, la caracterización de un material es importante para determinar las características mecánicas reales que posee y contrastar con lo que ofrece el fabricante. Por lo tanto, la meta es determinar mediante el ensayo de tracción que orientación de impresión nos proporciona el mayor valor de Esfuerzo de tracción último y el mayor valor de Porcentaje de Elongación.

Diseño y fabricación de probetas

La probeta a diseñar es la propuesta por la norma ASTM D1708 – 18 (Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics by Use of Microtensile Specimens), cuya forma y dimensiones se aprecia en la Figura 26.

Figura 26

Medidas de la probeta propuestas por la norma ASTM D1708.



Nota. Todas las medidas están en milímetros.

Materiales y equipos

- Resina Elastic 50A marca Formlabs
- Alcohol Isopropílico al 97%
- Máquina de lavado y curado marca Creality
- Impresora de resina Form3 marca Formlabs
- Computador personal con software: SolidWorks y PreForm

Diseño CAD y obtención del archivo STL. El primer paso es realizar el diseño CAD de la probeta de la Figura 26, para esto se hace uso del software SolidWorks y una vez obtenido el CAD en 3D de la pieza, el siguiente paso es obtener el archivo STL que consiste en un mallado de triángulos del CAD original.

Parámetros de impresión. Los parámetros de impresión consisten en la orientación de impresión de cada capa de material y el espesor de esta, las orientaciones de impresión a usar son: ZY, C+45 from XY y B-45 from XY) como se muestra en la Figura 14 (Capítulo II), mientras que, el espesor de capa que permite usar la resina Elastic 50A es únicamente de 0,1 milímetros, adicional, es importante colocar soportes en cada probeta para que la impresión resulte eficaz.

Poscurado. Una vez se obtiene la impresión de la probeta, el último paso es realizar un poscurado en la máquina de lavado y curado, cuyo proceso según el fabricante consiste en un lavado en alcohol isopropílico durante 20 minutos, luego se extrae y se deja secar por 5 minutos y finalmente, se somete a la presencia de rayos UV por otros 20 minutos sobre una cama a 60°C.

Este procedimiento se repite para cada probeta y pieza impresa en resina Elastic 50A para que obtenga sus características finales según su fabricante (Formlabs, 2020a).

Ensayo de tracción

El ensayo de tracción es el propuesto por la norma ASTM D1708.

Materiales y equipos

- Probetas impresas en resina Elastic 50A
- Máquina de ensayos universales
- Computador personal con software: Minitab® (Minitab Inc., V20.3 estudiantil)

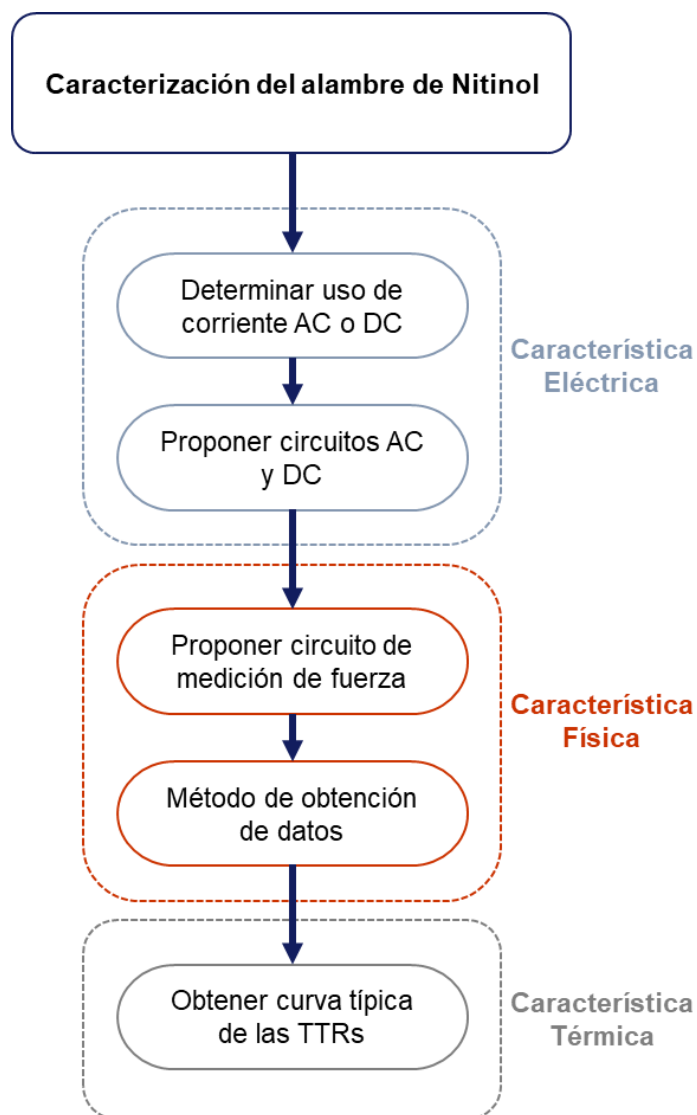
Cantidad de probetas. Al tratarse de un ensayo destructivo, se propone ensayar 5 probetas para cada orientación, es decir, un total de 15 probetas. Esto con el objetivo de obtener el resultado más aproximado y real de cada orientación de impresión y determinar cuál es la mejor.

Caracterización del alambre de Nitinol

El proceso a seguir para la caracterización del alambre de Nitinol se muestra en la Figura 27, donde se divide en 3 subprocesos.

Figura 27

Diagrama de flujo para el proceso de Caracterización del alambre de Nitinol.



Característica eléctrica

Con referencia en el Capítulo II se conoce que el alambre de Nitinol para volver a su forma original necesita de un cambio magnético o térmico, para este caso, se trabajó con el calentamiento mediante el efecto Joule, el cual nos dice que en un material conductor por

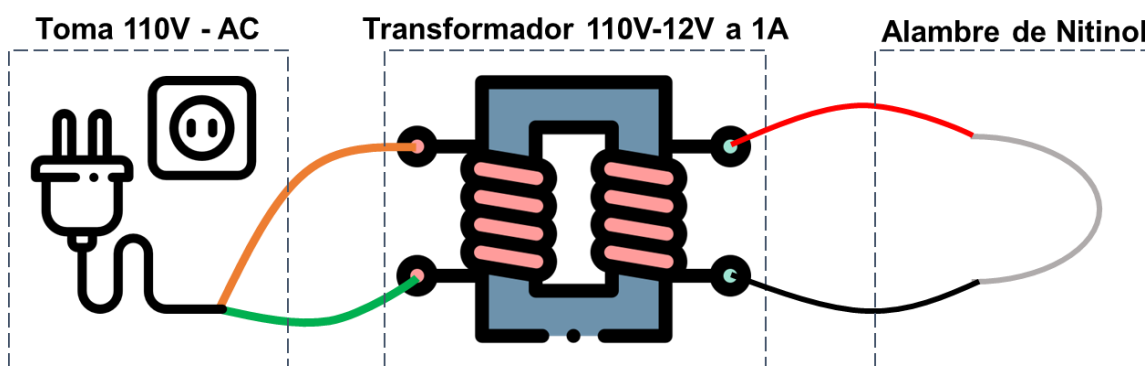
donde circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética provocada por el choque de electrones con los átomos del material, se transforma en energía térmica (Escola d'Oficis Catalunya, 2022). En otras palabras, el alambre de Nitinol se calienta si inducimos corriente eléctrica a través de este y, mientras más corriente se aplique, más se calentará el alambre. Sin embargo, es importante determinar un valor óptimo de electricidad ya que grandes valores de corriente si bien calientan más rápido el alambre, generan mayor riesgo de accidentes y requieren de altos voltajes de operación.

Determinar el uso de corriente AC o DC. La corriente eléctrica se puede presentar en modo alterna (AC) cuando esta tiene un flujo bidireccional, o continua (DC) cuando el flujo es unidireccional, dependiendo de la aplicación es conveniente usar AC o DC, por lo tanto, se realizaron pruebas de funcionamiento con ambos tipos para determinar con cual corriente el alambre de Nitinol presenta mejores resultados de actuación (calentamiento), considerando el tiempo.

Circuito AC

Figura 28

Diagrama del circuito AC.



Nota. Los cables de color naranja y verde representan el cable paralelo para 110V, los cables rojo y negro representan los cables eléctricos de calibre 16.

Materiales y equipos

- Transformador AC-AC 110V a 12V de 1A
- Cable paralelo blanco para 110V con su conector a enchufe
- Cable eléctrico calibre 16
- Alambre de Nitinol diámetro 1mm

Para el uso de corriente AC se propone el circuito que se muestra en el diagrama de la Figura 28. La principal ventaja de usar un transformador AC-AC es que se puede conectar en corto y este seguirá en funcionamiento.

Limitaciones

- El transformador al estar trabajando en corto, eventualmente se calienta y por naturaleza, la corriente no es siempre constante.
- Requiere de un sistema de enfriamiento para que la vida útil del transformador no se acorte.

Circuito DC – 1

Materiales y equipos

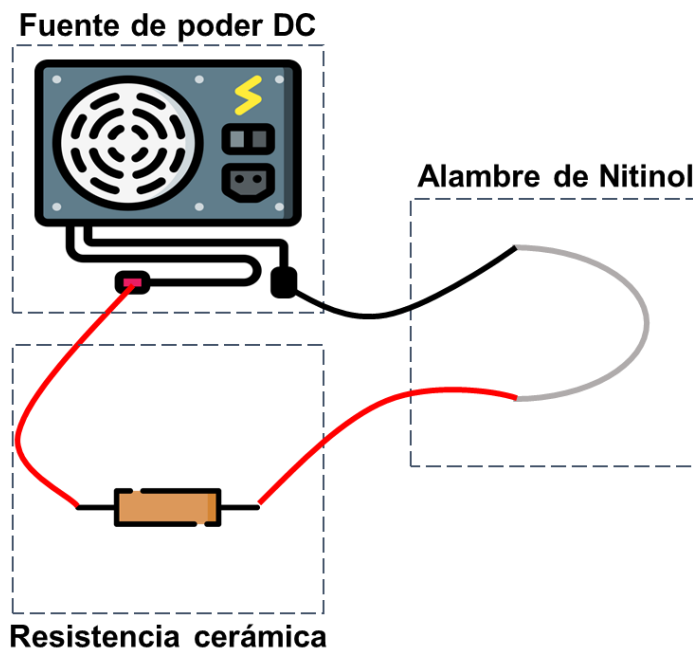
- Fuente de alimentación DC de 550 [W], 12[V] y 24[A]
- Cable eléctrico calibre 16
- Resistencia cerámica
- Circuito de control de corriente
- Alambre de Nitinol diámetro 1mm

Para comparar el circuito de corriente DC con el circuito AC, se propone usar un voltaje DC de 12 voltios con una corriente de 1 amperio. De igual manera, el objetivo es colocar el alambre de Nitinol en paralelo a la fuente de alimentación, sin embargo, al estar en corto, ésta se apaga por protección.

La primera solución al problema es colocar el Nitinol en serie con una resistencia de potencia.

Figura 29

Diagrama del circuito DC-1 para la solución 1.



Nota. Los cables rojos y negro, representan los cables eléctricos de calibre 16, la resistencia cerámica tiene valores menores a 1 Ohmio y potencia de 10 a 20 watts.

Limitaciones – solución 1

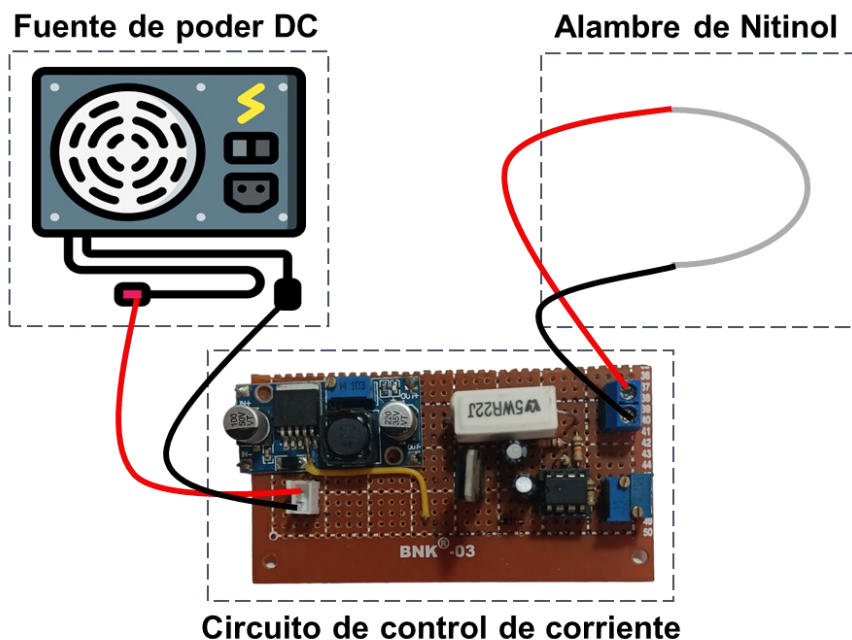
- El circuito sufre una caída de voltaje a menos que se use una resistencia menor a 1 Ohmio, pero de alta potencia.
- La resistencia es quien disipa todo el calor generado y el Nitinol no sufre calentamiento.

La segunda solución es agregar un circuito de control de corriente entre la fuente y el Nitinol y así someter a corto al circuito y no a la fuente.

Circuito de control de corriente. Este circuito básicamente funciona como un cargador de baterías, es decir, funciona a corriente constante cuando se coloca una carga (batería) en paralelo. El diseño de este circuito fue tomado y adaptado de (Mundo Electrónica, 2020) cuyo diagrama esquemático se presenta en el Apéndice A, así mismo, el datasheet de los componentes usados, LM2596, LM358, LM7805 se encuentran en los Apéndices B, C y D respectivamente.

Figura 30

Diagrama del circuito DC-1 para la solución 2.



Nota. Los cables rojos y negros, representan los cables eléctricos de calibre 16.

Limitaciones – solución 2

- A pesar de que se mantiene constante la corriente, existe una caída de voltaje a cero.

Circuito DC – 2

Materiales y equipos

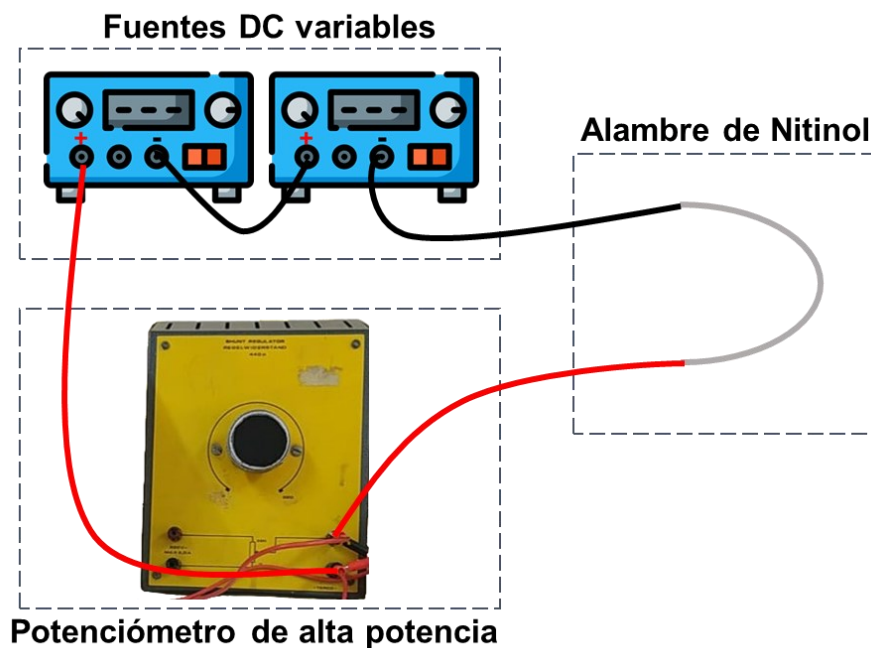
- 2 Fuentes variables de voltaje y amperaje (30 [V] y 3 [A] cada una)

- Cables tipo banana-lagarto calibre 16
- Potenciómetro de alta potencia (0 – 220 Ohmios)
- Alambre de Nitinol diámetro 1mm

Debido a las limitaciones que el circuito DC – 1 presenta, se propone el circuito mostrado en la Figura 31, en donde la ventaja es el uso del potenciómetro de alta potencia y así evitar una caída de voltaje, por otro lado, al usar 2 fuentes variables conectadas en serie, se busca usar el máximo voltaje y corriente (60V y 3A) para que el alambre de Nitinol se caliente a pesar de que el potenciómetro también lo haga.

Figura 31

Diagrama del circuito DC-2.



Nota. Los cables rojos y negros, representan los cables eléctricos de calibre 16.

Limitaciones

- El potenciómetro de alta potencia disipa todo el calor y el Nitinol no logra calentarse.

Característica física

En el Capítulo II se menciona que, si el alambre de Nitinol se encuentra bajo una fuerza externa u oposición durante su proceso de recuperación de forma, éste puede generar una gran fuerza capaz de eliminar dicha oposición.

Materiales y equipos

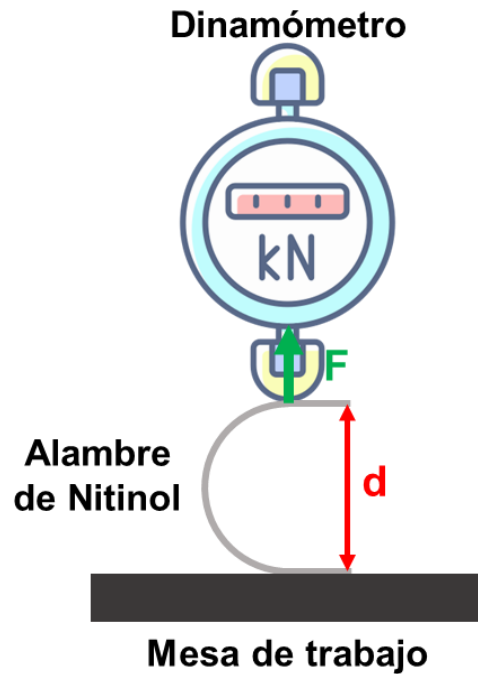
- Sensor de fuerza o dinamómetro digital FG – 3006 de 100N (una extracción del manual de usuario se encuentra en el Apéndice E)
- Acople para el dinamómetro
- Acople para el alambre de Nitinol
- Alambre de Nitinol diámetro 1mm
- Circuito eléctrico de actuación
- Computador personal con software: EDMS® (Shimpo, V4.9.01), SolidWorks

Circuito de medición de fuerza. Se propone deformar el alambre de Nitinol como se muestra en la Figura 32, debido a que según (Qu et al., 2011), nos menciona que es importante tener en cuenta que el radio de deformación debe ser mayor a 10 veces el diámetro del alambre para no someterlo a una deformación plástica y lograr una recuperación de forma completa. Es así que, la curvatura en forma de “C” que se aprecia en la Figura 32 tiene un diámetro “d” mayor a 20 milímetros.

Luego se propone colocar el sensor de fuerza con su acople respectivo para que al momento de recuperación de forma del Nitinol, éste se encuentre con una oposición y genere una fuerza perpendicular hacia arriba la cual será medida por el dinamómetro.

Figura 32

Diagrama del circuito propuesto para medir la fuerza del alambre de Nitinol.



Nota. La flecha verde representa la fuerza F en dirección perpendicular respecto a la mesa de trabajo y la dimensión “ d ” representa el diámetro de curvatura del alambre de Nitinol.

Diseño y fabricación del acople para el alambre de Nitinol. Para que el alambre de Nitinol se mantenga fijo en la posición antes mencionada es necesario un acople, este fue diseñado en SolidWorks con medidas personalizadas para el alambre de 1 milímetro de diámetro. Se obtuvo el modelo CAD y luego el archivo STL para la impresión en 3D.

En la Figura 33 se aprecia el acople diseñado mientras que la Figura 34 es como finalmente queda el circuito de medición de fuerza.

Figura 33

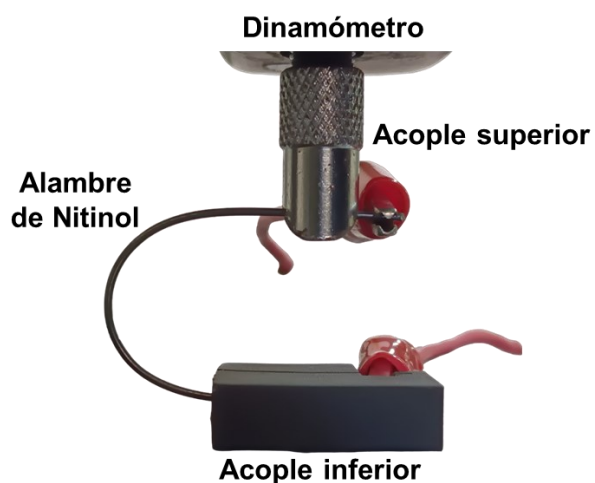
Acople para el alambre de Nitinol impreso en 3D.



Nota. En la Figura 34 se encuentra con el nombre “Acople inferior”, el plano respectivo se encuentra en el Apéndice F.

Figura 34

Circuito final para medir la fuerza del alambre de Nitinol.



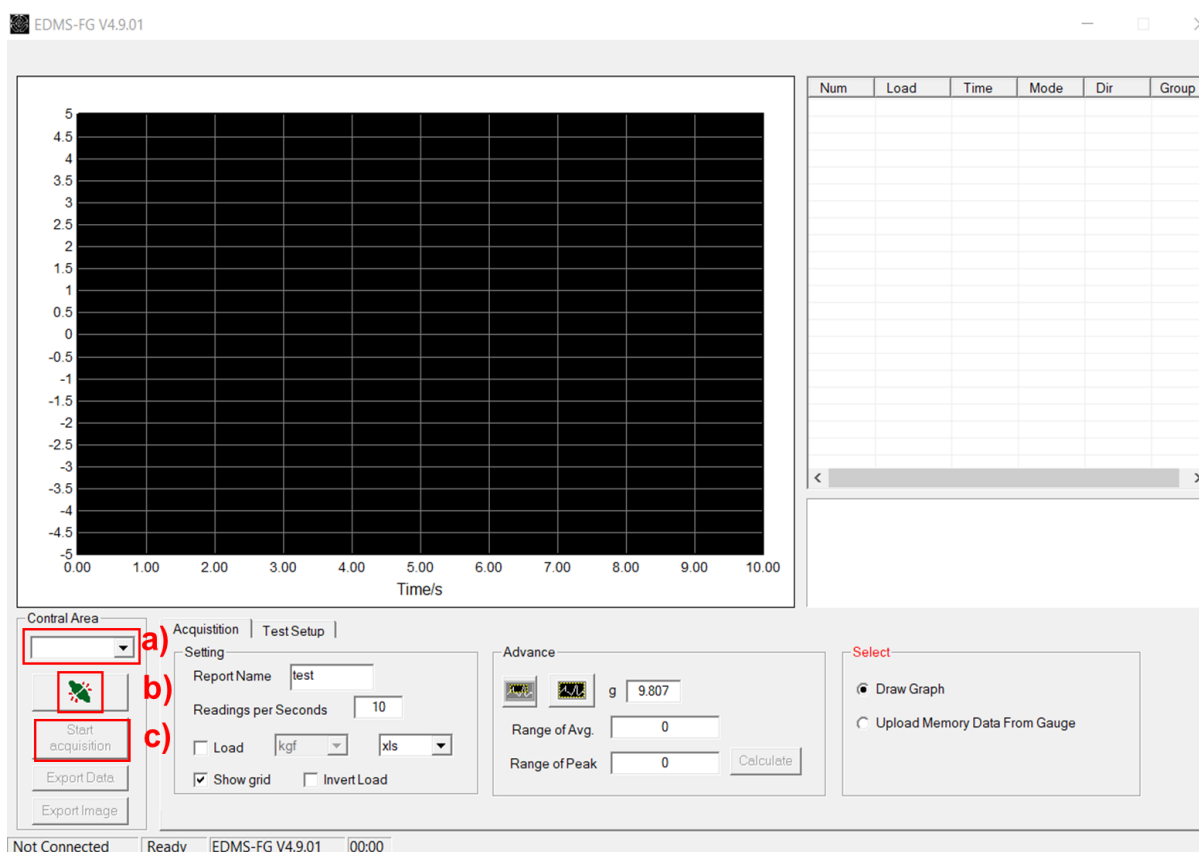
Nota. Los cables rojos con terminación lagarto, son los que suministran la corriente.

