

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

DESARROLLO DE UN ACTUADOR CON MEMORIA DE FORMA EMBEBIDO EN UN
COMPUESTO HÍBRIDO PARA ALAS FLEXIBLES

POR

DIEGO ISAIAS REDUCINDO ALMANZA

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACION EN ESTRUCTURAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N. L., JULIO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

DESARROLLO DE UN ACTUADOR CON MEMORIA DE FORMA EMBEBIDO EN UN
COMPUESTO HÍBRIDO PARA ALAS FLEXIBLES

POR

DIEGO ISAIAS REDUCINDO ALMANZA

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACION EN ESTRUCTURAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA. N. L., JULIO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Desarrollo de un actuador con memoria de forma embebido en un compuesto híbrido para alas flexibles", realizada por el estudiante Diego Isaias Reducindo Almanza, con número de matrícula 2125684, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en ciencias de la Ingeniería Aeronáutica con Orientación en Estructuras.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Carlos Garza Rodríguez Director

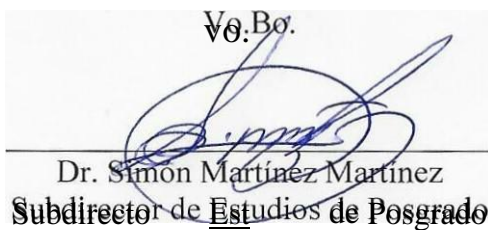
Dr. Luis Arturo Reyes Osorio
Co-director

Dr. Octavio García Salazar Revisor

Dr. Carlos Antonio Santana Delgado Revisor

Dr. Miguel Fernando Delgado Pámanes
Revisor

Vº. Bº.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 5635 II Acta

Núm. 4293

Ciudad Universitaria, a 04 de Diciembre de 2023.

Agradecimientos

A mi familia, por su inquebrantable apoyo, aliento y amor incondicional durante mi trayectoria académica. Su presencia ha sido mi motivación para alcanzar esta meta.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías, CONAHCYT, por el financiamiento de la beca durante el periodo de mis estudios de maestría.

A mis queridos amigos, por estar siempre a mi lado, compartiendo diferentes momentos, y por brindarme ese necesario equilibrio entre el estudio y la distracción, su apoyo ha sido invaluable.

Al Dr. Carlos Garza Rodríguez, por