Medición de fuerza y obtención de datos. Con el circuito de fuerza listo, lo siguiente es hacer que el alambre de Nitinol trate de recuperar su forma original (totalmente recto) y durante esta acción, medir la fuerza que éste ejerce sobre el dinamómetro. Para esto se hace uso del software EDMS que es propio del sensor de la marca FG-3006, cuya interfaz se muestra en la Figura 35.

Para empezar la toma de datos, se necesita conectar el sensor de fuerza a nuestro computador mediante un cable USB y seleccionar el puerto COM en la interfaz, luego dar clic en el ícono de conectar y finalmente en el ícono “Start acquisition”. De esta forma se obtendrán los datos de fuerza en unidad de Newtons [N] captados por el sensor.

Figura 35

Interfaz del software EDMS.



Nota. a) Selector del puerto COM, b) ícono para conectar y c) ícono “Start acquisition”.

Cantidad de probetas y mediciones. Se propone realizar 5 mediciones de fuerza a 1 sola probeta para realizar un promedio y obtener un dato de fuerza más aproximado.

Característica térmica

Obtención de la curva típica de TTRs. La curva típica de TTRs nos permite conocer las temperaturas de transformación del alambre de Nitinol y saber cuáles son sus valores con una mejor aproximación a la realidad. Según el fabricante Nexmetal, la temperatura de transformación A_s del alambre de Nitinol es de 40°C y las otras temperaturas no se conocen (Nexmetal Corporation, n.d.).

Como se trató en el Capítulo II, existen 3 métodos para la obtención de las TTRs, sin embargo, considerando las limitaciones de los métodos 1 y 2, se propone usar el método 3.

Prueba A_f activo – método 3. Este método nos proporciona una gráfica como la que se muestra en la Figura 20, de donde se puede obtener las temperaturas A_s y A_f , las cuales son las temperaturas para conocer a qué temperatura el alambre de Nitinol empieza a volver a su forma original y a cuál termina de hacerlo.

La limitación de este método es que no se puede obtener las temperaturas M_s y M_f , que permiten conocer a qué temperatura el material puede empezar a ser deformado sin que éste aplique resistencia. Sin embargo, en este estudio se consideró que no es completamente necesario conocer este dato y se da prioridad a la fácil aplicación del método y las temperaturas A_s y A_f son más importantes de conocer, ya que proporcionan la información para saber qué temperatura hace actuar al alambre de Nitinol.

Materiales y equipos

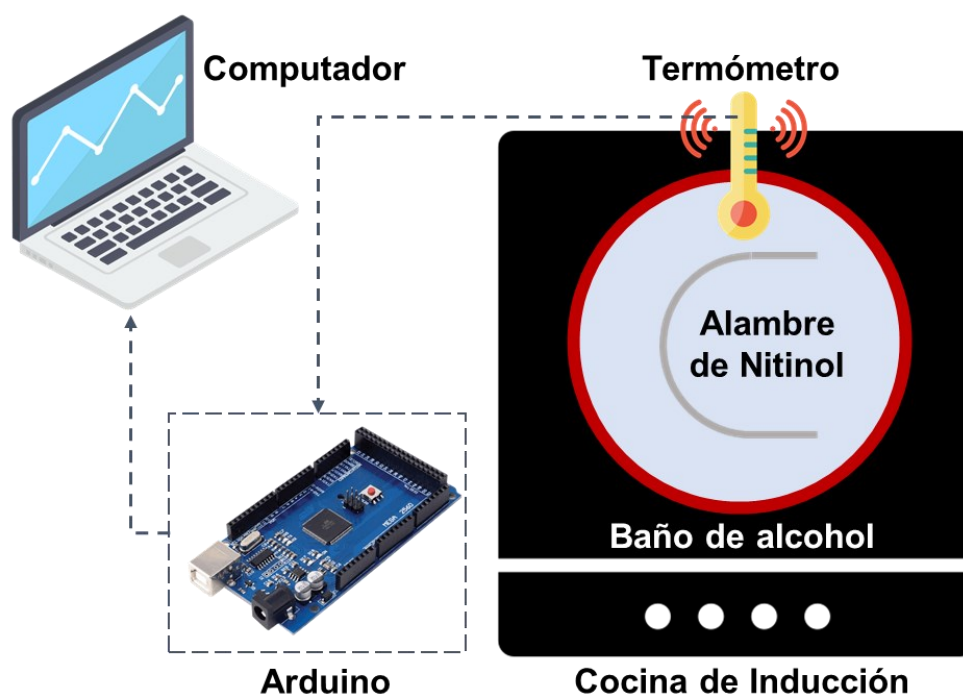
- Alcohol etílico al 70% (de uso antiséptico)
- Recipiente para el baño
- Sensor de temperatura (termistor SCK 103 acondicionado con resistencia $10\text{k}\Omega$), cuyo datasheet se encuentra en el Apéndice G.
- Arduino Mega
- Cámara de celular

- Computador personal con software Arduino IDE® (Arduino LLC, V2.0.3) y AutoCAD® (Autodesk, versión 2024 estudiantil) y Minitab
- Alambre de Nitinol

El procedimiento para obtener la curva típica de TTRs se muestra en el diagrama de la Figura 36.

Figura 36

Diagrama del circuito para obtención de curva típica de TTRs.



Adquisición de datos de temperatura y fotos de los ángulos de inclinación

Los pasos a seguir se detallan a continuación:

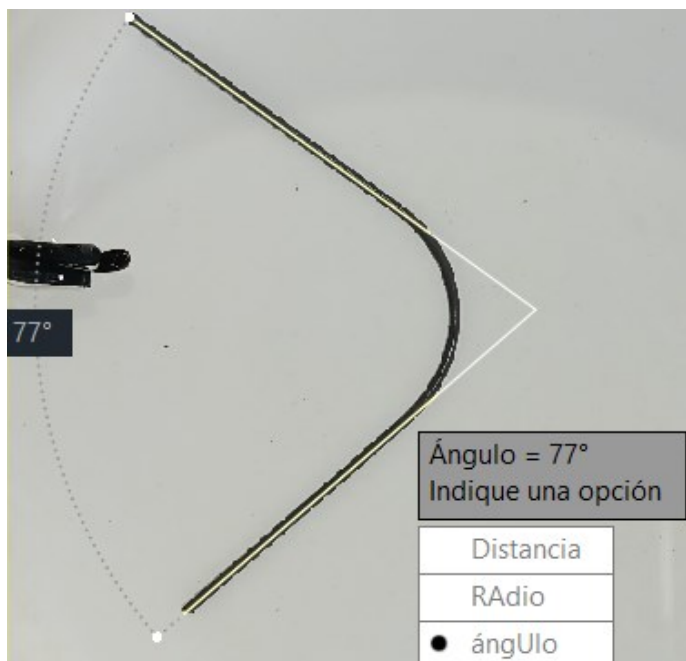
1. Darle la forma de "C" al alambre de Nitinol y colocarlo en el recipiente vacío
2. Acondicionar el sensor de temperatura en el recipiente vacío
3. Verter el alcohol en el recipiente una cantidad suficiente para que cubra el alambre de Nitinol y el sensor de temperatura

4. Empezar a calentar gradualmente el recipiente mediante una cocina de inducción
5. Ir tomando datos de temperatura con el computador mediante la placa Arduino
6. Ir tomando fotos de los ángulos de inclinación que va teniendo el alambre durante su transcurso de recuperación de forma
7. Una vez que el alambre recupere totalmente su forma, interrumpir el calentamiento y finalizar la toma de datos y fotos

Obtención de grados de inclinación. Mediante el software AutoCAD, importar las fotos y medir los grados de inclinación de cada foto, la Figura 37 muestra un ejemplo de este procedimiento.

Figura 37

Ejemplo de un ángulo de inclinación medido con AutoCAD.



Determinación de las TTRs. Mediante el software Minitab, se grafica la curva resultante con los datos de temperatura (en el eje X) y grados de inclinación (en el eje Y). En la curva se procede a identificar los valores de A_s y A_f tal como se indica en la Figura 20.

Diseño de plataforma de productos para aplicaciones de impresión 3D con actuación de aleaciones con memoria de forma

El objetivo principal del presente trabajo busca estudiar la combinación de impresión 3D con actuación de aleación con memoria de forma y validar dicha combinación diseñando y creando un componente que tenga una aplicación de robótica blanda.

La aplicación específica que se propone es un dedo para una prótesis de mano, por lo tanto, es necesario establecer las características de este componente.

Liou (2019) en el Capítulo 2 de su libro “Rapid Prototyping and Engineering Applications”, habla de la importancia del prototipado de un producto y propone cuatro tareas que se deben tomar en cuenta:

Tarea 1: Diseño conceptual del prototipo

El prototipo debe cumplir con los requerimientos del cliente y brindar la solución a la problemática propuesta.

Tarea 2: Diseño de configuración de piezas y componentes prototipo

Habla de la importancia del diseño de piezas con configuraciones estándar, es decir, garantizar el uso de herramientas o componentes disponibles en el mercado.

Tarea 3: Diseño paramétrico

Donde se debe definir las dimensiones principales y la información de tolerancia, así como los materiales necesarios.

Tarea 4: Diseño detallado

Esta tarea menciona que se deben proporcionar las dimensiones restantes, tolerancias y la información del material para los planos de ingeniería (Liou, 2019).

Tabla de diseño

Haciendo referencia a las tareas 3 y 4, el prototipo creado para la aplicación de este proyecto se basó en las tablas de diseño presentadas en los Apéndices H, I y J, en donde se puede apreciar las dimensiones y características que tendrá el componente.

La Tabla 1 extraída del Apéndice H, muestra las posibles dimensiones y características que puede tener el prototipo.

Tabla 1

Tabla de diseño – Celosía Hexagonal.

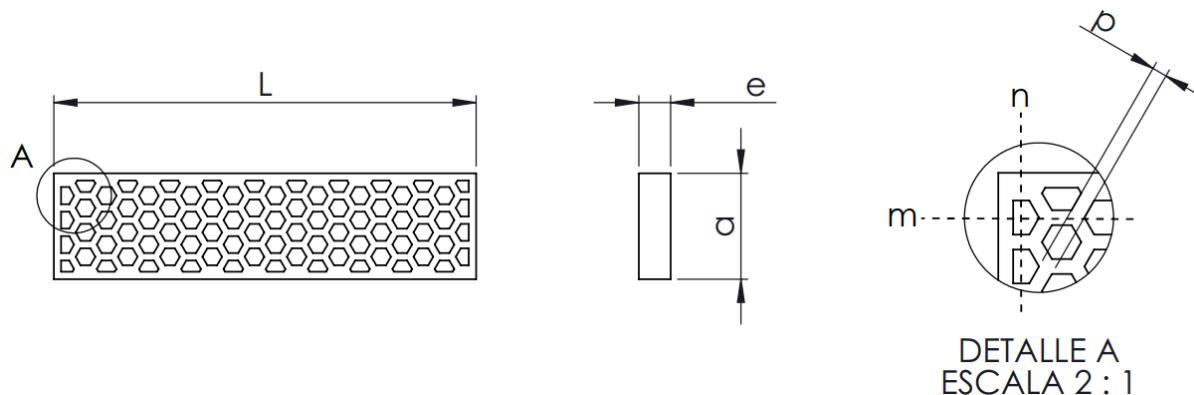
Área	a	e	L	m	n	p	Celosía
66,50		4,5	60			-0,407	
162,90	15	11	80	20	4	-0,528	Hexagonal
-	-	-	-			-0,670	

Nota. Todas las dimensiones están en milímetros, excepto el Área (en milímetros cuadrados), m y n (en unidades).

Así mismo, la Figura 38 extraída del Apéndice H muestra el prototipo propuesto correspondiente con la Tabla 1.

Figura 38

Dimensiones del prototipo propuesto referentes a la Tabla 1.



Las dimensiones y características de la Tabla 1 fueron estudiadas y escogidas por diferentes razones, a continuación, se detalla la justificación de cada una, teniendo en cuenta que el prototipo se trata de un dedo índice para una prótesis de una mano.

Largo (L). Esta dimensión representa el largo que puede tener el prototipo y según Fernández (2017) en su artículo “Dimensión vertical oclusal mediante antropometría de los dedos de la mano”, encontró que la medida mínima y máxima del dedo índice de una población

de 151 adultos jóvenes (76 hombres y 75 mujeres) es de 59,61 milímetros y 81,05 milímetros, respectivamente (Fernández et al., 2017). Por lo tanto, se estableció redondear estos valores a números enteros y múltiplos de 10, obteniendo así un mínimo de 60 milímetros y un máximo de 80 milímetros como posibles dimensiones para el largo del prototipo.

Área. Este es un valor necesario para determinar el ancho y espesor del prototipo, se trata del área transversal promedio que tiene el hueso metacarpiano (el más próximo a la muñeca) del dedo índice. Según Soto (2013) en su artículo “Características Biométricas de los Huesos Metacarpianos en Individuos Chilenos”, donde realizó radiografías a 52 manos de individuos de ambos sexos, encontró que el diámetro promedio en la zona central del hueso metacarpiano II (del dedo índice) fue de $11,7 \pm 2,2$ milímetros en individuos masculinos y $11,8 \pm 2,6$ milímetros en individuos femeninos (Soto et al., 2013).

Con estos valores, se escogió un valor mínimo de 9,2 milímetros ($11,8 - 2,6$) y un valor máximo de 14,4 milímetros (resultado de $11,8 + 2,6$) para obtener el área transversal del hueso (considerándolo como un cilindro). Por lo tanto, el área transversal estará entre un valor de 66,5 y 162,9 milímetros cuadrados.

Ancho (a). Con el objetivo de estandarizar este valor para el prototipo, y ya que el ancho de un dedo índice en un humano (considerando grasa y piel) es muy variable, se estableció un valor fijo de 15 milímetros.

Espesor (e). Como se aprecia en la Figura 38, el prototipo tiene un área transversal rectangular, se estableció esta forma ya que la aplicación es un dedo de una prótesis el cual requiere ser doblado y resulta más fácil realizar esto en un área rectangular que en un área circular ya que presentaría mayor oposición al doblado.

El espesor se calcula con el área mínima y máxima antes obtenidas y el ancho fijo establecido. Por lo tanto, el espesor se encuentra entre valores de 4,4 y 10,9 milímetros.

Se estableció redondear estos valores a su decimal superior, es decir, un espesor mínimo de 4,5 milímetros y uno máximo de 11 milímetros.

Celosía. Como se estudió en el Capítulo II, el uso de celosías ayuda a tener un cuerpo poroso, pero garantizando el mismo funcionamiento y resistencia. Para la aplicación de doblado que debe tener el prototipo es necesario incluir esta característica ya que resulta más fácil doblar un cuerpo poroso que un cuerpo 100% sólido, para el estudio, se estableció analizar 3 tipos de porosidad, 30%, 40% y 50%, de esta forma se estudiará cual porcentaje de porosidad brinda mayor facilidad de doblado al prototipo.

Para el prototipo se decidió usar celosías planas, ya que estas presentan patrones periódicos y resulta conveniente hacer una comparativa entre patrones regulares. Se escogieron 3 tipos de patrones: Hexagonal, Triangular y Romboide.

Los valores m , n y p representan factores propios de cada patrón, estos valores se presentan en la Tabla 2 para una mejor comprensión.

Tabla 2

Valores m , n y p para cada tipo de celosía.

Celosía	m	n	p		
Hexagonal	20	4	-0,407	-0,528	-0,670
Triangular	29	5	-0,290	-0,369	-0,462
Romboide	16	4	-0,350	-0,453	-0,568

Nota. Estos valores fueron tomados de las tablas de diseño de los Apéndices H, I y J.

Los valores m y n se refieren al número de (hexágonos, triángulos o rombos) que tiene el prototipo a lo largo y ancho, respectivamente. El valor p se refiere al factor de “offset” o a la distancia entre cada (hexágono, triángulo o rombo) y tiene valores negativos debido a la dirección de “offset” (hacia adentro), esta distancia representa el porcentaje de porosidad mencionado anteriormente, una mayor distancia genera un porcentaje de porosidad mayor.

Como se observa, para los parámetros área, espesor y largo, se tienen valores mínimos y máximos con los cuales trabajar, teniendo en cuenta que un limitante para el estudio es el material de impresión (Resina Elastic 50A) se establece trabajar con los valores mínimos, además, al buscar una mejor capacidad de doblado para el prototipo, se debe trabajar con el área menor y con los parámetros que esta involucra.

Diseño experimental

Para estudiar la combinación del componente impreso en 3D con el alambre de Nitinol, es fundamental proponer un diseño experimental que facilite identificar las variables de entrada que más influencia tienen en la salida o el resultado final.

Especificación de la meta

El estudio de la combinación de impresión 3D con actuación de aleación de memoria de forma tiene como objetivo determinar los mejores factores de estructura e integración para obtener un componente impreso en 3D con estructura porosa tipo celosía y con memoria de forma, que actúe como una alternativa de una prótesis de dedo.

Factores y niveles

Para identificar los factores que tienen mayor influencia en ese estudio, se realiza el diagrama de Ishikawa o espina de pescado mostrado en la Figura 39, de donde se ha resaltado 2 grupos de factores.

Grupo 1

- Orientación de impresión.
- Dimensiones del componente (Largo, ancho y espesor).

Respecto a la orientación de impresión, se usará una sola y se escogerá mediante los resultados obtenidos durante la caracterización del material. Mientras que, para las dimensiones de largo, ancho y espesor de las respectivas tablas de diseño, como se mencionó

se usarán los valores mínimos para el caso del largo y espesor y ya que el ancho tiene un valor fijo, todos los factores del grupo 1 tendrán un valor constante.

Grupo 2

- Tipo de celosía plana.
- Porcentaje de porosidad.

Los factores de este grupo no pueden tener valores constantes, ya que como se vio en las tablas de diseño, el objetivo del estudio es realizar una comparativa entre los distintos tipos de celosía y los porcentajes de porosidad. Por lo tanto, los factores y sus respectivos niveles para el estudio son los que se presentan en la Tabla 3.

Figura 39

Diagrama de Ishikawa para determinar factores y niveles influyentes en el estudio.

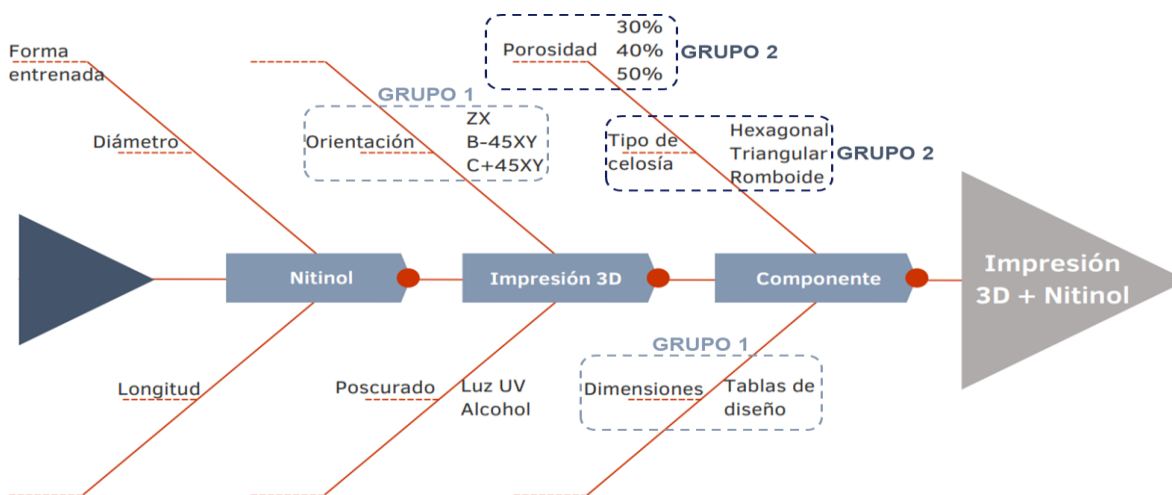


Tabla 3

Factores y niveles para el diseño experimental.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tipo de Celosía Plana	Hexagonal	Romboide	Triangular
Porcentaje de Porosidad	30%	40%	50%

Nota. El porcentaje de porosidad se mide en función del volumen total del componente.

Método del diseño experimental

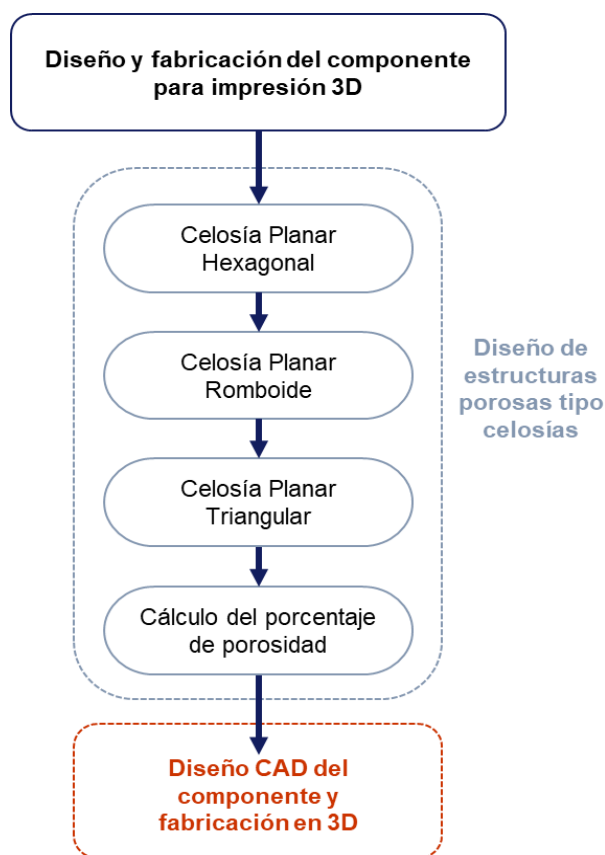
Según la Tabla 3, se propone un diseño experimental de Taguchi L9, con 2 factores, 3 niveles y 3 réplicas que resultan en un total de 27 corridas. Es decir, se tendrán 9 probetas y a cada una se realizará 3 veces el experimento ya que se trata de un ensayo no destructivo, el experimento propuesto se detalla más adelante en el apartado *Método de actuación y evaluación*.

Diseño y fabricación del componente para impresión 3D

Para la obtención del componente impreso en 3D, se propone el diagrama de la Figura 40, donde se divide en 2 subprocesos.

Figura 40

Diagrama para el diseño y fabricación del componente para impresión 3D.



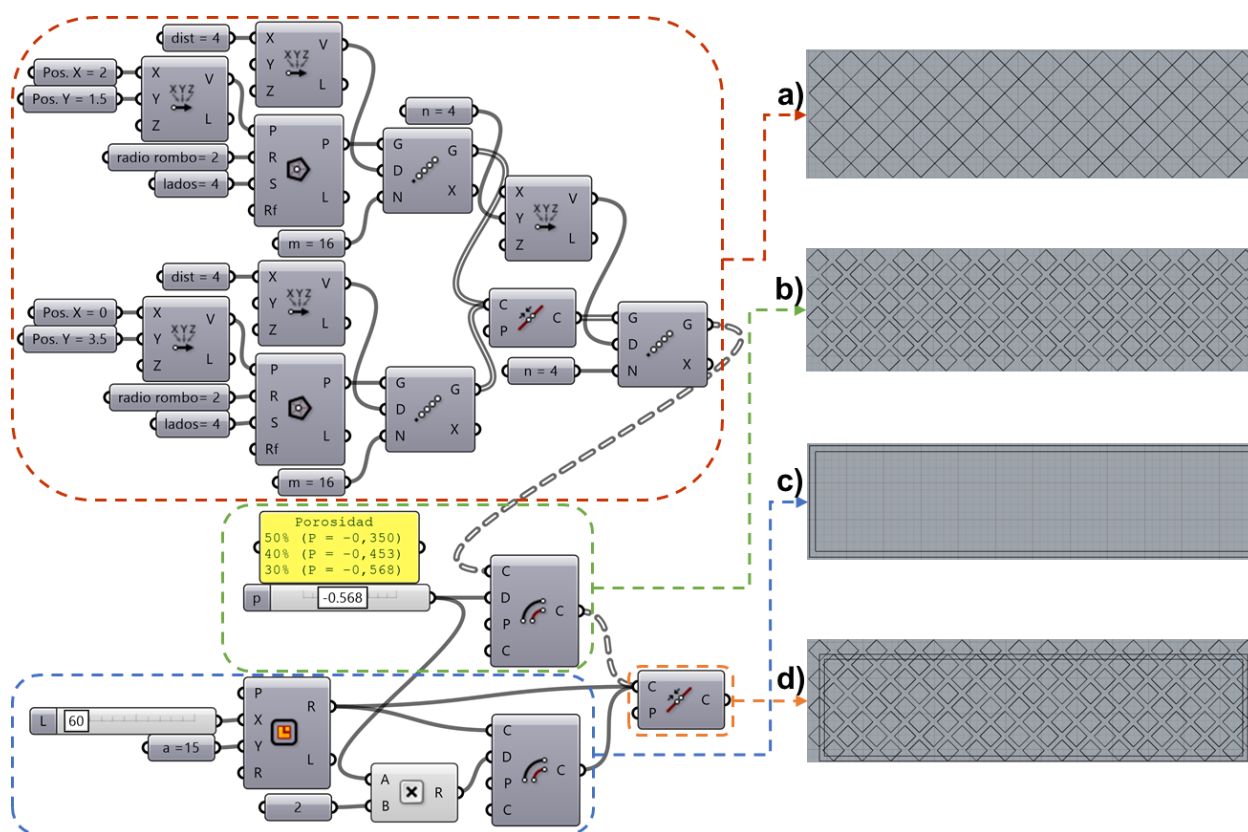
Nota. El subproceso *Diseño CAD del componente y fabricación en 3D* se detalla en el diagrama de la Figura 44.

- *Patrón periódico:* para el caso, se trata de una matriz de hexágonos en donde se puede cambiar el tamaño del hexágono como la distancia entre cada uno de ellos o el llamado offset.

Celosía Planar Romboide

Figura 42

Programación en Grasshopper para Celosía Planar Romboide.



Nota. a) Patrón periódico romboide, b) patrón periódico romboide con offset “p”, c) dimensión del componente rectangular con offset y d) unión de b) y c).

En la Figura 42 se observa la programación en bloques para la obtención del componente con una estructura tipo Celosía Planar Romboide. Así mismo, las características principales que se observan son:

- *Dimensión del componente:* las mismas medidas de 60x15 milímetros que corresponden a las medidas del componente rectangular en largo y ancho.

- *Patrón periódico*: para el caso, se trata de una matriz de triángulos en donde también se puede cambiar el tamaño del triángulo, así como el offset entre cada uno de ellos.

Cálculo del porcentaje de porosidad. En las Figuras 41, 42 y 43 se observa un apartado de valor “p” el cual tiene 3 valores y cada uno de ellos representa el porcentaje de porosidad. Como se vio en el apartado de *Tabla de diseño*, este valor corresponde con la distancia de separación u offset que tiene cada patrón periódico. Además, se puede observar que son distintos valores para cada tipo de estructura, esto debido a la forma y cantidad de área que ocupa cada figura (hexágono, rombo y triángulo) en el plano 2D.

Para medir el porcentaje de porosidad de cada componente, se propone hacer uso de la herramienta “Propiedades físicas” del software SolidWorks, la cual nos facilita un cálculo aproximado del volumen del componente. De esta forma, se compara con el volumen total del rectángulo de dimensiones 60x15x4,5 milímetros y mediante la siguiente fórmula se obtiene el porcentaje de porosidad:

$$P = \left(1 - \frac{V_{comp}}{V_{total}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Donde,

P = Porcentaje de porosidad [%]

V_{comp} = Volumen del componente [mm^3]

V_{total} = Volumen del rectángulo total [mm^3]

Diseño CAD del componente y fabricación en 3D

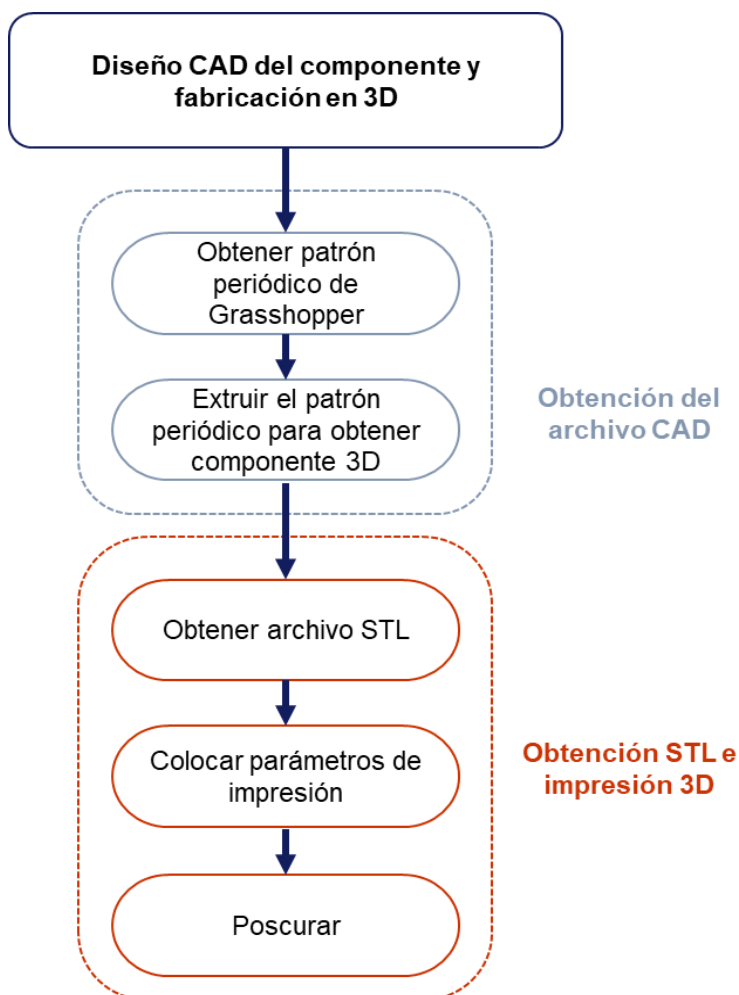
El proceso a seguir para la obtención del archivo CAD del componente y fabricación mediante impresión 3D es el que se muestra en el diagrama de la Figura 44.

Materiales y equipos

- Resina Elastic 50A marca Formlabs
- Alcohol Isopropílico al 97%
- Máquina de lavado y curado marca Creality
- Impresora de resina Form3 marca Formlabs
- Computador personal con software: SolidWorks y PreForm

Figura 44

Diagrama del proceso para obtención del archivo CAD.



Obtención del archivo CAD. Las celosías planares son patrones periódicos en 2D que se extruyen en una sola dirección para obtener una estructura en 3D, por lo tanto, luego de tener la programación en bloques de cada estructura y con ello el patrón periódico en 2D, se debe exportar en un archivo de dibujo, por ejemplo, “.dxf”; el cual se abre en el software SolidWorks donde se extruye el dibujo 2D la dimensión de 4,5 milímetros que corresponde al espesor del componente.

Obtención del archivo STL e impresión 3D. Para obtener el archivo STL e imprimir el componente, en SolidWorks, el mismo archivo CAD se guarda con la extensión “.stl”. Con esto se puede preparar la impresión en el software PreForm, colocando la orientación de impresión y los soportes respectivos.

Finalmente, luego de la impresión se realiza el poscurado cuyo procedimiento ya fue tratado en el apartado de *Caracterización*.

Entrenamiento del alambre de Nitinol

Como fue estudiado en el Capítulo II, el Nitinol tiene una forma establecida de fábrica, esta forma es la que se muestra en la Figura 45. Es importante mencionar que según las medidas del componente que son 60x15x4,5 milímetros establecidas en la tabla de diseño, se propone trabajar con un alambre de longitud 80 milímetros para que sobresalga 10 milímetros a cada lado del componente.

Figura 45

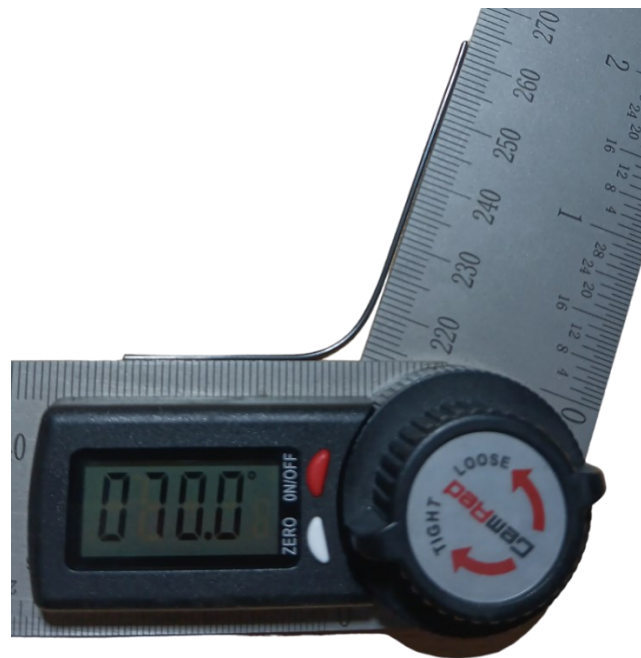
Alambre de Nitinol longitud 80 milímetros y forma de fábrica.



La Figura 45 representa la forma de fábrica que el alambre de Nitinol posee, por lo tanto, para la aplicación de este estudio se requiere darle una nueva forma la cual se muestra en la Figura 46, esta nueva forma propone que el alambre de Nitinol al ser calentado mediante corriente eléctrica, alcance una inclinación de 70° respecto a la horizontal.

Figura 46

Nueva forma propuesta para el alambre de Nitinol.



Nota. La nueva forma tiene una inclinación de 70° medidos respecto a la horizontal.

Entrenamiento de memoria de forma de 1 camino

Como se revisó en el Capítulo II, existe un solo método de entrenamiento para la memoria de forma de 1 camino.

Materiales y equipos

- Alambre de Nitinol de diámetro 1 milímetro
- Placa de acero Inoxidable espesor 6 milímetros
- 3 pernos M6x15 con tuerca
- Horno de alta temperatura marca Wild Barfield

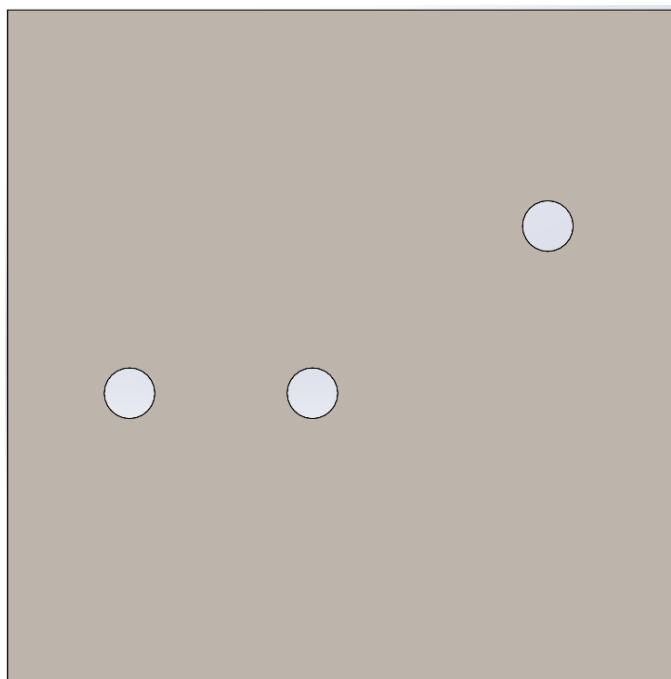
El método de entrenamiento consiste en calentar el alambre de Nitinol con la forma deseada (Figura 46) a una temperatura de 500°C durante 45 minutos, esto según la recomendación del fabricante Nexmetal.

Diseño y fabricación de placa de acero inoxidable. Para lograr calentar el alambre de Nitinol con la forma deseada a una temperatura de 500°C, es necesario diseñar y fabricar una placa de acero inoxidable para que, durante el proceso de calentamiento, el alambre no pueda deformarse a su forma de fábrica.

Diseño CAD para la placa. La Figura 47 muestra el diseño CAD que tendrá la placa para que mantenga la forma deseada al alambre, como se observa, se propone perforar 3 agujeros los cuales mediante pernos M6x15 y tuercas, mantendrán en su lugar al alambre de Nitinol durante el proceso de entrenamiento.

Figura 47

Diseño CAD para la placa de acero inoxidable.



Nota. Las dimensiones son 80x80x6 milímetros y los agujeros tienen un diámetro de 6 milímetros y son pasantes, el plano respectivo se encuentra detallado en el Apéndice K.

Fabricación de la placa de acero inoxidable. Para la fabricación de la placa, se optó por usar la tecnología de corte láser en metal, por lo tanto, mediante el archivo CAD de la Figura 47, se realizó el corte láser sobre una placa de acero inoxidable de espesor 6 milímetros. La razón de usar acero inoxidable fue porque dicho material trabaja a altas temperaturas, garantizando que los agujeros diseñados no sufran dilatación. El resultado es el que se muestra en la Figura 48.

Figura 48

Placa de acero inoxidable fabricada mediante corte láser en metal.

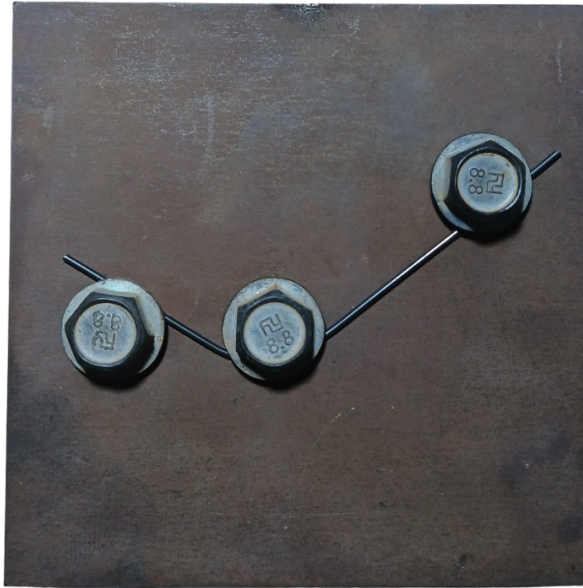


Nota. Se fabricaron 2 unidades, el color que se aprecia es debido a que ya fue sometido a la temperatura de 500°C.

La distribución de los agujeros en la placa y los pernos M6x15 garantizan mantener el alambre de Nitinol en la forma deseada, tal como se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Alambre de Nitinol con la forma deseada sobre la placa de acero inoxidable.

**Método de entrenamiento**

El método se detalla a continuación por pasos:

1. Colocar el alambre de Nitinol sobre la placa, tal como se muestra en la Figura 49.
2. Calentar el horno a una temperatura de 500°C.
3. Colocar la placa dentro del horno con pinzas y guantes de seguridad y dejarla en cocción durante 45 minutos.
4. Cumplido el tiempo, apagar el horno para extraer la placa. En este paso se propone 2 métodos de enfriamiento:
 - **Enfriamiento rápido:** extraer la placa del horno con pinzas y guantes de seguridad y realizar un enfriamiento rápido con agua.
 - **Enfriamiento lento:** hacer enfriar la placa dentro del horno apagado.

Se propone realizar los 2 métodos de enfriamiento y mediante la curva típica de TTRs determinar cuál método resulta conveniente aplicar.

Entrenamiento de memoria de forma de doble camino

Según el Capítulo II los métodos para entrenamiento de memoria de forma de doble camino son: *Entrenamiento activo, entrenamiento pasivo I, pasivo II y pasivo III.*

Método para entrenamiento Activo

Materiales y equipos

- Alcohol etílico al 70% (de uso antiséptico)
- 2 recipientes
- Sensor de temperatura (termistor SCK 103 acondicionado con resistencia 10k Ω)
- Arduino Mega
- Computador personal con software AutoCAD
- Alambre de Nitinol

El proceso a seguir para este método se detalla en pasos a continuación:

1. Preparar un baño caliente de alcohol a una temperatura de 50°C
2. Preparar un baño frío de alcohol a una temperatura de 10°C
3. Introducir el alambre de Nitinol en el baño caliente por 1 minuto
4. Sacar del baño caliente e introducir rápidamente en el baño frío el alambre durante 1 minuto, pero con la forma deseada.
5. Volver al paso 3 y repetir este proceso durante 20 veces

Limitaciones

- El paso 4 requiere un enfriamiento rápido y al mismo tiempo deformar el alambre a la forma deseada, es decir, colocar el alambre en la placa y ajustar los pernos, esto no se puede hacer en menos de 1 minuto.
- Una alternativa es darle la forma deseada con pinzas y de forma manual, sin embargo, no se tendrá una garantía de dar la misma forma siempre al hacerlo manualmente.

Método para entrenamiento Pasivo

Materiales y equipos

- Circuito de medición de fuerza (dinamómetro con los acoples)
- Circuito eléctrico de actuación
- Cables eléctricos calibre 16
- Alambre de Nitinol

El proceso a seguir para este método se detalla en pasos a continuación y varía según se trate del método pasivo I, pasivo II o pasivo III:

Pasivo I

1. Tener el alambre de Nitinol a temperatura ambiente y colocarlo en el circuito de medición de fuerza con la forma en "C"
2. Con el circuito eléctrico de actuación, calentar el alambre durante 1 minuto manteniendo la forma en "C"
3. Apagar el circuito eléctrico y dejar enfriar el alambre a temperatura ambiente
4. Volver al paso 2 y repetir el procedimiento 20 veces.

Pasivo II

1. Tener el alambre de Nitinol a temperatura ambiente y colocarlo en el circuito de medición de fuerza con la forma en "C"
2. Con el circuito eléctrico de actuación, calentar el alambre durante 1 minuto manteniendo la forma en "C"
3. Retirar el alambre del circuito de fuerza, pero manteniendo el circuito eléctrico, es decir, continuar el calentamiento
4. Volver a colocar el alambre en el circuito de fuerza y repetir el procedimiento 20 veces.

Pasivo III

1. Tener el alambre de Nitinol a temperatura ambiente y colocarlo en el circuito de medición de fuerza con la forma en “C”
2. Con el circuito eléctrico de actuación, calentar el alambre durante 1 minuto manteniendo la forma en “C”
3. Apagar el circuito eléctrico y dejar enfriar el alambre a temperatura ambiente
4. Retirar el alambre del circuito de fuerza y calentarlo nuevamente por 1 minuto.
5. Cumplido 1 minuto, colocar el alambre en el circuito de fuerza, pero manteniendo el calentamiento, dejarlo otro minuto
6. Volver al paso 3 y repetir este proceso 20 veces.

Limitaciones

- El método pasivo I no presenta ninguna limitación.
- Los métodos pasivos II y III presentan una limitación debido a que se requiere una manipulación del alambre al momento de sacarlo del circuito de fuerza o colocarlo mientras éste está en constante calentamiento.

De acuerdo a las limitaciones que algunos de los métodos presentan, se propone realizar el método Pasivo I para entrenar el alambre con memoria de forma de doble camino.

Integración de componentes y método de actuación y evaluación

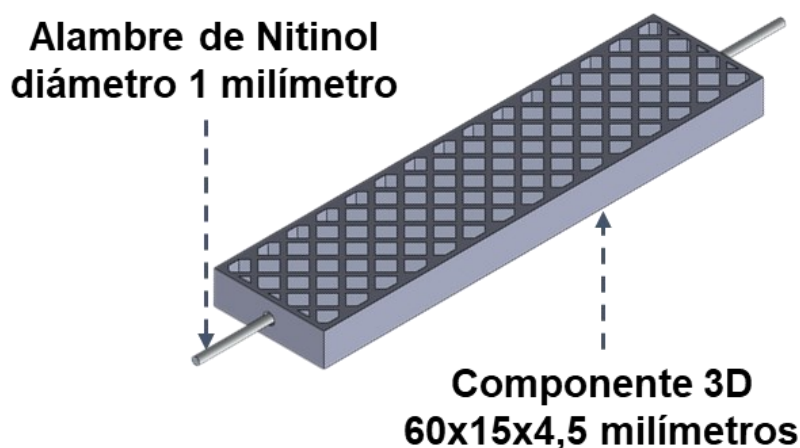
El objetivo de la integración es lograr que el componente impreso en 3D y el alambre de Nitinol trabajen conjuntamente como un solo elemento. Es decir, se busca hacer actuar al alambre de Nitinol con su característica de memoria de forma y éste a su vez hacer actuar al componente 3D con su característica flexible, de esta forma se tendrá un prototipo con característica de robótica blanda.

Integración del alambre de Nitinol

Para lograr integrar el alambre de Nitinol con el componente 3D, se propone realizar un agujero pasante en el eje axial del componente para lograr una integración como la que se muestra en la Figura 50.

Figura 50

Integración del alambre de Nitinol en el componente 3D.

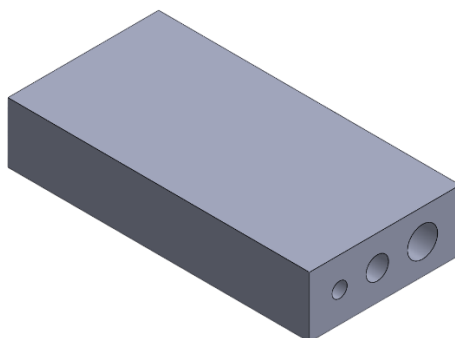


Para lograr una correcta integración de ambos componentes se propone realizar un componente 3D de prueba con 3 agujeros pasantes de distinto diámetro.

Diseño y fabricación del componente 3D de prueba para la integración

Figura 51

Diseño CAD del componente de prueba para la integración del Nitinol.



Nota. El plano respectivo se encuentra en el Apéndice L.

El objetivo de este componente de prueba es determinar que diámetro es el adecuado para la integración con el alambre de Nitinol. Se proponen 3 diámetros: 1, 1,5 y 2 *milímetros*.

Idealmente el diámetro adecuado debería ser el de 1 milímetro ya que el alambre de Nitinol tiene ese diámetro, sin embargo, la impresión 3D en la resina Elastic 50A presenta una resolución de 0,1 milímetros, por lo que el alambre podría o no caber dentro del agujero. Por esta razón, se propone un diámetro mayor que es el de 1,5 milímetros, así se garantiza que el alambre se integre sin problema. Ahora bien, se propone un diámetro más que es de 2 milímetros, la razón es para comparar con el de 1,5 milímetros y visualizar si el alambre queda muy flojo o si queda con el juego justo para introducir y sacar el alambre del componente 3D sin problemas.

El diseño CAD se muestra en la Figura 51, sus dimensiones de 20x10x4 milímetros son para optimizar el uso del material de impresión. Una vez se imprime, se debe realizar el procedimiento de poscurado.

Método de actuación y evaluación

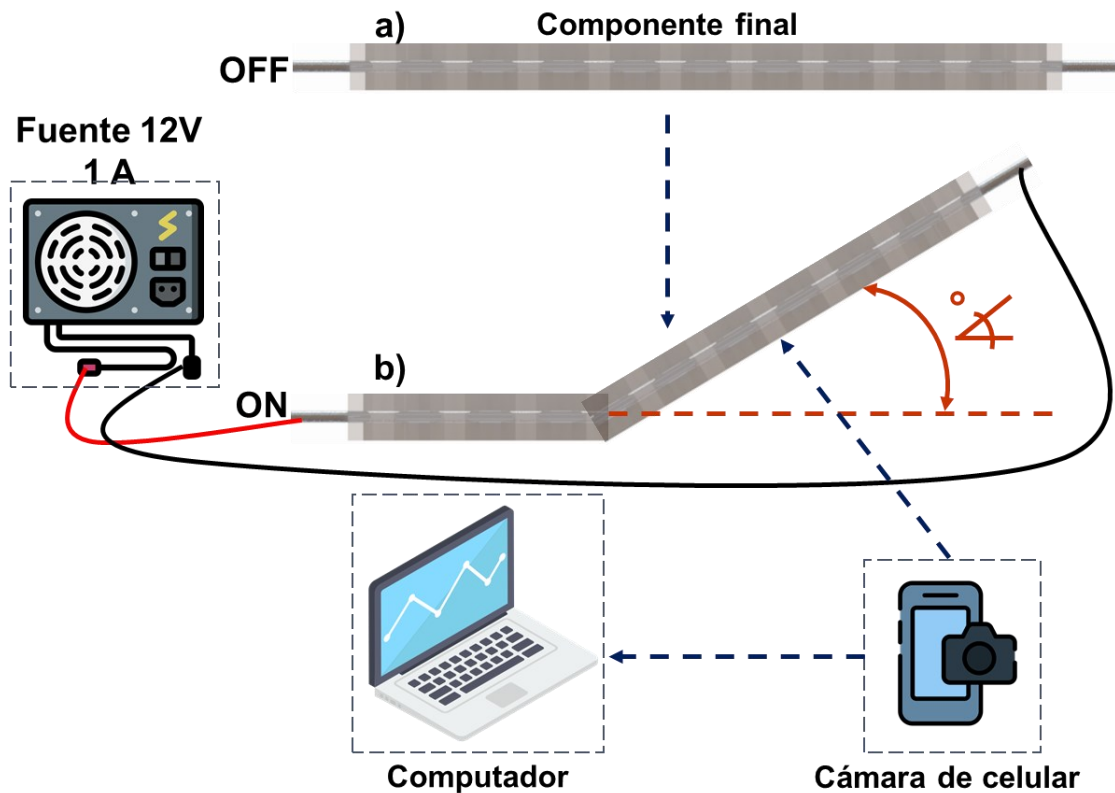
Una vez lograda la integración de ambos componentes, para evaluar mediante el método experimental presentado anteriormente, se propone realizar el método de evaluación que se representa en la Figura 52.

Materiales y equipos

- Circuito eléctrico de actuación
- Componente integrado
- Cámara de celular
- Reloj o temporizador
- Computador personal con software AutoCAD

Figura 52

Diagrama del método de evaluación.



Con referencia a la Figura 52, el método consiste en tener el componente integrado como se muestra en el literal a), luego se enciende el circuito eléctrico de actuación para que el componente empiece a levantarse como se observa en el literal b) y finalmente cuando el componente alcanza su grado de inclinación máximo, se procede a tomar una fotografía para posteriormente medir mediante el software AutoCAD, los grados de inclinación que alcanzó. A la par de esto, se toma el tiempo desde que se enciende hasta que se apaga el circuito eléctrico de actuación para determinar el tiempo que le tomó al componente alcanzar su máximo grado de inclinación.

Los resultados de este método de evaluación son: *tiempo de actuación* y *grado máximo de inclinación*. De esta forma, mediante el método de experimentación, se procede a determinar la mejor combinación de Factores y Niveles para el componente 3D.

Método de Validación

Luego de realizar la evaluación y determinar la mejor combinación de Factores y Niveles para el componente 3D se propone validar el componente final mediante una medición de fuerza para determinar si es o no factible emplear este mecanismo en un dedo de una prótesis de mano.

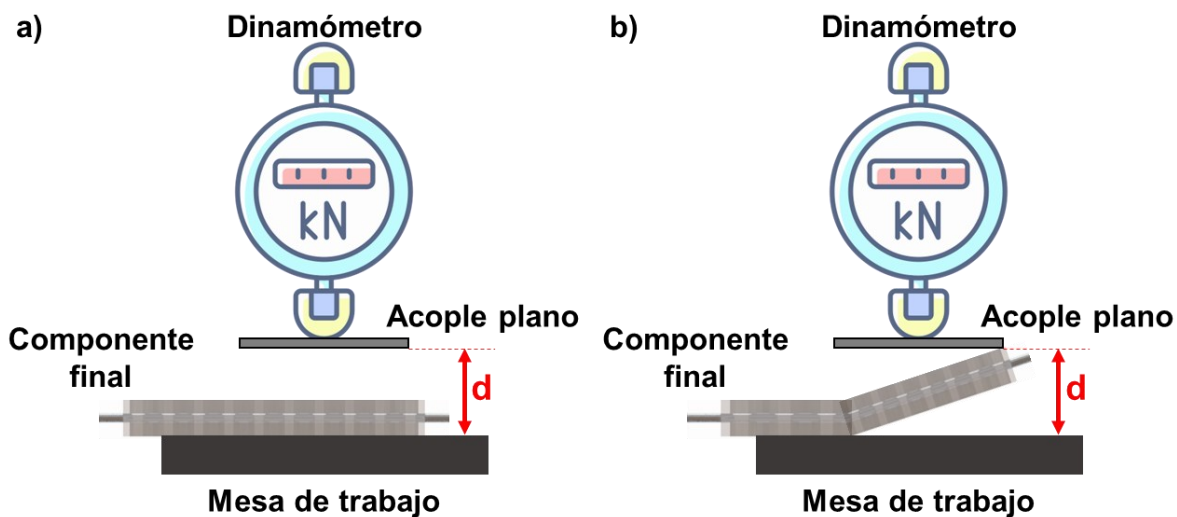
Para esto, el método de medición de fuerza que se propone es el que se muestra en la Figura 53.

Materiales y equipos

- Sensor de fuerza o dinamómetro digital FG – 3006 de 100N
- Circuito eléctrico de actuación
- Componente final
- Computador personal con software EDMS

Figura 53

Diagrama para el método de medición de fuerza del componente final.



Nota. La distancia “d” es de 8 milímetros.

Con referencia a la Figura 53, el procedimiento a seguir es: colocar el componente final como se muestra en el literal a), adicional, el sensor de fuerza posee un acople plano para un mejor contacto y éste se coloca a una distancia “d” respecto de la mesa de trabajo; luego encender el circuito eléctrico de actuación durante 1 minuto para que el componente final llegue a la forma que se muestra en el literal b). De esta manera al existir una resistencia física y no dejar que el componente final llegue a la inclinación máxima, éste ejercerá una fuerza hacia el sensor la cual será medida.

La fuerza máxima obtenida representará la fuerza de agarre que un dedo podrá tener para levantar un objeto.

Capítulo IV

Análisis y discusión de resultados

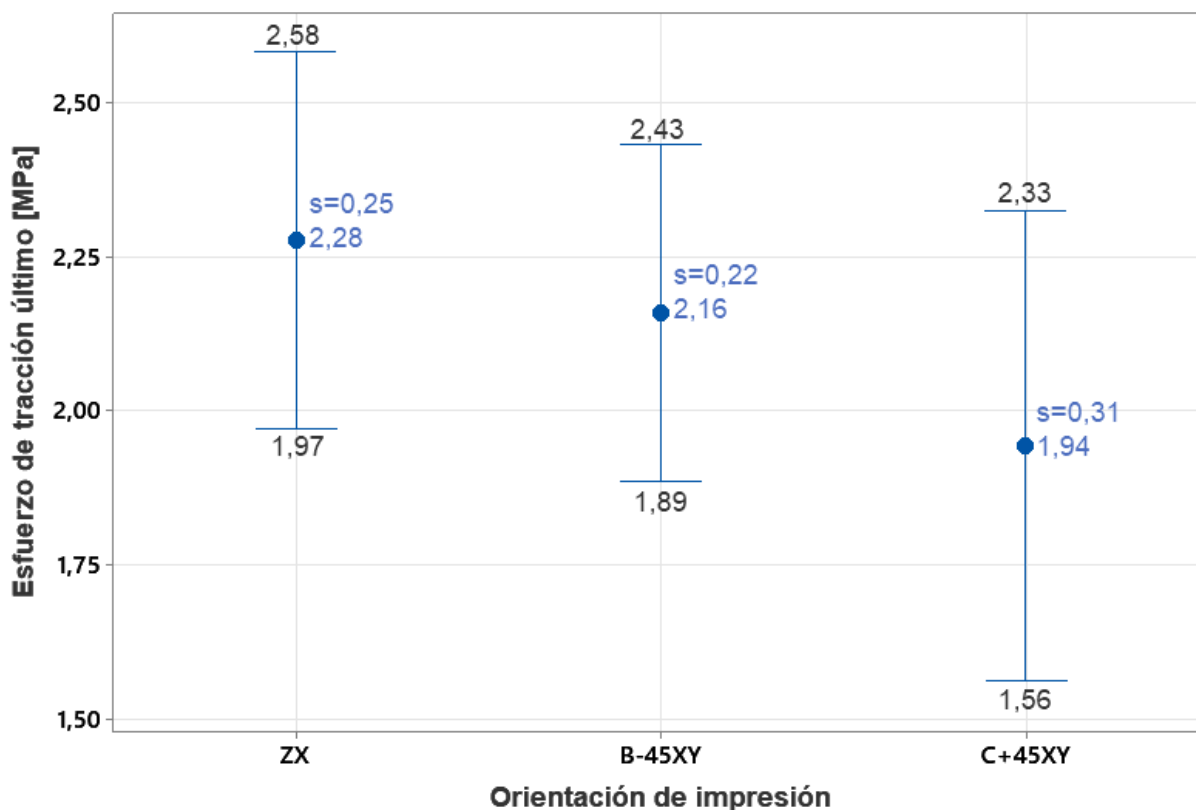
Resultados caracterización de resina Elastic 50A Formlabs

Los resultados del ensayo de tracción propuesto por la Norma ASTM D1708 fueron tomados del trabajo de Titulación de Balseca (2023, en edición), con tema “Prueba de concepto para sistemas de electrónica flexible usando impresión 3D”.

Esfuerzo de tracción último

Figura 54

Gráfica de intervalos para Esfuerzo de tracción último según las orientaciones de impresión.

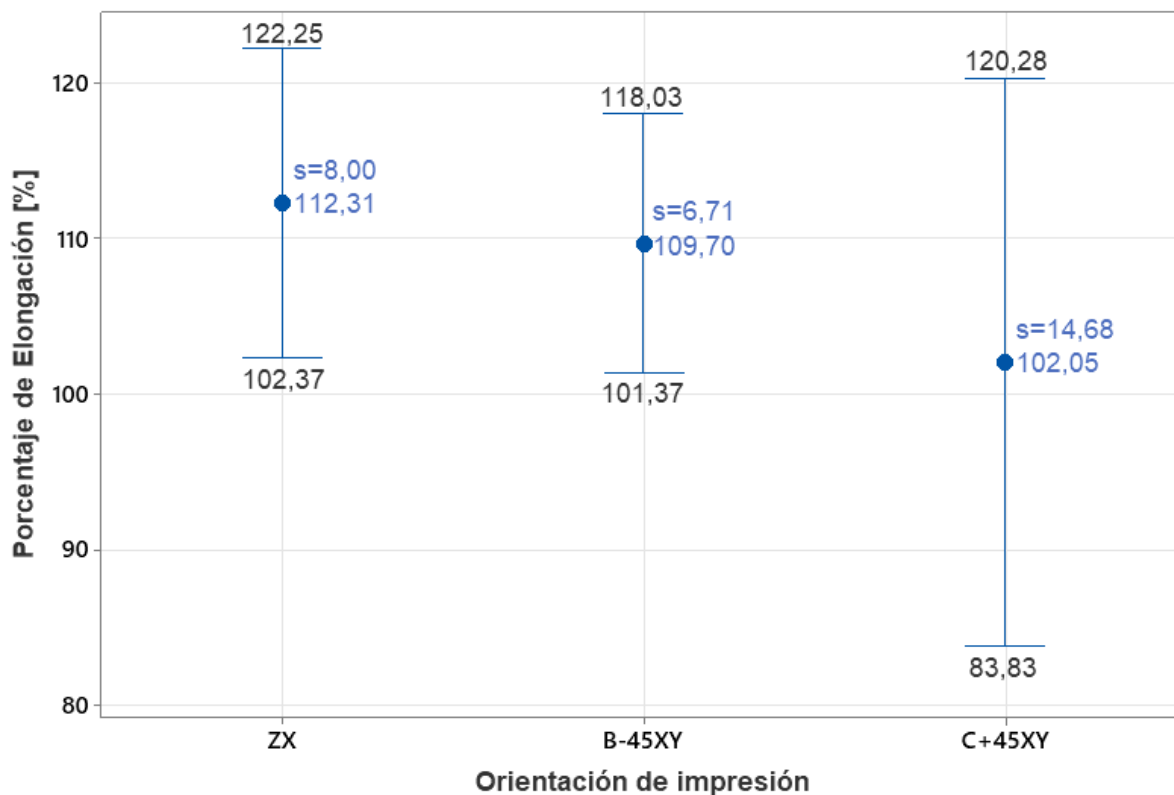


La Figura 54 representa la gráfica de intervalos para el esfuerzo de tracción último según cada tipo de orientación, como se observa, la orientación “ZX” es la que presentó un valor mayor en la media del esfuerzo de tracción último. Mientras que la orientación “C+45XY” presentó el menor valor y tiene una desviación estándar mayor.

Porcentaje de Elongación

Figura 55

Gráfica de intervalos para Porcentaje de Elongación según las orientaciones de impresión.

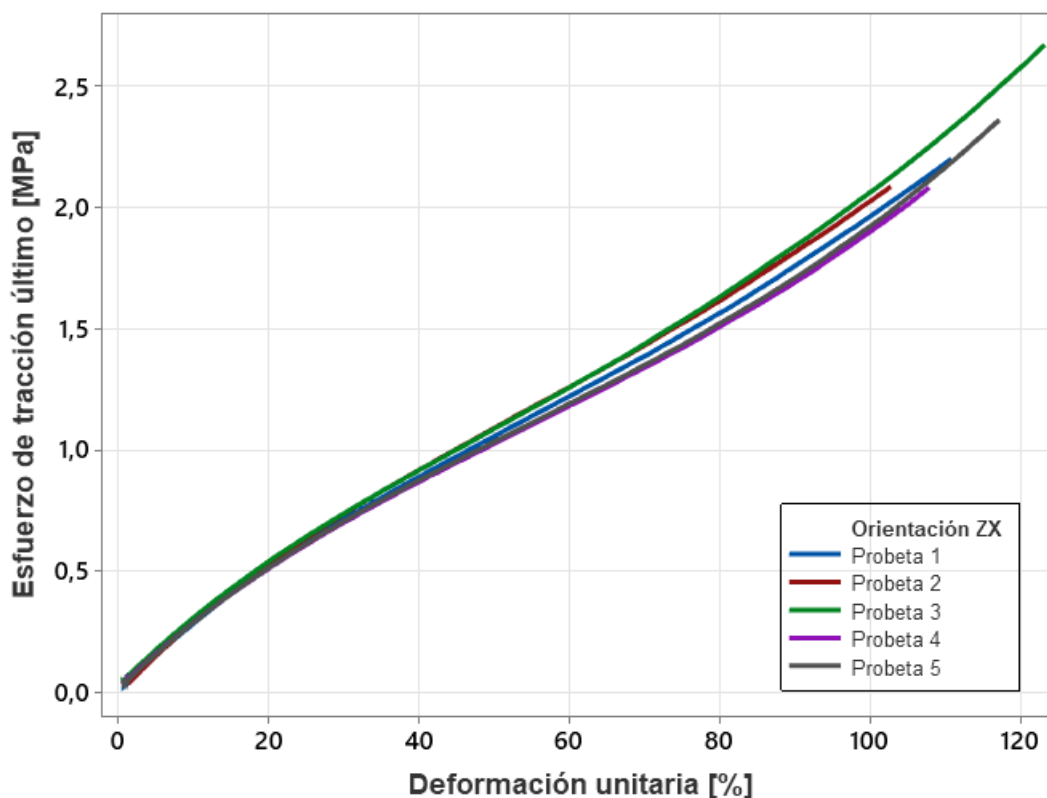


La Figura 55 representa la gráfica de intervalos para el porcentaje de elongación según cada tipo de orientación, como se observa, la orientación “ZX” presentó un valor mayor en la media del porcentaje de elongación. Mientras que la orientación “C+45XY” presentó el menor valor con una desviación estándar mayor.

Finalmente, en la Figura 56 se presenta una gráfica múltiple de Esfuerzo vs Deformación de las cinco probetas ensayadas e impresas con orientación “ZX”.

Figura 56

Gráfica de dispersión de Esfuerzo vs Deformación de las cinco probetas con orientación ZX.



Discusión. A pesar que la diferencia de resultados en las gráficas de intervalos, tanto para Esfuerzo de tracción último (Figura 54) como para el Porcentaje de Elongación (Figura 55), no es tan significativa, se dio prioridad a la orientación cuyos resultados fueron mayores y esta fue la orientación “ZX”. En la gráfica Esfuerzo vs Deformación de la Figura 56 se puede observar que las 5 probetas ensayadas tienen una respuesta similar, quizás no todas fallaron en el mismo instante, pero todas siguen la misma curvatura de comportamiento.

Resultados caracterización del alambre de Nitinol

Resultado de la característica eléctrica

Resultados con corriente DC. Las principales limitaciones que se obtuvieron al implementar los circuitos DC presentados en el Capítulo III fueron:

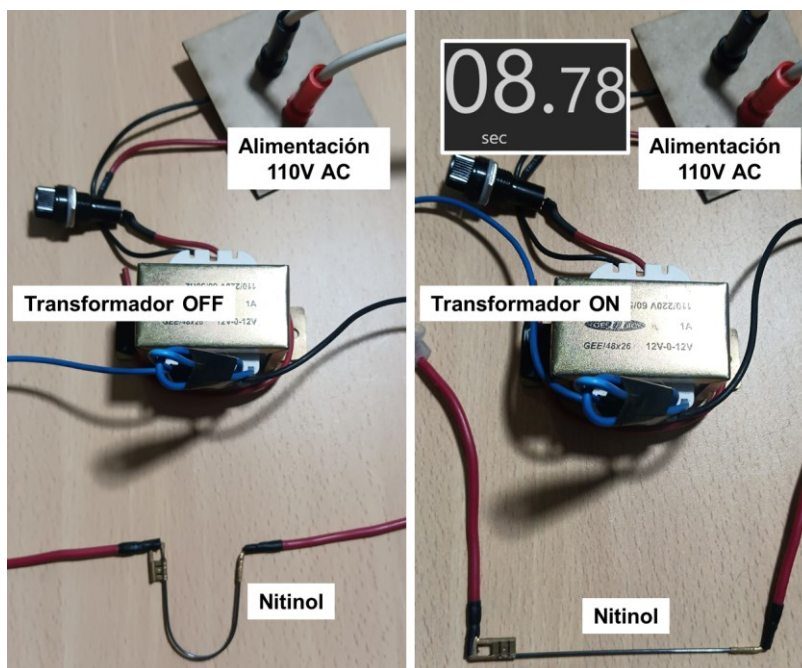
- En el Circuito DC – 1, el uso del circuito de corriente (usado para cargar baterías) garantizó que la corriente se mantenga constante en un valor de 2 Amperios, sin embargo, el circuito al estar en corto con el alambre de Nitinol, sufrió una caída de voltaje a cero.
- En el Circuito DC – 2, con el uso del potenciómetro de alta potencia se solucionó el problema de la caída de voltaje y se logró mantener un valor de 60 Voltios y una corriente de hasta 3 Amperios (lo máximo que entregan 2 fuentes variables de laboratorio), sin embargo, el potenciómetro disipó toda la temperatura y el alambre de Nitinol no sufría calentamiento a pesar de dejar conectado el circuito por alrededor de 10 minutos.

Resultados con corriente AC. La implementación del Circuito AC garantizó un calentamiento progresivo y rápido del alambre de Nitinol, esto debido a que, al usar un transformador, éste mantiene los 12 Voltios y 1 Amperio que ofrece en su funcionamiento normal.

Como se observa en la Figura 57, al lado izquierdo se encuentra el alambre de Nitinol previamente deformado y el transformador se encuentra apagado. Luego se enciende el transformador y después de aproximadamente 9 segundos, el alambre recupera su forma original como se muestra al lado derecho.

Figura 57

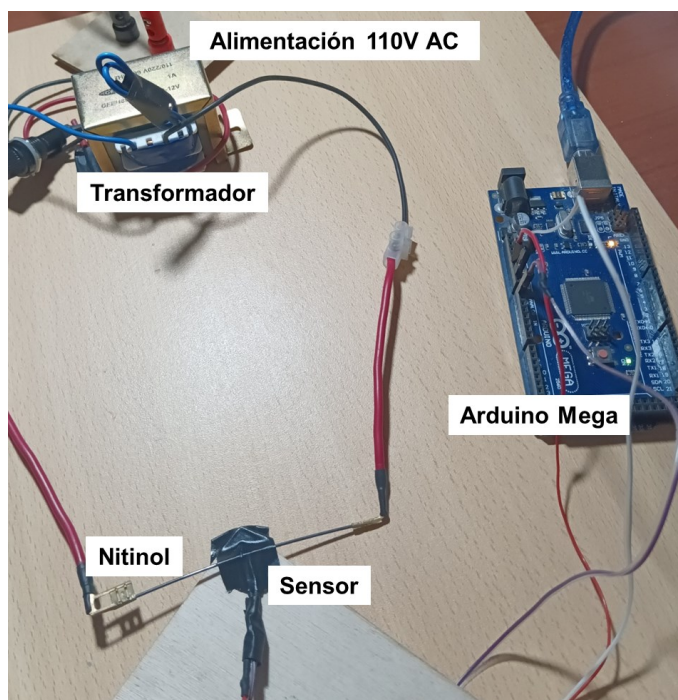
Funcionamiento del Circuito AC en el alambre de Nitinol.



Temperatura máxima y Tiempo de estabilización del Nitinol con el Circuito AC

Figura 58

Medición de temperatura en el Circuito AC.



Para determinar la temperatura que alcanza el alambre de Nitinol con el Circuito AC, se usó un sensor de temperatura (termistor SCK 103 acondicionado con una resistencia de 10k Ohmios) con Arduino tal como se muestra en la Figura 58.

Se realizaron 3 pruebas para comparar los resultados en gráficas de dispersión Temperatura vs Tiempo, los resultados se muestran en la Tabla 4.

Figura 59

Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 1.

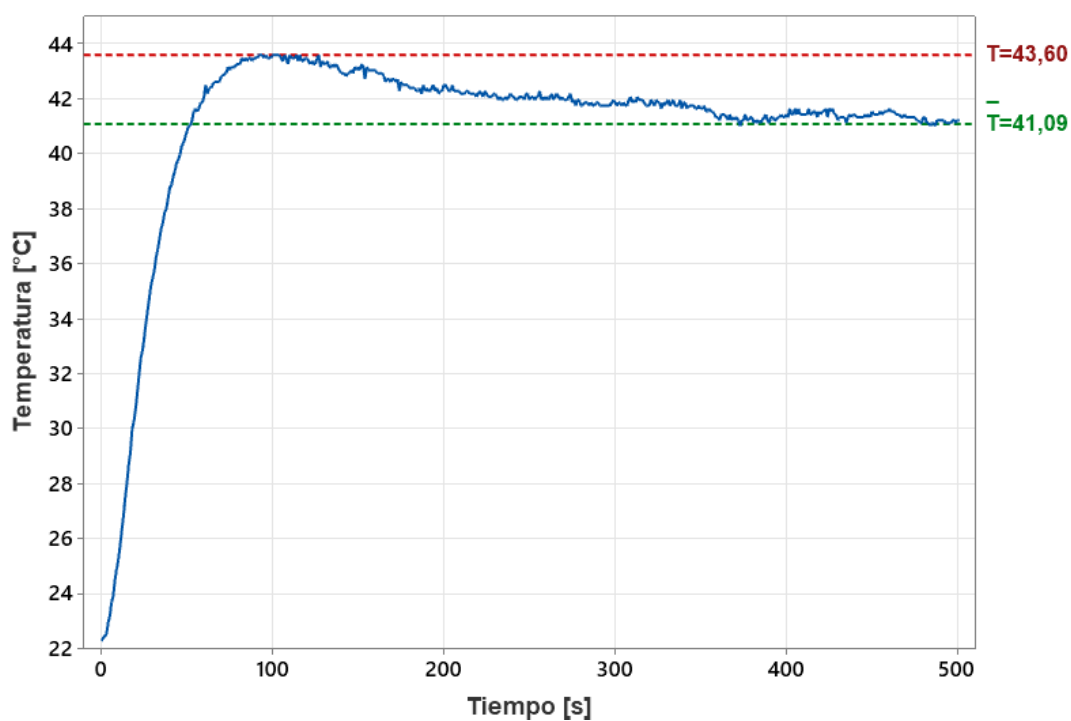
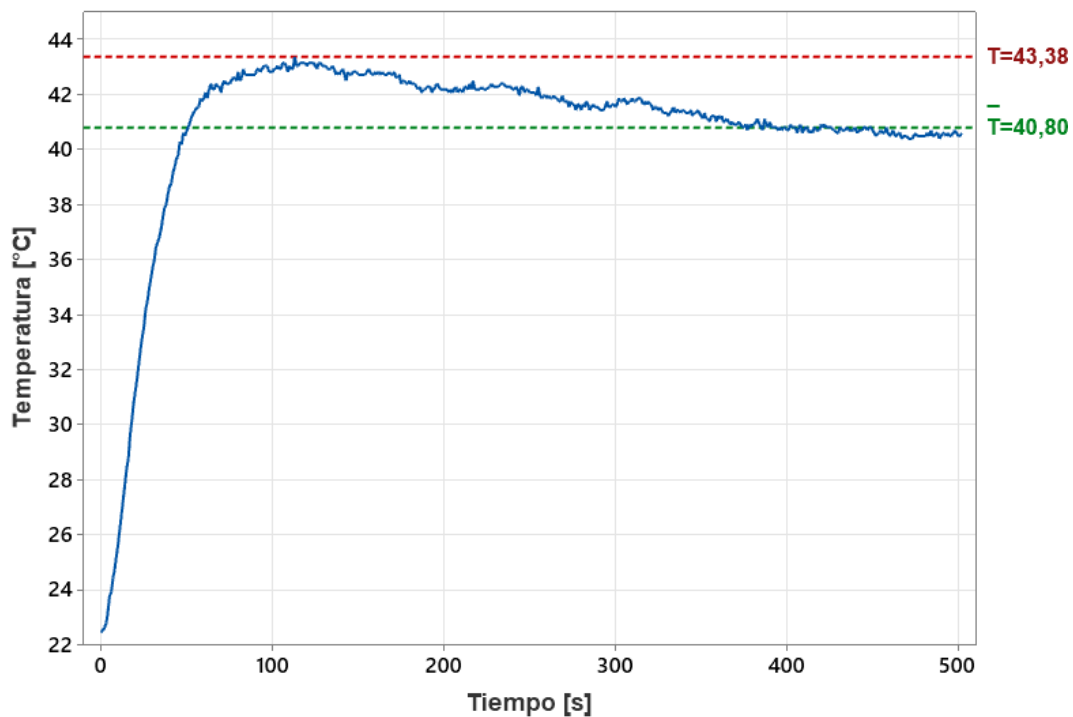


Figura 60

Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 2.

**Figura 61**

Gráfica de dispersión Temperatura vs Tiempo de la Prueba 3.

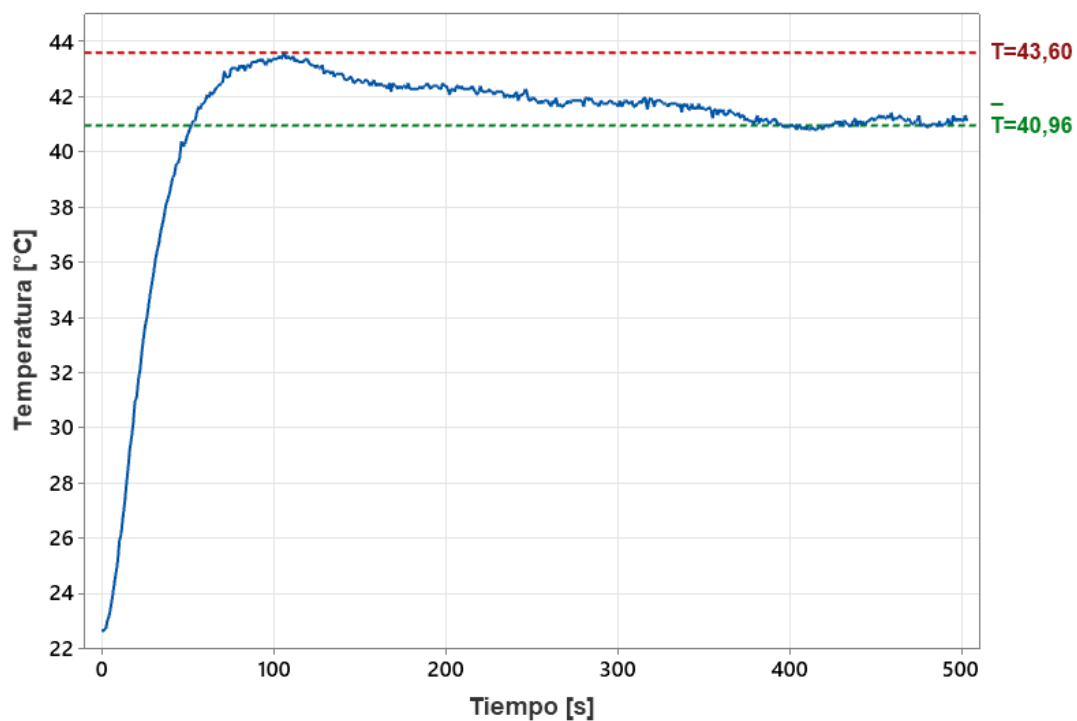


Tabla 4

Valores para Temperatura Media y Máxima de las 3 pruebas.

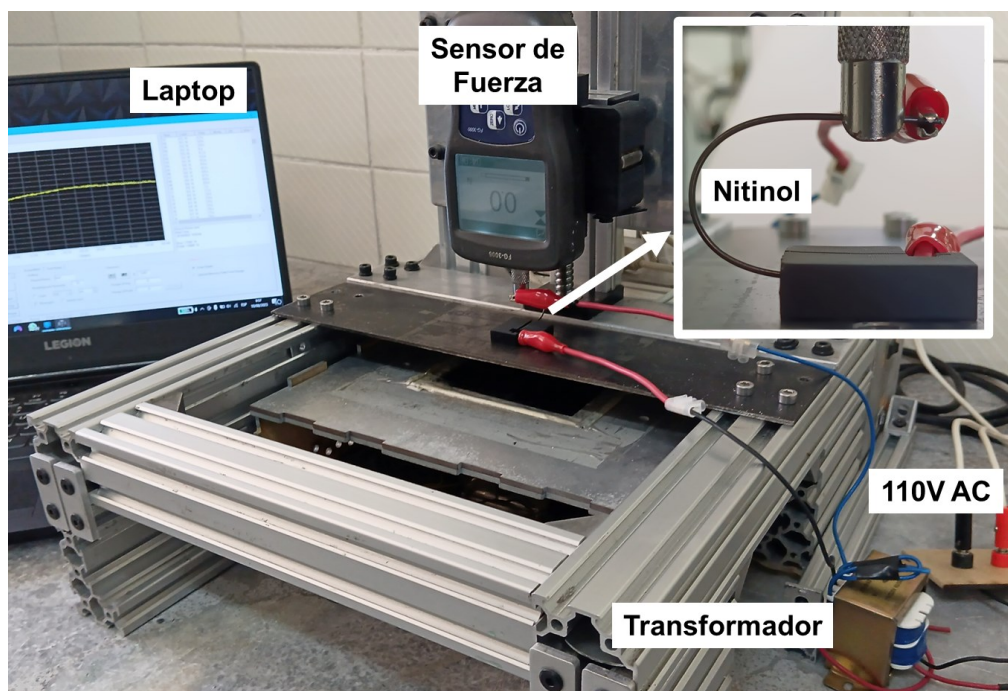
Temperatura [°C]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Media	41,09	40,80	40,96
Máxima	43,60	43,38	43,60

Discusión. El circuito AC resultó efectivo para inducir calor mediante el Efecto Joule al alambre de Nitinol con una capacidad de inducir una temperatura máxima de 43,60°C, la cual es mayor a los 40°C que el alambre necesita para volver a su forma original, por otro lado, para el tiempo de estabilización podemos observar según las Figuras 59, 60 y 61 que la temperatura tiende a converger en su valor medio alrededor de 450 a 500 segundos, es decir, podríamos hablar de un tiempo de estabilización aproximado de 7,5 a 8 minutos.

Resultados de la característica física

Figura 62

Circuito implementado para medir la fuerza del alambre de Nitinol.



Como se propuso en el Capítulo III, el circuito de medición de Fuerza implementado se muestra en la Figura 62.

En la Figura 63 se observa el alambre de Nitinol para ser ensayado con la curvatura de "C" cuyo diámetro es mayor a 20 milímetros como se mencionó en el Capítulo III.

Figura 63

Alambre de Nitinol con curvatura en "C" para el ensayo.



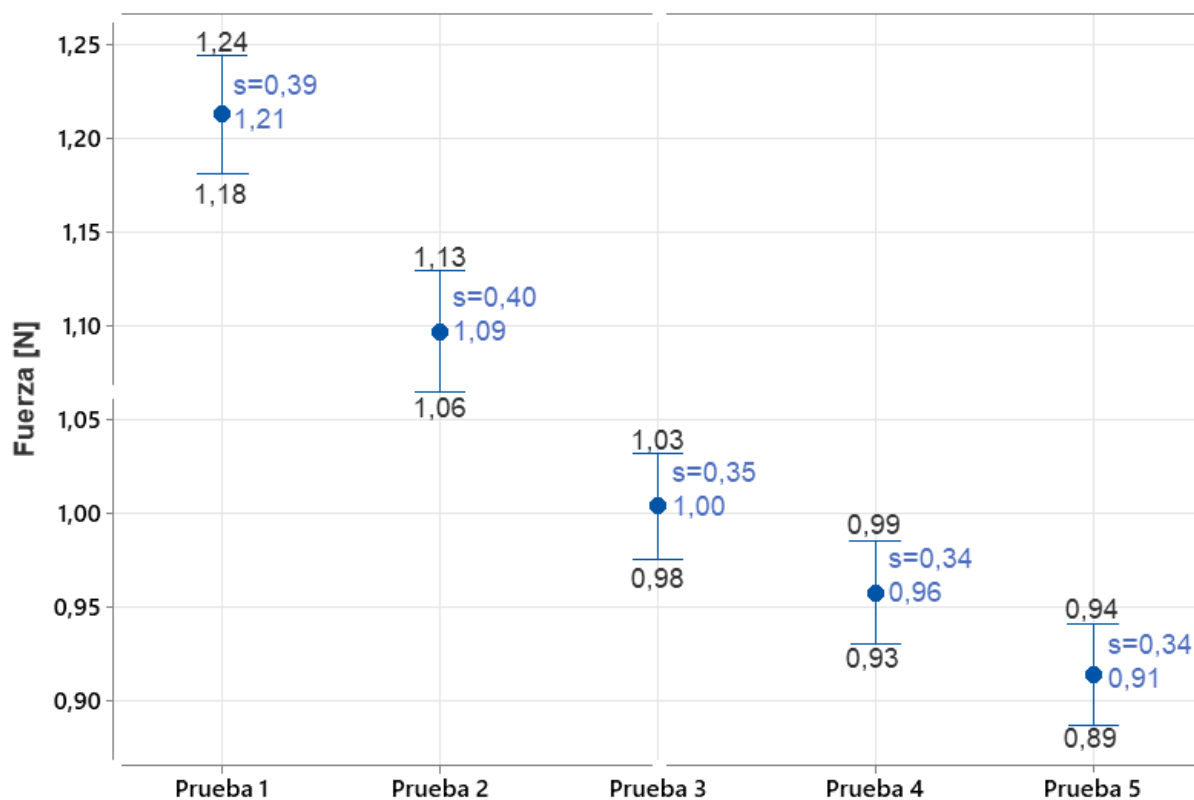
Nota. Cada división de la cuadrícula es de 5 milímetros.

La Figura 64 muestra una gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas realizadas al alambre de Nitinol. Como se observa, se tiene un comportamiento decreciente en los valores de Medias conforme se realizan las pruebas, esto se debe a que el alambre de Nitinol durante cada ensayo está sufriendo Martensita por tensión, es decir, quiere adquirir su forma original (recto) pero una fuerza externa le mantiene con la curvatura en "C".

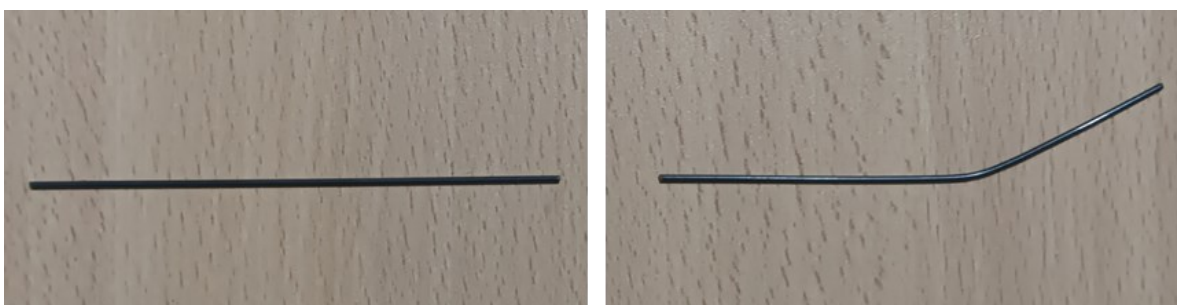
Por esta razón, tras las 5 pruebas realizadas el alambre de Nitinol obtuvo una nueva forma, tal como se muestra en la Figura 65.

Figura 64

Gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas.

**Figura 65**

Comparación de las formas del alambre de Nitinol en su Fase Austenita antes y después.



Nota. Al lado izquierdo se muestra la memoria de forma original del alambre, al lado derecho se muestra la nueva memoria de forma.

En la Tabla 5, se muestran los resultados de Fuerza media y máxima con su desviación estándar, de esta forma se puede observar que el alambre de Nitinol obtuvo una Fuerza máxima de 1,5 [N] en su primera prueba, mientras que, en las otras pruebas, este valor fue decreciendo.

Tabla 5

Resultado para la Fuerza de las 5 pruebas.

Fuerza [N]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Media	1,21	1,09	1,00	0,96	0,91
Máxima	1,50	1,40	1,30	1,20	1,20
Desviación estándar	0,39	0,40	0,35	0,34	0,34

Discusión. El circuito de medición de fuerza propuesto, permitió medir el valor máximo de fuerza que ejerce el alambre de Nitinol cuando está recuperando su forma original, dando como resultado un valor de 1,5 [N], sin embargo, esta prueba ejerce Martensita por tensión y conforme se van haciendo más pruebas, dicho valor de fuerza máxima va disminuyendo aproximadamente 0,1 [N] (resolución que tiene el sensor de fuerza).

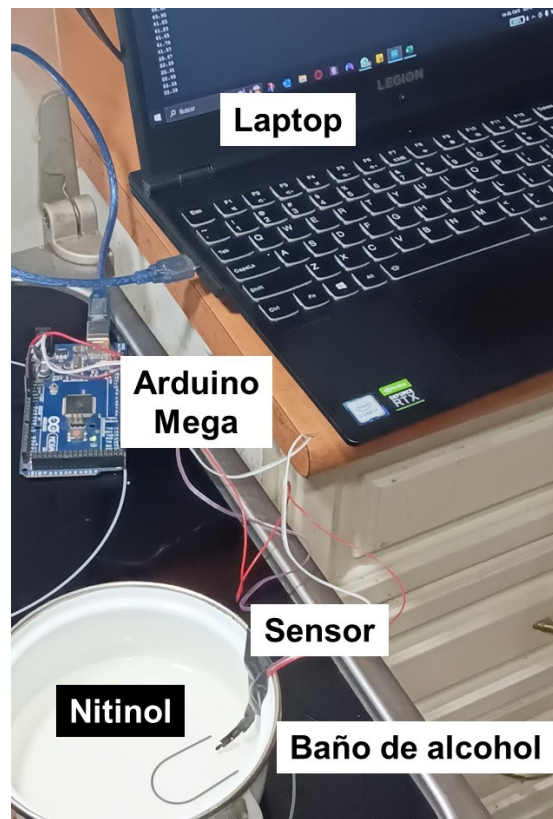
Así mismo, al inducir Martensita por tensión, el alambre de Nitinol va adquiriendo una nueva forma, es decir, estamos realizando el entrenamiento Pasivo I que se estudió en el Capítulo III, pero solo con 5 repeticiones o pruebas en este caso.

Resultados de la característica térmica

Para determinar las TTRs, se usó la Prueba Af activo propuesta en el Capítulo III la cual nos permite determinar A_s y A_f , la implementación de esta prueba se muestra en la Figura 66.

Figura 66

Implementación del circuito para la Prueba Af activo.

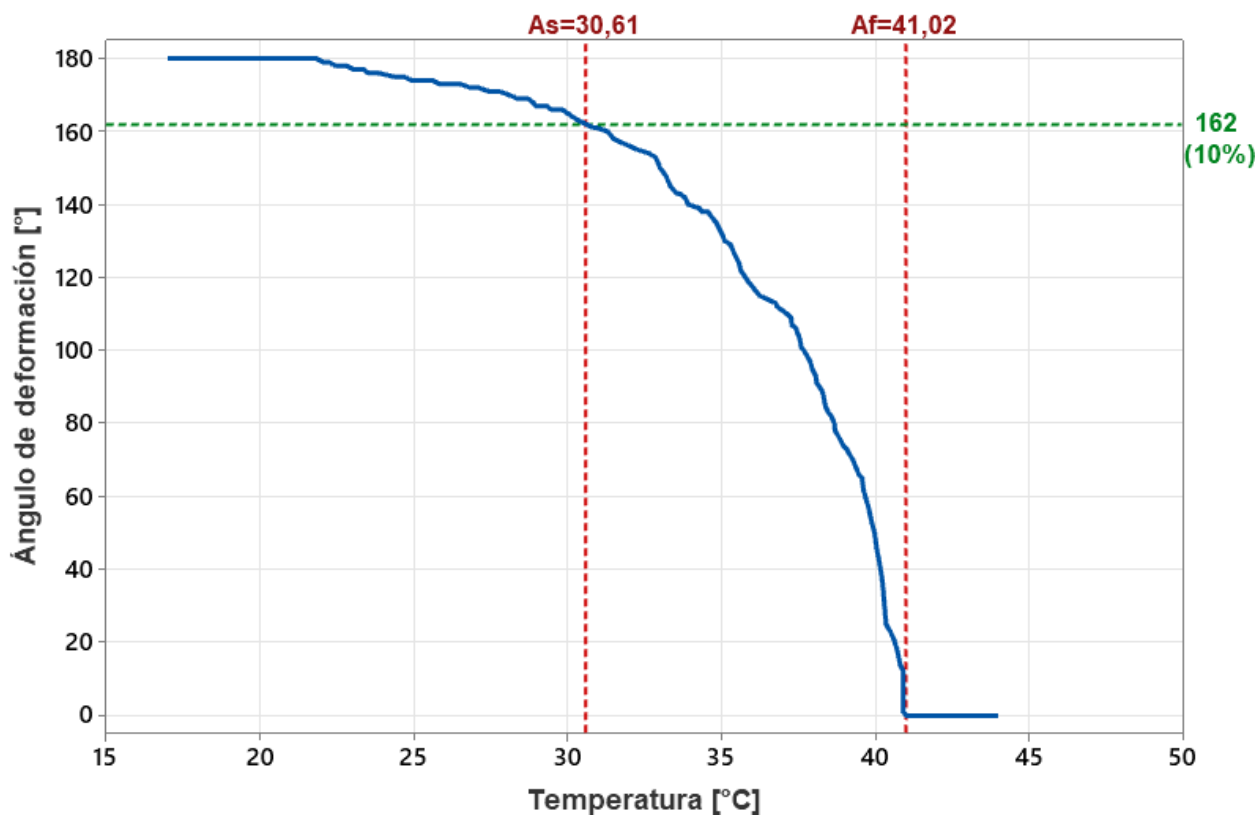


Curva típica de las TTRs mediante la Prueba Af activo. La Figura 67 representa la curva típica para hallar las TTRs mediante la prueba Af activo. Como se observa, el resultado es una curva que relaciona el ángulo de deformación con el aumento de temperatura.

Para determinar la temperatura donde termina la Fase Austenita (Af) se debe observar en la gráfica cuando el ángulo de deformación sea 0° , por otro lado, para determinar la temperatura donde empieza la Fase Austenita (As) se consideró que esta empieza cuando el alambre tiene un ángulo de deformación de 162° que representa el 10% de la deformación total.

Figura 67

Gráfica de las TTRs (A_s y A_f) del alambre de Nitinol sin entrenamiento.

**Tabla 6**

Valores para A_s y A_f del alambre de Nitinol.

Temperatura A_s [°C]	Temperatura A_f [°C]
30,61	41,02

Discusión. El fabricante Nexmetal menciona que el alambre de Nitinol debe alcanzar los 40°C para lograr su memoria de forma, con los valores de la Tabla 6 se comprueba este dato y podemos decir que la Prueba A_f activo es un método válido para calcular las TTRs, ya que aproximadamente a los 30,61°C empieza el cambio de memoria de forma y a los 41,02°C alcanza por completo su memoria de forma, esta variación de 1,02°C respecto a los 40°C podemos considerar insignificante ya que térmica y físicamente es inapreciable.

Resultado del entrenamiento del alambre de Nitinol

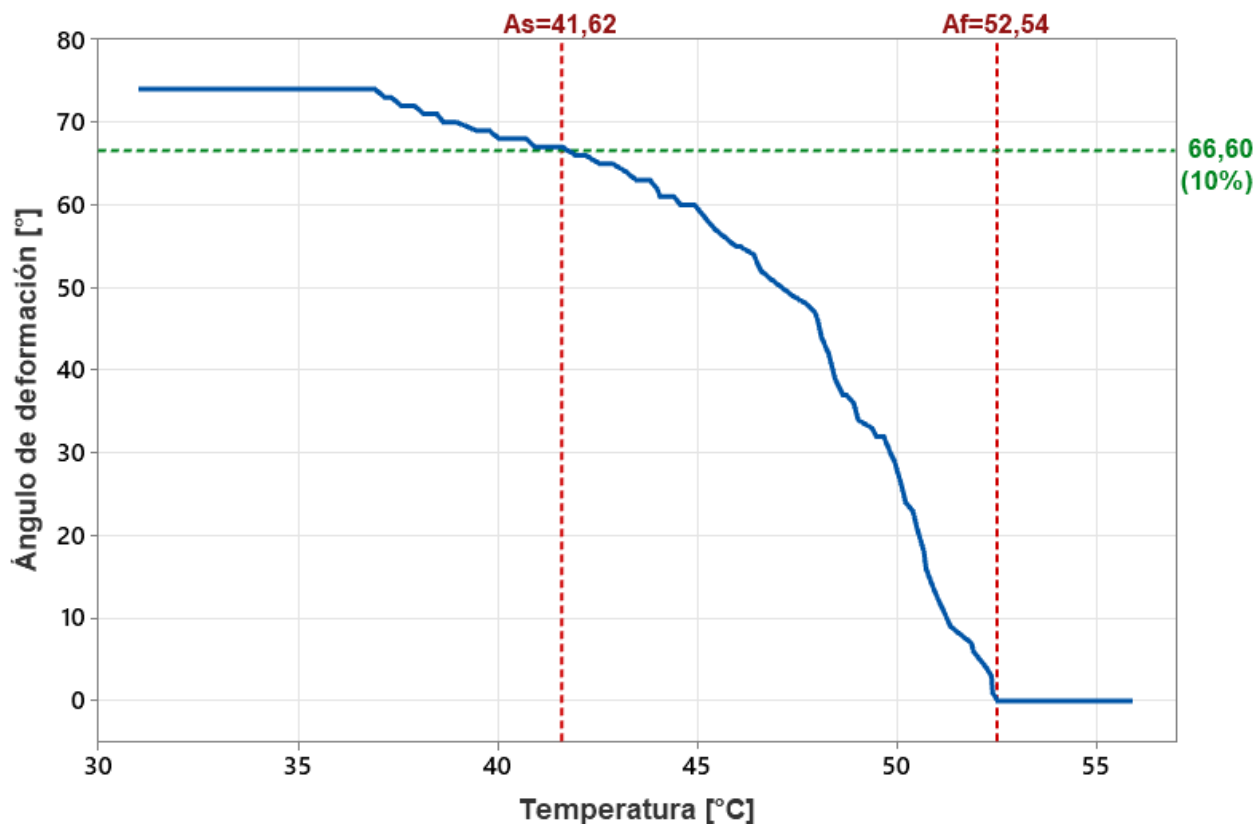
Resultado entrenamiento de memoria de forma de 1 camino

En el Capítulo III se estudió que existe un solo método de entrenamiento para memoria de forma de 1 camino, sin embargo, se propuso 2 métodos de enfriamiento para determinar si esto influye o no en el resultado final de la memoria de forma del alambre de Nitinol. Para determinar esto, se propuso hallar la curva típica de TTRs de cada método y comparar los resultados.

Resultado para el enfriamiento rápido

Figura 68

Gráfica de las TTRs (A_s y A_f) del alambre de Nitinol con enfriamiento rápido.

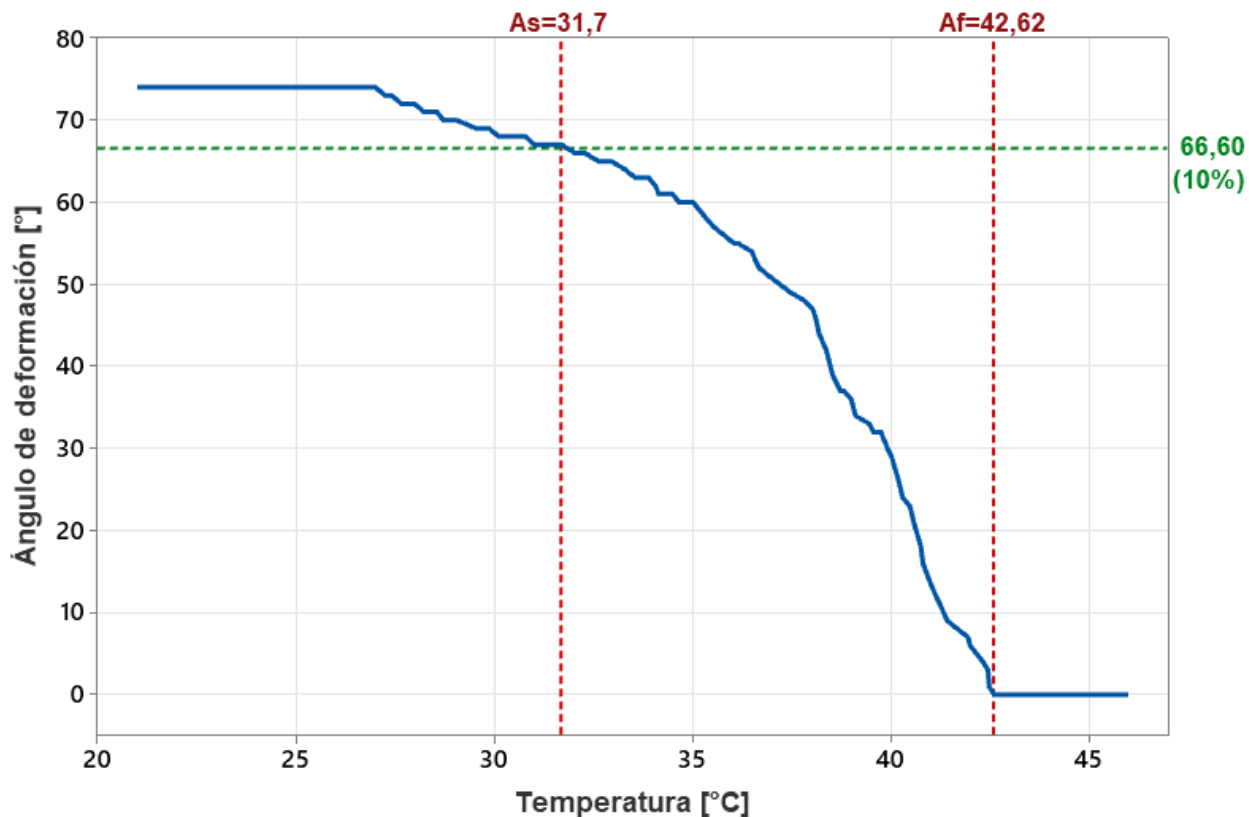


Nota. El rango del ángulo de deformación es de 0 a 74° ya que el alambre está entrenado con esa inclinación.

Resultado para el enfriamiento lento

Figura 69

Gráfica de las TTRs (A_s y A_f) del alambre de Nitinol con enfriamiento lento.



Nota. El rango del ángulo de deformación es de 0 a 74° ya que el alambre está entrenado con esa inclinación.

Tabla 7

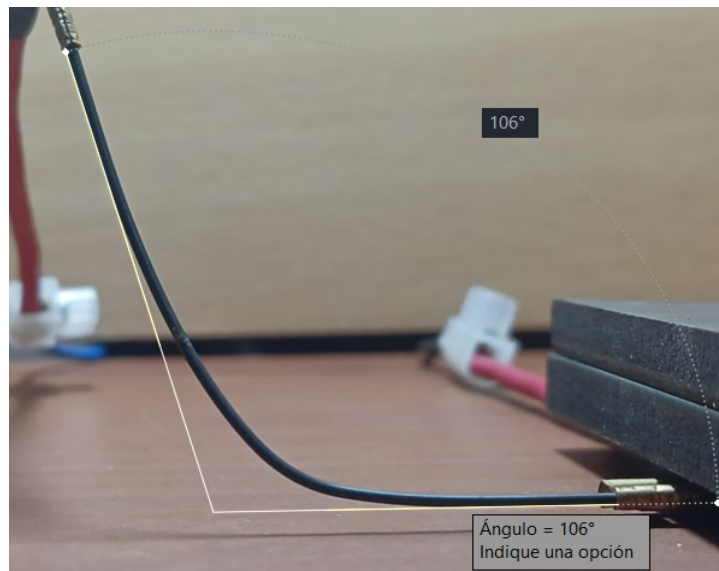
Valores para A_s y A_f del alambre de Nitinol entrenado y no entrenado.

Nitinol	Temperatura A_s [°C]	Temperatura A_f [°C]
No entrenado	30,61	41,02
Entrenado (enfriamiento rápido)	41,62	52,54
Entrenado (enfriamiento lento)	31,70	42,62

Resultado del alambre de Nitinol con memoria de forma de 1 camino. En la Figura 70 se observa que el alambre de Nitinol, al ser calentado con el circuito eléctrico de actuación, obtiene la nueva forma, una inclinación de 74° (ángulo suplementario de 106°), la cual fue medida mediante el software AutoCAD.

Figura 70

Alambre de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de 1 camino.



Nota. El alambre presentado es el que tuvo enfriamiento lento.

Discusión. Con los resultados presentados en la Tabla 7 y comparando con los valores obtenidos para el alambre no entrenado (forma original o de fábrica), podemos evidenciar que un enfriamiento rápido con agua, causa que las TTRs aumenten demasiado, esto debido a que el material sufre un tipo de tratamiento térmico por el choque de temperatura, por otro lado, con un enfriamiento lento, evitamos este tratamiento térmico y las TTRs tienen una variación aproximada de 2°C respecto al alambre no entrenado, lo cual no es tan significativo. Por lo tanto, se concluye que el entrenamiento de memoria de forma de 1 camino debe completarse con un enfriamiento lento dentro del horno para no afectar las características térmicas del alambre.

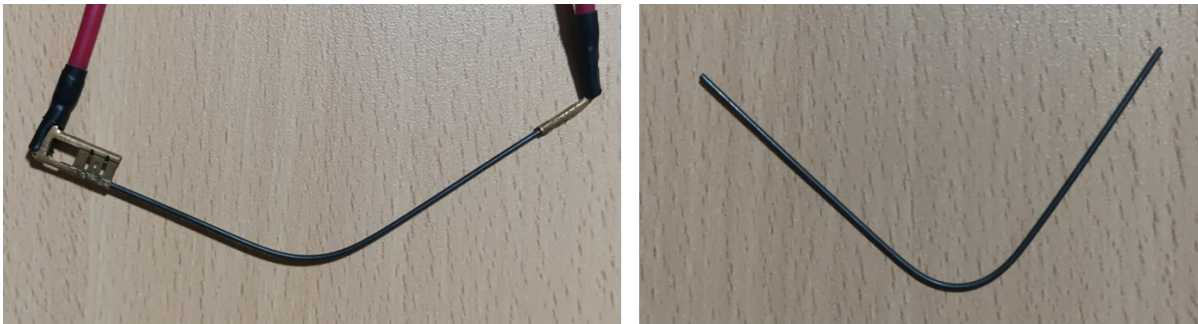
Resultado entrenamiento de memoria de forma de doble camino

En el Capítulo III se estudió que existen 4 métodos para el entrenamiento de memoria de forma de doble camino, sin embargo, únicamente con el método Pasivo I se obtuvieron buenos resultados ya que no presenta limitaciones en su ejecución.

Para esto, se utilizó el circuito de medición de fuerza de la Figura 62 y se realizaron 20 repeticiones.

Figura 71

Alambre de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de doble camino.

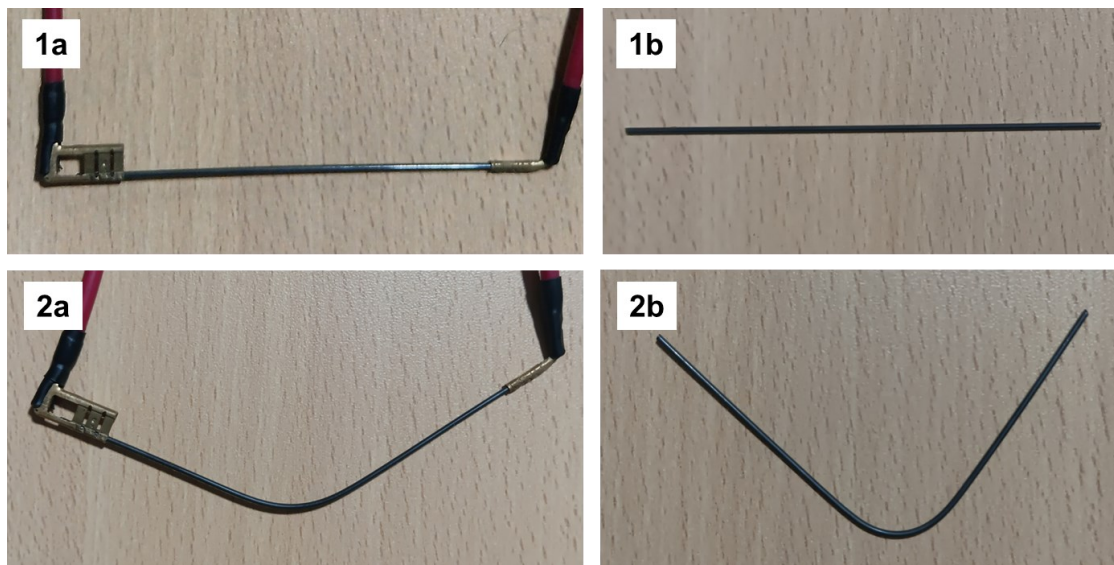


En la Figura 71, al lado izquierdo se observa el alambre de Nitinol en su Fase Austenita, es decir, cuando se encuentra con una temperatura igual o mayor a 40°C y al lado derecho se encuentra en su fase Martensita, es decir, cuando está a temperatura ambiente (22°C aproximadamente), podemos observar que el alambre tiene doble memoria de forma, una para el proceso de calentamiento y otra para el proceso de enfriamiento.

Comparación entre el alambre de Nitinol con memoria de forma de 1 camino y doble camino. La Figura 72 muestra 2 alambres de Nitinol, uno con memoria de forma de 1 camino (1a y 1b) y el otro con memoria de forma de doble camino (2a y 2b).

Figura 72

Alambres de Nitinol con entrenamiento de memoria de forma de 1 y 2 caminos.



Ambos alambres fueron calentados mediante el circuito eléctrico de actuación (1a y 2a), se puede observar cómo ambos alambres adquieren su memoria de forma en su Fase Austenita. Luego se apagó y desconectó el circuito eléctrico de actuación y se dejaron enfriar a temperatura ambiente para que adquieran su Fase Martensita, se puede observar como el alambre 1b mantiene la forma que tenía en 1a, mientras que el alambre 2b adquiere una forma diferente a la que tenía en 2a.

Discusión. El entrenamiento de memoria de forma de doble camino se logró con éxito aplicando el método Pasivo I con una repetición de 20 veces, el alambre a temperatura ambiente puede ser deformado de cualquier manera, cuando el alambre es calentado a 40°C éste adquiere la forma que se muestra al lado izquierdo de la Figura 71 y cuando se deja enfriar a temperatura ambiente, éste adquiere la forma que se muestra al lado derecho de la Figura 71, es decir, tiene doble memoria de forma, tanto para calentamiento como para enfriamiento. Una aplicación de este alambre puede ser cuando se requiera extender un panel solar cuando haya presencia de sol y contraerlo cuando no haya sol.

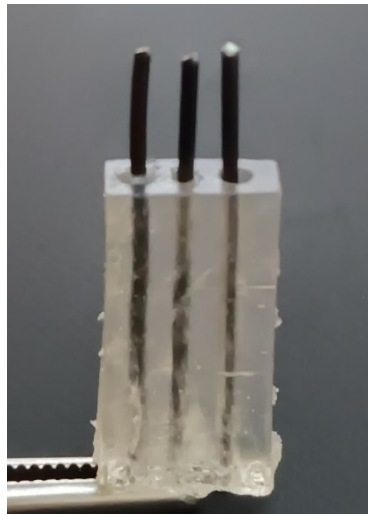
Resultado de la integración de componentes

Resultado del diámetro del agujero

En el Capítulo III se propuso analizar 3 diámetros diferentes para el agujero del componente impreso.

Figura 73

Integración del alambre de Nitinol con el componente impreso en sus 3 diámetros propuestos.



En la Figura 73 se puede observar el alambre de Nitinol integrado al componente impreso mediante los 3 distintos diámetros propuestos.

Resultado diámetro 1: 1 milímetro. El diámetro de 1 milímetro requirió que el alambre de Nitinol se introduzca antes del proceso de poscurado del componente, ya que, si se hace luego, el alambre no logra ingresar en dicho agujero, esto porque existe un taponamiento por residuos de resina y al poscurar se solidifican dichos residuos. Además, una vez que se culmina el proceso de poscurado con el alambre introducido, éste no puede ser extraído del agujero, es decir, se mantiene pegado a las paredes.

Resultado diámetro 2: 1,5 milímetros. El diámetro de 1,5 milímetros permite introducir el alambre de Nitinol luego del proceso de poscurado, por lo cual, puede ser introducido y extraído las veces que se deseen. El alambre queda lo suficientemente flojo para que se pueda

manipular, pero lo suficientemente ajustado para que no se deslice y salga por simples movimientos o gravedad.

Resultado diámetro 3: 2 milímetros. El diámetro de 2 milímetros, de igual manera permite introducir y extraer el alambre con facilidad, sin embargo, queda muy flojo y esto ocasiona que el alambre se deslice con facilidad y se caiga.

Discusión. Con los resultados obtenidos, se escogió el diámetro de 1,5 milímetros para la integración correcta ya que es importante tener la capacidad de introducir y extraer el alambre debido a que de esta forma se pueden tener múltiples alambres de Nitinol y un solo componente impreso. Además, es lo suficientemente ajustado para que no se deslice con facilidad y se separe del componente impreso en pruebas de funcionamiento.

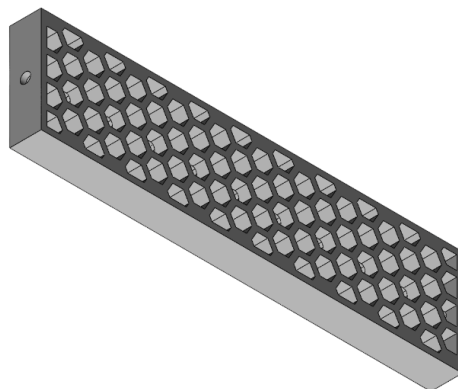
Resultado de la impresión del componente 3D

Se presentan los resultados de cada proceso que conlleva la impresión 3D de un componente con el agujero de diámetro definido de 1,5 milímetros.

Resultado del archivo CAD. La Figura 74 muestra el CAD que se obtiene mediante el software SolidWorks, luego de que se extruye el patrón periódico realizado en el software Grasshopper un espesor de 4,5 milímetros.

Figura 74

Archivo CAD del componente 3D obtenido mediante SolidWorks.



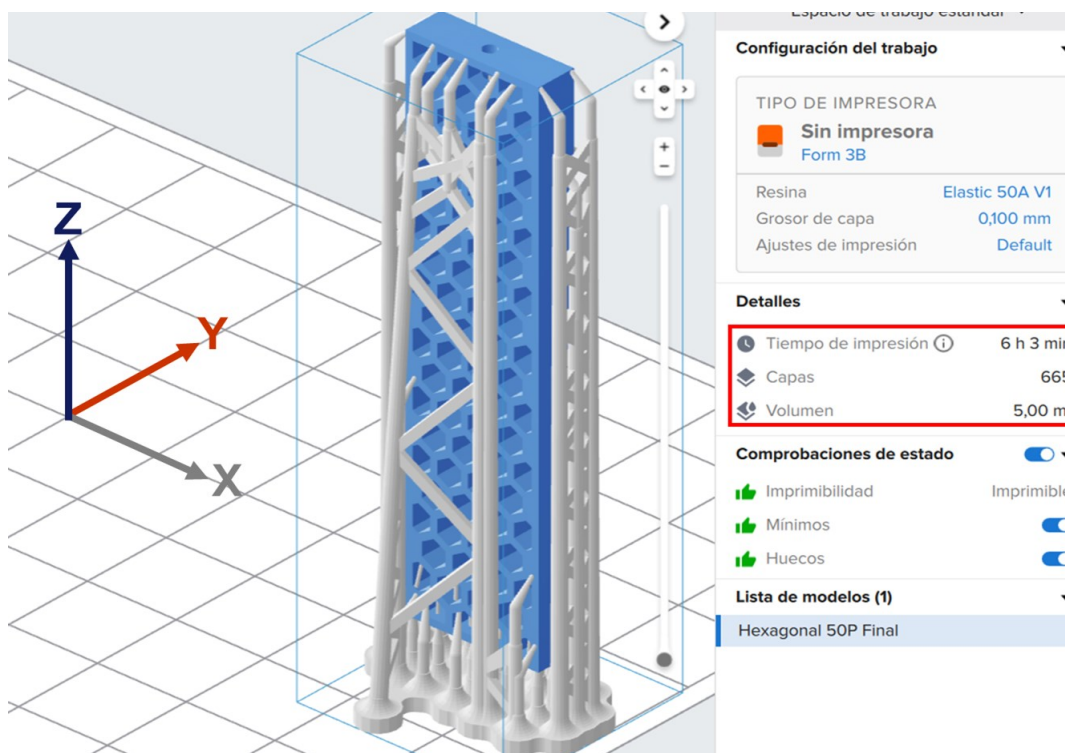
Nota. Se trata del componente con Celosía Hexagonal y porcentaje de Porosidad del 50%.

Resultado del STL en Software PreForm. La Figura 75 muestra la configuración de impresión en el Software PreForm, en donde el STL que se obtiene del archivo CAD, se coloca en la orientación “ZX” y se colocan los respectivos soportes.

Además, en la Figura 75 se puede observar que el software nos brinda detalles de la impresión como tiempo que se tarda, número de capas y el volumen de resina que se usará, también nos brinda información de la resina que se está usando, el grosor o espesor de capa y el tipo de impresora.

Figura 75

Configuración del STL en PreForm.



Resultado del componente impreso. En la Figura 76 se observa el componente impreso sobre la placa de impresión, se debe despegar de la placa para proceder con el proceso de poscurado.

Figura 76

Componente sobre la plataforma de impresión.



Resultado del componente poscurado. En la Figura 77 se muestra el proceso de lavado en la máquina Creality, este proceso tarda 20 minutos y se hace por centrifugado, se puede observar como el componente impreso se encuentra sumergido en alcohol isopropílico (97%).

Figura 77

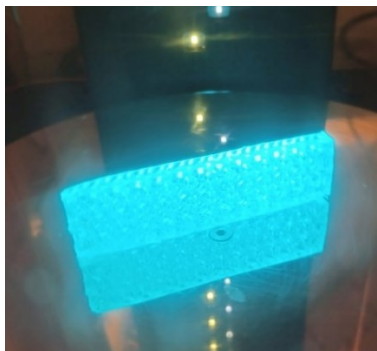
Proceso de lavado en máquina Creality.



Luego del lavado, en la Figura 78 se observa el proceso de poscurado en luz UV, este proceso también se realiza durante 20 minutos en la misma máquina Creality.

Figura 78

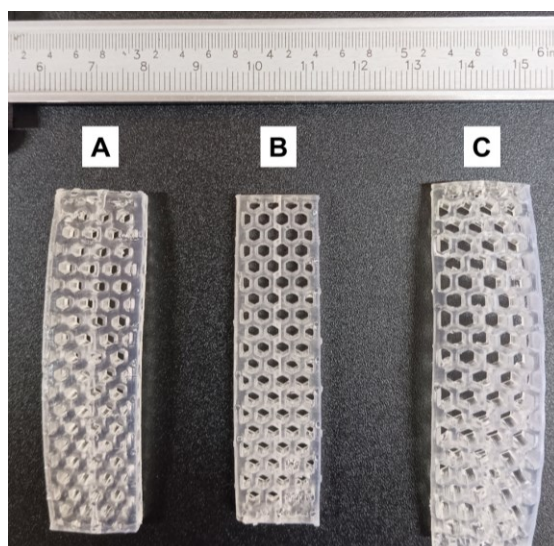
Proceso de poscurado con luz UV en máquina Creality.



Singularidad encontrada luego del proceso de poscurado. El componente al terminar su proceso de poscurado sufre un aumento tanto de largo como de ancho, se determinó que la causa principal es porque el componente luego de la impresión queda suspendido en la plataforma (Figura 76) y al ser elástico, tiende a alargarse mientras más tiempo se quede en dicha posición, de igual manera, en el proceso de lavado y poscurado con luz UV, al estar girando continuamente, el componente se deforma aún más. Sin embargo, luego de aproximadamente 1 semana el componente recupera la forma original, es decir, las dimensiones propuestas que para el caso son 60x15x4,5 milímetros.

Figura 79

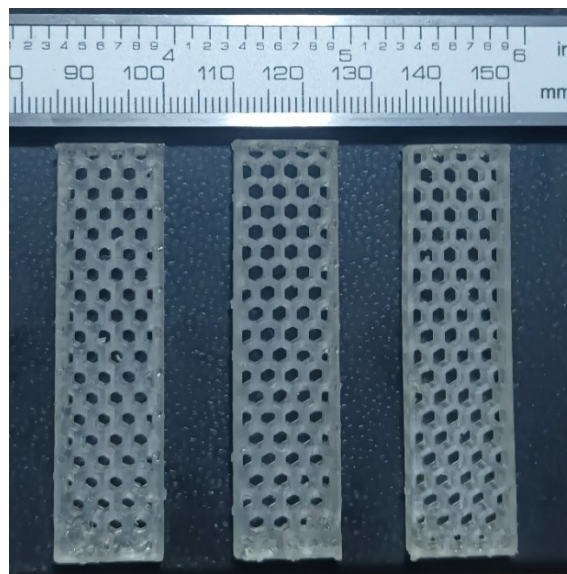
Comparación de tres componentes impresos con días de diferencia.



En la Figura 79 se muestran 3 componentes con días de impresión diferentes, el componente “B” tiene las dimensiones correctas y fue impreso hace 1 semana con referencia al componente “A” y “C”, los cuales tienen una clara deformación. Sin embargo, el componente “C” presenta mayor deformación que el componente “A” y esto se debe a que posee mayor porcentaje de porosidad, es decir, tiene “agujeros” más grandes.

Figura 80

Resultado final de los tres componentes impresos con días de diferencia.



Finalmente, en la Figura 80 se observa que pasado el tiempo de 1 semana aproximadamente desde que se imprimieron los últimos componentes, los 3 ahora tienen las dimensiones correctas.

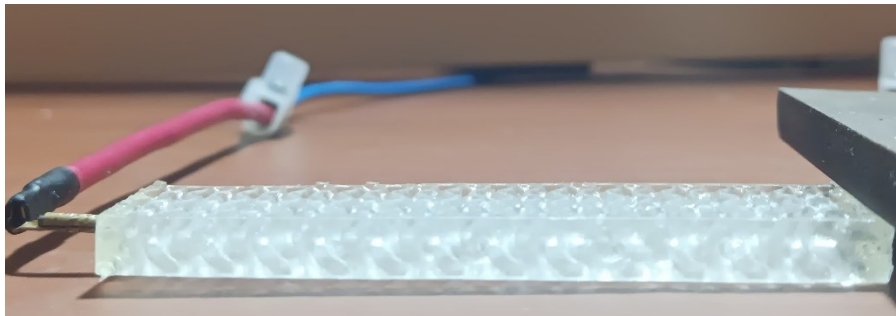
Discusión. Los componentes impresos con la resina Elastic 50A tuvieron buenos resultados, a pesar de que se debe esperar aproximadamente 1 semana para que tomen las dimensiones correctas.

Resultado de pruebas de funcionamiento

Una vez lograda la correcta integración de los componentes con el diámetro adecuado, se realizaron las pruebas de funcionamiento con el método de actuación descrito en el Capítulo III Figura 52.

Figura 81

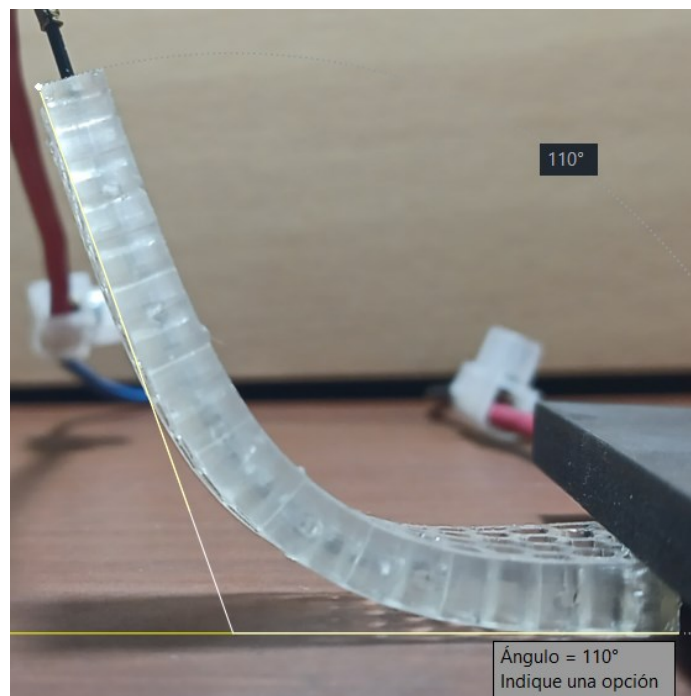
Componente Final con circuito eléctrico de actuación apagado.



En la Figura 81 se aprecia el componente final (el alambre de Nitinol y el componente impreso) totalmente recto con el circuito eléctrico de actuación apagado.

Figura 82

Componente Final con circuito eléctrico de actuación encendido.



Por otro lado, en la Figura 82 se aprecia cuando el componente final alcanza su grado de inclinación máximo, esto luego de que el circuito eléctrico de actuación haya sido encendido. Para el ejemplo presentado, este componente alcanzó 70° de inclinación (ángulo suplementario de 110°), el cual fue medido en el software AutoCAD.

Discusión. Tras las pruebas de funcionamiento realizadas, se obtuvo con éxito la actuación del componente final, es decir, se logró que el componente impreso se doble gracias a la actuación de memoria de forma que posee el alambre de Nitinol, además, el componente impreso no sufrió ninguna quemadura por el calentamiento del alambre.

Resultados del diseño experimental

Como resultados del método de evaluación se obtuvieron el grado de inclinación máximo que alcanzó cada componente y el tiempo en el cual alcanzaron dicho valor. Por lo tanto, se analizó cada resultado con los respectivos factores.

Resultados del Ángulo de inclinación

La Tabla 8 representa la relación señal/ruido (S/N) para el Ángulo de inclinación. Esta relación indica la influencia o efecto que tienen los factores (Tipo de Celosía y porcentaje de Porosidad) en el grado de inclinación que cada componente puede alcanzar.

Para calcular esta relación se utilizó la configuración "Más grande es mejor", ya que se busca alcanzar el mayor grado de inclinación.

Tabla 8

Relaciones Señal/Ruido para el Ángulo de inclinación.

Nivel	Tipo de Celosía	Porcentaje de Porosidad
1	36,37	34,33
2	35,80	36,48
3	35,49	36,86
Delta	0,88	2,53
Clasificar	2	1

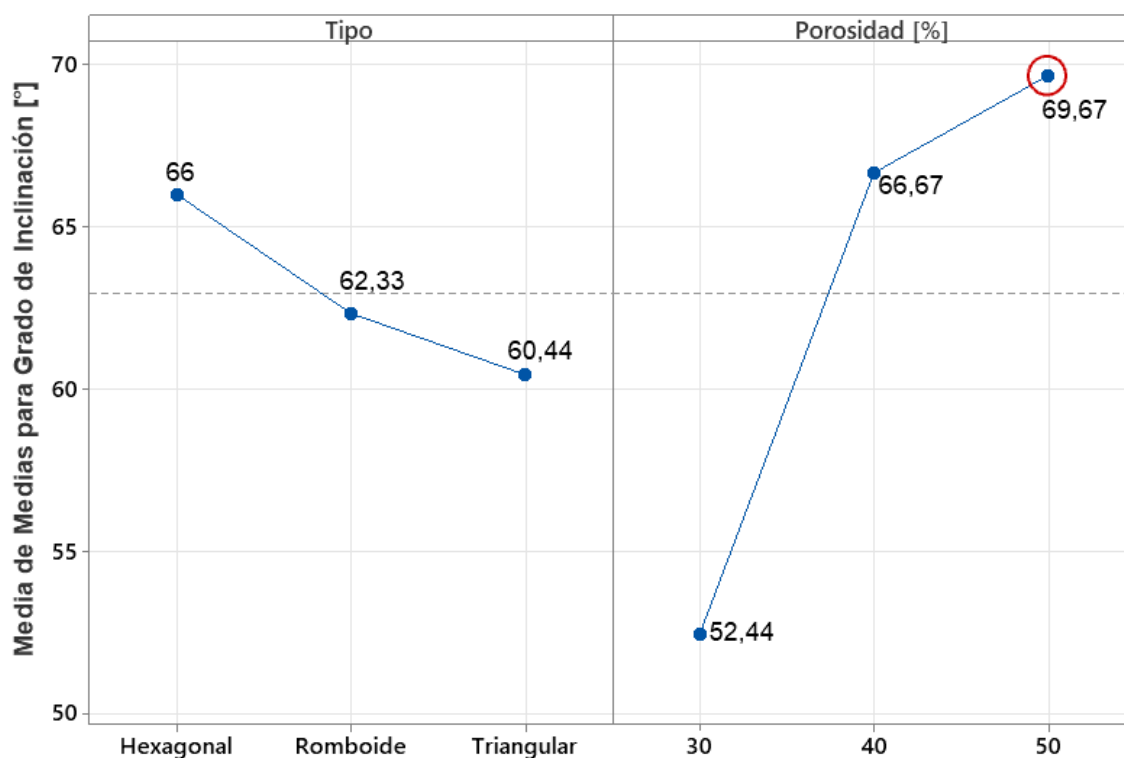
Nota. Configuración "Más grande es mejor"

Con referencia a la Tabla 8, el valor “Delta” representan la variación de la relación S/N que tiene el factor, es calculado como la relación S/N de mayor valor menos la relación S/N de menor valor (en valor absoluto). Por otro lado, el valor “Clasificar”, según el Delta obtenido indica el orden en que los factores tienen influencia en el resultado

Para este caso, el Porcentaje de Porosidad es el factor que mayor relevancia tiene en el Grado de inclinación que puede alcanzar el componente, representando el 74,19%. Mientras que, el Tipo de Celosía no es un factor de relevancia. Esto se puede evidenciar en la gráfica de efectos principales para medias que se muestra en la Figura 83.

Figura 83

Gráfica de efectos principales para medias del Grado de inclinación.



Como se observa al lado derecho de la Figura 83, el nivel 3 del porcentaje de Porosidad (50%) garantiza el mayor Grado de inclinación (valor medio) que puede alcanzar el componente y este valor es 69,67°.

Discusión. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la tabla de relaciones S/N y la gráfica de medias para el Grado de inclinación, podemos decir que un componente con un porcentaje de Porosidad del 50% obtiene un grado de inclinación mayor que si tuviera un porcentaje del 40% o 30% de Porosidad sin importar que tipo de Celosía tenga el componente.

Resultados del Tiempo

De igual manera, la Tabla 9 representa la relación S/N para el Tiempo. Para este caso, se utilizó la configuración "Más pequeño es mejor", ya que se busca alcanzar el mayor grado de inclinación en el menor tiempo posible.

Tabla 9

Relaciones Señal/Ruido para el Tiempo.

Nivel	Tipo de Celosía	Porcentaje de Porosidad
1	-37,51	-42,02
2	-38,08	-37,78
3	-38,07	-33,86
Delta	0,57	8,16
Clasificar	2	1

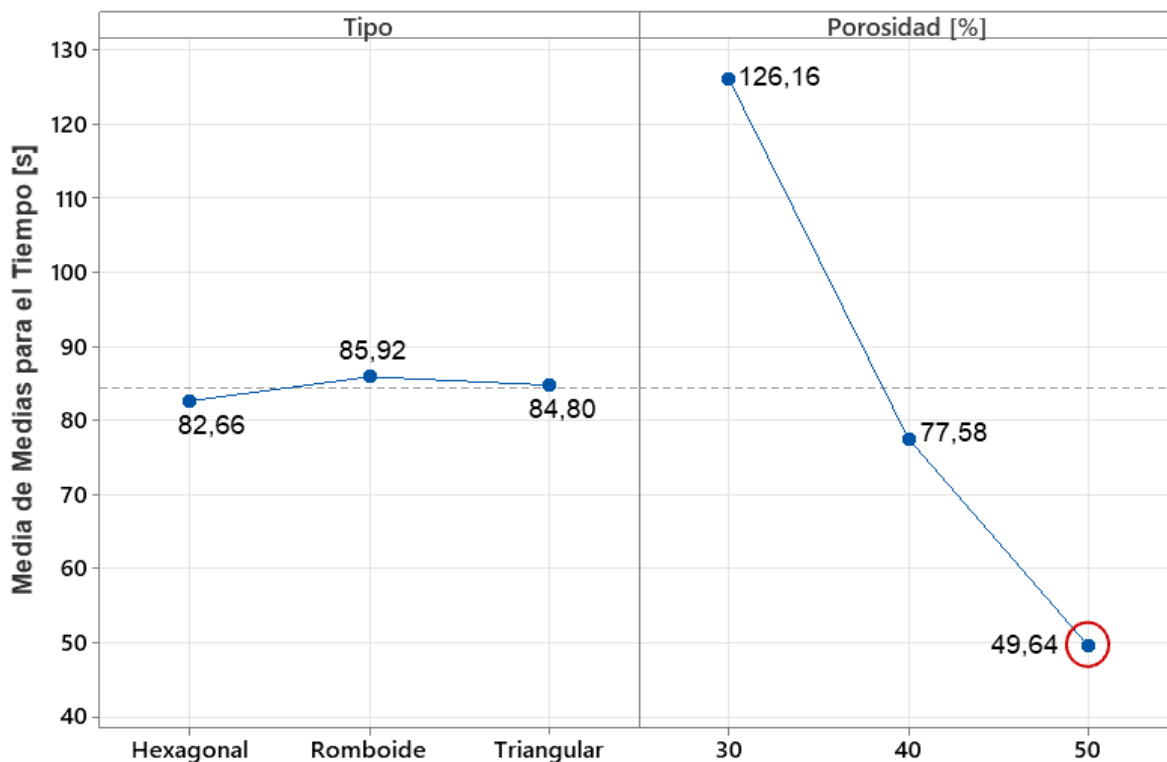
Nota. Configuración "Más pequeño es mejor"

Con referencia a la Tabla 9, el Porcentaje de Porosidad sigue siendo el factor que mayor relevancia tiene, para este caso en el Tiempo, representando el 93,47% y, de igual manera el Tipo de Celosía no es un factor de relevancia.

Así mismo, esto lo podemos evidenciar en la gráfica de efectos principales para medias que se muestra en la Figura 84.

Figura 84

Gráfica de efectos principales para medias del Tiempo.



Como se observa al lado derecho de la Figura 84, el nivel 3 del porcentaje de Porosidad (50%) garantiza el menor Tiempo (valor medio) en el que el componente alcanza el mayor Grado de inclinación y este valor es 49,64 segundos.

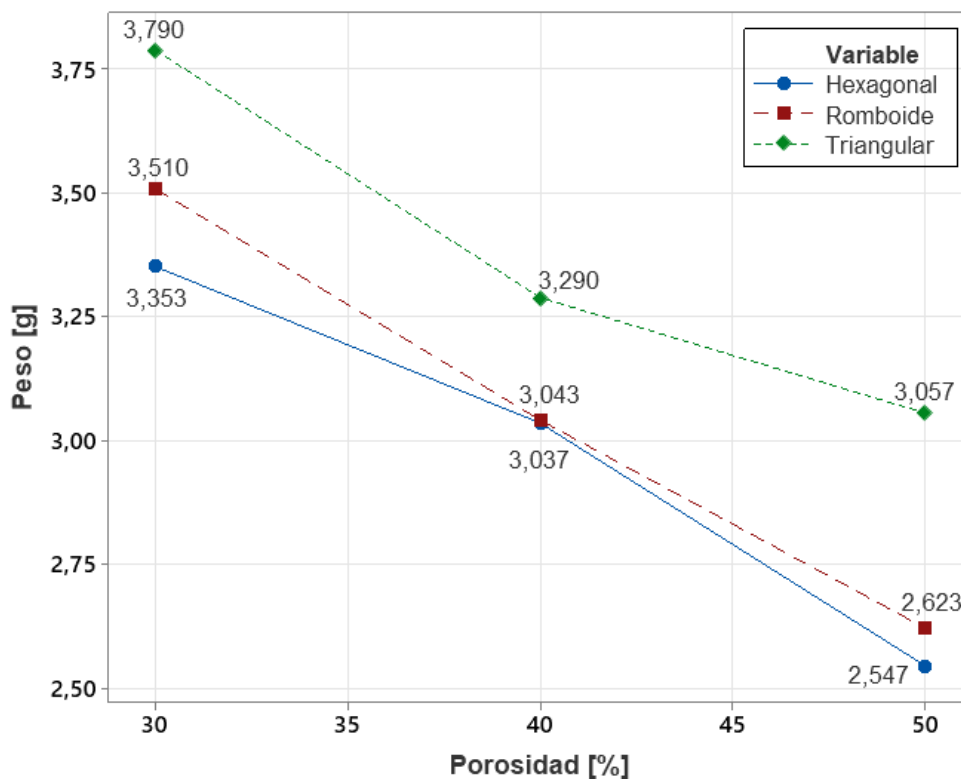
Discusión. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la tabla de relaciones S/N y la gráfica de medias para el Tiempo, podemos decir que un componente con un porcentaje de Porosidad del 50% alcanza su grado máximo de inclinación en el menor tiempo posible, sin importar que tipo de Celosía tenga el componente.

Resultados para el Tipo de Celosía

Según los resultados obtenidos para el Grado de inclinación y Tiempo, se observó que el Tipo de Celosía no es un factor de relevancia, para demostrar esto, la Figura 85 representa una gráfica de dispersión del Peso vs el porcentaje de Porosidad de cada Celosía.

Figura 85

Gráfica Peso vs Porcentaje de Porosidad para los 3 tipos de Celosías.



En la Figura 85 se puede observar que la relación del Peso es inversamente proporcional con el porcentaje de Porosidad, es decir, un componente con mayor porcentaje de Porosidad será más liviano, y esto es verdadero ya que la porosidad relaciona la cantidad de material extraída del componente 100% sólido.

Ahora bien, se puede observar que esta relación se mantiene en los tres tipos de Celosía, y a pesar de que existe diferencia entre cada tipo, esta no es significativa ya que se habla de aproximadamente de 0,5 gramos de diferencia entre la celosía con menor y mayor peso.

Discusión. Se puede concluir que realmente el factor que afecta en el Grado de inclinación y Tiempo es el Peso, el cual tiene una relación inversamente proporcional con el porcentaje de Porosidad.

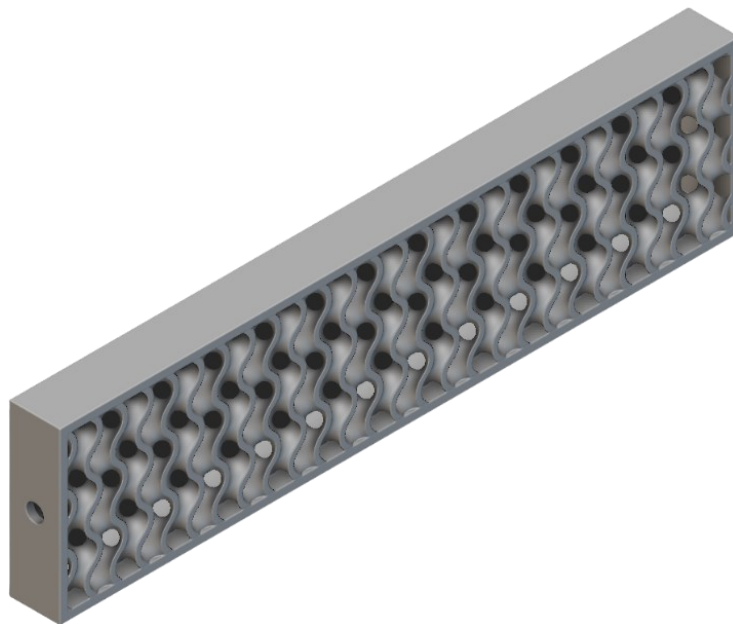
Diseño y fabricación de un componente con celosía Gyroid

Debido a que se determinó que el Tipo de Celosía es un factor que no afecta en el funcionamiento del componente, se propone diseñar y fabricar un componente con una Celosía TPMS, específicamente una celosía Gyroid para comparar con las Celosías Planas, pero manteniendo un porcentaje de Porosidad del 50% ya que este si es un factor que afecta directamente en el funcionamiento.

El componente con celosía Gyroid fue diseñado mediante el Software nTop como se muestra en la Figura 86.

Figura 86

Diseño del componente con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.

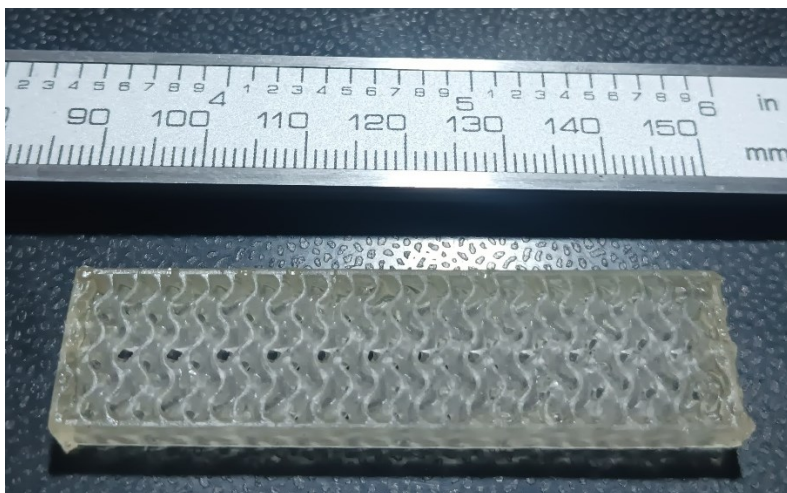


Nota. Componente obtenido mediante el software nTop.

Luego de obtener el diseño del componente y el respectivo archivo STL se imprimió con la orientación “ZX” y el resultado es el que se muestra en la Figura 87.

Figura 87

Componente con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50% impreso.



Finalmente, a este componente se realizó el experimento para determinar el Grado de inclinación máximo que alcanza y el tiempo que se demora en hacerlo.

Resultado del Ángulo de inclinación y Tiempo. Para contrastar con los otros componentes con Celosías planas, se presentan las Tablas 10 y 11.

Tabla 10

Resultado para el Ángulo de inclinación alcanzado de las 4 celosías propuestas.

N° réplica	Gyroid	Hexagonal	Triangular	Romboide
1	70	70	69	70
2	70	70	69	70
3	70	70	69	70
Media	70	70	69	70

Nota. Todos los componentes tienen un porcentaje de Porosidad del 50%, todas las unidades son [°].

Se puede apreciar en la Tabla 10 que la Celosía Gyroid alcanzó un Grado de inclinación máximo de 70°, igual que las Celosías Hexagonal y Romboide, únicamente la Celosía Triangular alcanzó 1° menos de inclinación.

Tabla 11

Resultado para el Tiempo de las 4 celosías propuestas.

N° réplica	Gyroid	Hexagonal	Triangular	Romboide
1	40,75	42,90	57,23	49,15
2	41,27	42,31	56,29	49,79
3	40,82	41,28	55,89	51,89
Media	40,95	42,16	56,47	50,28
Desviación estándar	0,282	0,82	0,688	1,433

Nota. Todos los componentes tienen un porcentaje de Porosidad del 50%. Todas las unidades son [s].

En la Tabla 11, se observa que la Celosía Gyroid obtuvo el valor medio más bajo que las otras Celosías y con un valor bajo de desviación estándar. Por otro lado, la Celosía Triangular fue la que obtuvo el valor medio más alto.

Discusión. Con los resultados presentados en las Tablas 10 y 11, podemos decir que para el Ángulo de inclinación máximo alcanzado el tipo de Celosía no es un factor de gran significancia, sin embargo, para el Tiempo si existe una preferencia para hacer uso de la Celosía Gyroid.

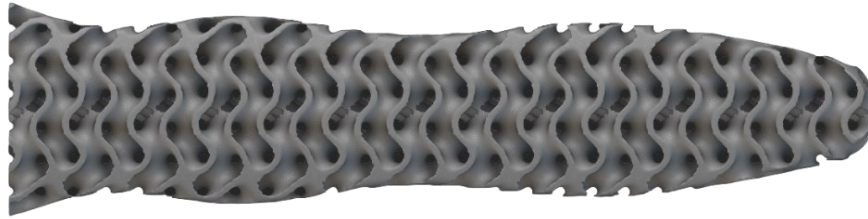
Validación

Diseño y fabricación del prototipo final

El prototipo final propuesto para la validación es el que se muestra en la Figura 88, consiste en un dedo de 60 milímetros de largo y 4,5 milímetros de espesor, se encuentra formado por una estructura de Celosía tipo Gyroid y tiene un porcentaje de Porosidad del 50%.

Figura 88

Diseño del Prototipo Final con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.

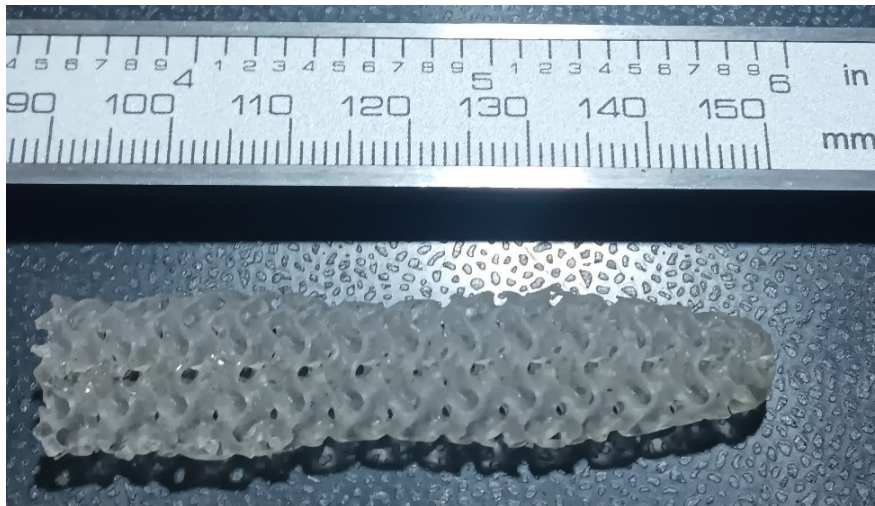


Nota. Prototipo obtenido mediante el software nTop.

En la Figura 89 se muestra el prototipo final impreso luego del proceso de poscurado.

Figura 89

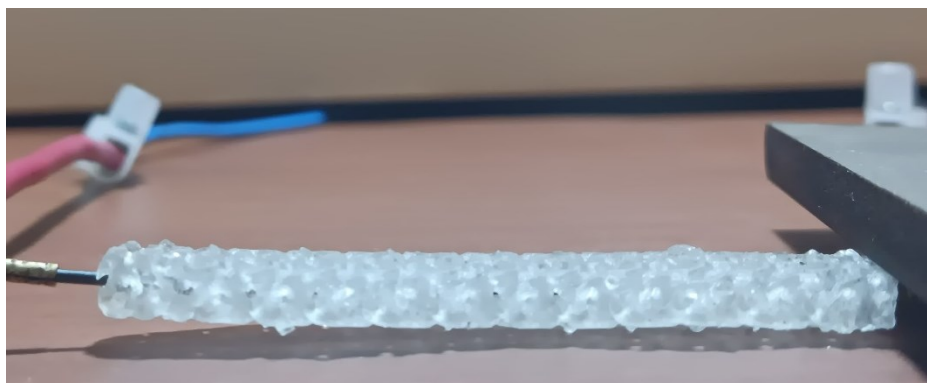
Prototipo Final con celosía Gyroid y porcentaje de Porosidad del 50%.

***Resultados de Ángulo de inclinación y Tiempo***

En la Figura 90 se observa el prototipo final con el circuito eléctrico de actuación apagado, se observa cómo tiene un ángulo de 0° respecto a la horizontal.

Figura 90

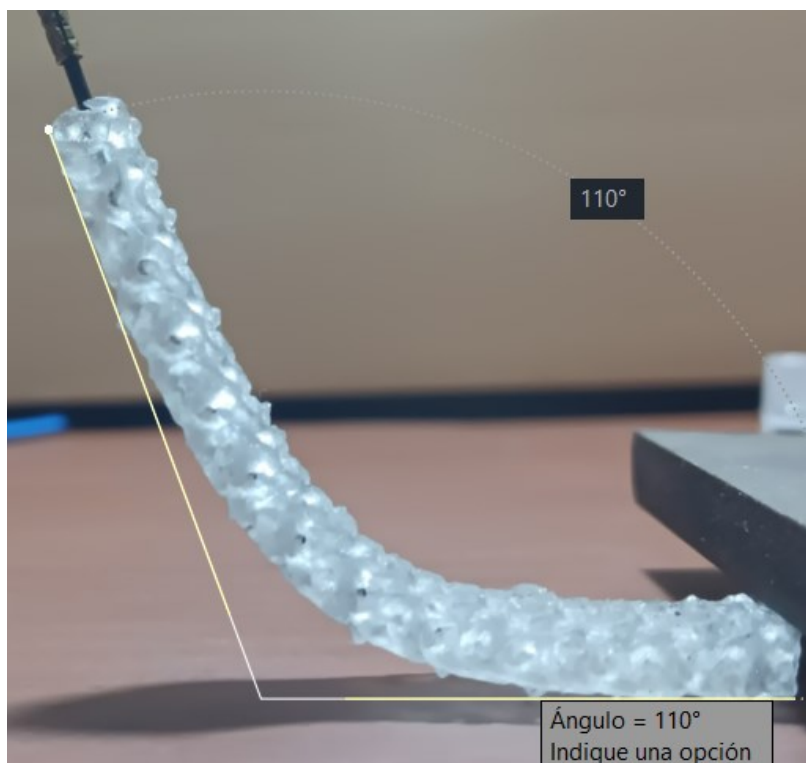
Prototipo Final con el circuito eléctrico de actuación apagado.



Luego de encender el circuito eléctrico de actuación, el prototipo final alcanza su máximo grado de inclinación como se muestra en la Figura 91.

Figura 91

Prototipo Final con el circuito eléctrico de actuación encendido.



En la Tabla 12 se resume el Ángulo de inclinación alcanzado y el tiempo para el prototipo final, luego de realizar 3 pruebas.

Tabla 12

Resultado para el Ángulo de inclinación alcanzado y Tiempo del Prototipo final.

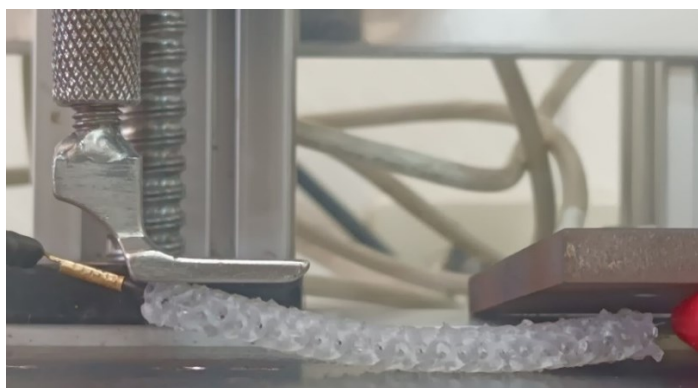
N° Réplica	Ángulo de inclinación [°]	Tiempo [s]
1	70,00	39,17
2	70,00	38,40
3	70,00	38,85
Media	70,00	38,81
Desviación estándar	0,00	0,38

Discusión. Según los resultados presentados en la Tabla 12, el prototipo final obtuvo un grado de inclinación máximo de 70°, igual que los anteriores componentes de prueba, sin embargo, el tiempo que se tardó en alcanzar dicho ángulo fue de 38,81 segundos de media, menor que los anteriores componentes y esto debido a que el peso del prototipo es solamente 1,30 gramos.

Resultados de Fuerza

Figura 92

Implementación del circuito para medir la fuerza del Prototipo final.



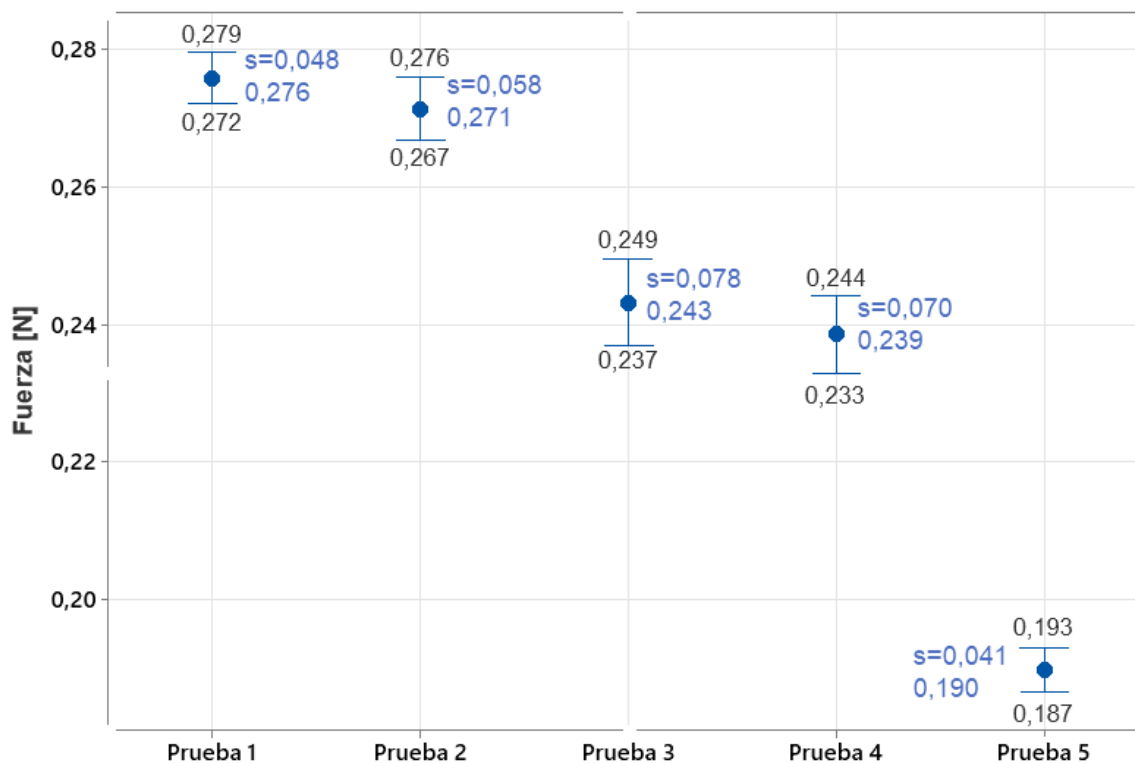
Igual que para la característica física del Nitinol, se realizaron 5 réplicas, pero ahora usando el método propuesto en el Capítulo III Figura 53. La implementación del circuito se

muestra en la Figura 92, se usó un acople plano para que el Prototipo tenga una superficie llana donde aplicar la fuerza y se colocó en la punta para obtener la mayor fuerza posible.

La Figura 93 muestra una gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas realizadas al Prototipo final. Como se observa, se tiene un comportamiento decreciente en los valores de Medias igual que sucedió con la medición de fuerza del alambre de Nitinol en su característica física.

Figura 93

Gráfica de intervalos para la Fuerza de las 5 pruebas del Prototipo Final.



En la Tabla 13, se muestran los resultados de Fuerza media y máxima con su desviación estándar, donde se puede observar que el Prototipo final obtuvo una Fuerza máxima de 0,3 [N] en todas las pruebas excepto en la última.

Tabla 13

Resultado para la Fuerza de las 5 pruebas del Prototipo final.

Fuerza [N]	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5
Media	0,276	0,271	0,243	0,239	0,190
Máxima	0,300	0,300	0,300	0,300	0,200
Desviación estándar	0,048	0,058	0,078	0,070	0,041

Fuerza de agarre equivalente. Con la fuerza máxima obtenida de 0,3 [N] podemos obtener la fuerza de agarre equivalente que tendrá el Prototipo final para levantar objetos, recordando que se propone una aplicación de un dedo de una prótesis de mano.

Por lo tanto, la fuerza de 0,3 [N] equivalen a la fuerza de agarre que tendría un solo dedo, sin embargo, para levantar objetos pequeños, lo hacemos mínimo con 2 dedos, entonces, si empleamos nuestro Prototipo final en la aplicación mencionada, se tendrá una fuerza de agarre con 2 dedos equivalente a 0,6 [N].

Con esta fuerza de agarre podemos determinar el peso máximo de objetos pequeños que se podrán levantar, mediante la siguiente ecuación:

$$F = m \times 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2)$$

Donde,

F = Fuerza de agarre

m = Masa en unidades de kg

Entonces,

$$m = \frac{0,6 [N]}{9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]} = 0,06116 [kg] = 61,16 [g]$$

Discusión. El Prototipo final alcanzó una fuerza máxima de 0,3 [N], si lo empleamos en una aplicación de un dedo en una prótesis de mano, podremos generar una fuerza de agarre máxima de 0,6 [N] usando 2 dedos. Entonces, se puede concluir que podremos levantar objetos con una masa de hasta 61 gramos, lo cual podría resultar útil en actividades diarias como, comer, cepillarse los dientes, colocarse lentes, etc. Además, el dedo se puede flexionar o doblar 70° para facilitar el movimiento y agarre.

Capítulo V

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones

La Ingeniería Mecatrónica en su amplio campo de aplicación multidisciplinaria, permite la integración, ejecución y creación de nuevas tecnologías para estudiar la combinación de materiales que permitan desarrollar prototipos con característica de robótica blanda en aplicaciones de índole industrial o social.

El uso del alambre de Nitinol como aleación de memoria de forma a través de un circuito de corriente AC permitió desarrollar un prototipo para robótica blanda en conjunto con un componente flexible impreso en 3D mediante estereolitografía el cual tiene una estructura porosa tipo celosía. La aplicación de este prototipo garantiza optimización de recursos tanto en material como en equipo de accionamiento, ya que el movimiento se genera mediante calor por Efecto Joule mediante corriente AC con valores de 12 [V] y 1 [A], haciendo posible una acción mecánica sin actuadores mecánicos.

El mejor resultado para lograr un entrenamiento de memoria de forma de 1 camino en el alambre de Nitinol fue calentarlo en un horno a 500°C durante 45 minutos y realizar un enfriamiento lento para no causar un choque térmico ni afectar en las TTRs propias del material, las cuales resultaron en $A_s = 30,61$ [°C] y $A_f = 41,02$ [°C].

El estudio de la integración de celosías en el componente flexible permitió determinar que el tipo de celosía no afecta en la capacidad de actuación del prototipo, sin embargo, la porosidad si influye directamente, el mejor porcentaje de porosidad para garantizar una buena actuación mecánica fue del 50%.

El prototipo final obtuvo una fuerza de agarre de 0,3 [N] lo cual garantiza que en una aplicación de pinza o dedos de una prótesis se pueda levantar objetos de hasta 60 [g].

Recomendaciones

Realizar la obtención de las TTRs del alambre de Nitinol mediante el uso del Calorímetro Diferencial de Barrido (DSC) para comparar los resultados con el método realizado en este estudio.

Estudiar cómo influyen los factores de tipo de celosía y porcentaje de porosidad en el prototipo para aplicaciones donde se requiera tracción o flexión.

Implementar un programa de visión artificial para calcular de manera automática los ángulos de inclinación del prototipo evitando así gastar tiempo en el procesamiento manual de dichos datos y permitiendo realizar más pruebas de funcionamiento para obtener resultados más aproximados.

Diseñar un circuito DC con modulación de ancho de pulso (PWM) para tener un control en la actuación de memoria de forma del alambre de Nitinol y comparar con el circuito AC para determinar cuál proporciona mayor temperatura.

Trabajo futuro

Con el estudio realizado de la integración de un componente flexible impreso en 3D y el alambre de Nitinol, se propone como trabajo futuro diseñar y fabricar una garra mecánica flexible para una aplicación de recolección de objetos frágiles y comparar con una ventosa, mostrando las ventajas de usar una aleación de memoria de forma como actuador mecánico.

Bibliografía

- ASTM. (2011). Standard Terminology for Additive Manufacturing — Coordinate Systems and Test. *F2921-11, i*, 1–13. <https://doi.org/10.1520/F2921>
- Burlacu, L., Danila, C., Birnoveanu, T. I., Cimpoesu, N., & Bujoreanu, L. (2020). *Analyze of shape memory wires behavior under external solicitation using finite elements analysis (FEA)*. *1037(1)*, 8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1037/1/012031>
- de la Flor, S. (2005). Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma. *Metal Actual*, *36*, 36–41. http://www.metalactual.com/revista/15/aleaciones_con_memoria.pdf
- Ersin, T., Mehmet, C. F., & Sezgin, E. (2021). *Measurement of temperature and displacement with NiTi actuators under certain electrical conditions*. *9*, 8. <https://doi.org/10.21595/jme.2021.21841>
- Escola d'Oficis Catalunya. (2022). *¿Qué es el efecto Joule y en qué ámbitos se aplica?* <https://eoc.cat/efecto-joule/>
- Fernández, E., Jaramillo, P., González, H., Nakouzi, J., & Padilla, T. (2017). Dimensión vertical oclusal mediante antropometría de los dedos de la mano. Validación del método antropométrico de Ladda. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral*, *10(3)*, 149–152. <https://doi.org/10.4067/s0719-01072017000300149>
- Formlabs. (2020a). *Elastic 50A Resin Data sheet*.
- Formlabs. (2020b). Flexible 80A. *Material Data Sheet*, 5–6.
- Formlabs. (2022). *Familia de resinas: Elastic 50A*. <https://formlabs.com/latam/materials/flexible-elastic/>
- FormLabs. (2022). *Guía sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA) de 2020*. <https://Formlabs.Com/>. <https://formlabs.com/latam/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>
- Gen3D. (2021). *Types of lattices for additive manufacturing – the terms all engineers need to*

- know*. <https://gen3d.com/news-and-articles/types-of-lattices-for-additive-manufacturing/>
- Iber 3D. (2018). *No Title*. <https://www.iber3d.es/es/noticias/detalle/estructuras-lattice-en-impresion-3d>
- Liou, F. F. (2019). *Rapid Prototyping and Engineering Applications* (T. & Francis (ed.); Second edi).
- Lucia. (2019). *¿Qué es la impresión 4D y como cambiará la fabricación?* - 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/que-es-la-impresion-4d-021020192/#!>
- Machado, L. G., & Lagoudas, D. C. (2008). *Introduction to Shape Memory Alloys*. 25. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>
- México, P. (2022). *Conceptos básicos de manufactura aditiva : Plastics Technology México*. Plastics Technology México. <https://www.pt-mexico.com/articulos/conceptos-bsicos-de-manufactura-aditiva>
- Mundo Electrónica. (2020). *Control de corriente para fuente DC-DC Buck | Diseño y explicación*. <https://www.youtube.com/watch?v=jqqwl2bF7bM&list=WL&index=3&t=1235s>
- Nexmetal Corporation. (n.d.). *NITI • NITINOL SMA SHAPE MEMORY ALLOY WIRE*. <https://nexmetal.com/products/nitinol-memory-wire?variant=16787624516>
- Plastico. (2019). *La manufactura aditiva avanza del prototipado a la producción*. <https://www.plastico.com/es/noticias/la-manufactura-aditiva-avanza-del-prototipado-la-produccion>
- Qu, I., Mart, R., Nestoso, N. E. Z., & Specia, R. Z. (2011). *Nitinol, un biomaterial con memoria de forma*. 91.
- Rastogi, N. (n.d.). *Soft Robotics: Robots Featuring Biological Movements*. *Engineers Garage*. <https://www.engineersgarage.com/soft-robotics-robots-featuring-biological-movements/>
- Seas. (2016). *Materiales con memoria de forma, el Nitinol | Blog SEAS*. https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/
- Soto, A., Olave, ;, Binivignat, O., Soto, A. ;, Olave, E. &, Binivignat. (2013). *Características*

Biométricas de los Huesos Metacarpianos en Individuos Chilenos Biometric Characteristics of the Metacarpal Bones in Chilean Individuals. *Int. J. Morphol*, 31(3), 809–812.

YúbalFM. (2020). *Qué es la impresión 4D, qué materiales se usan y para qué puede servir.*

Xataka. <https://www.xataka.com/basics/que-impresion-4d-que-materiales-se-usan-puede-servir>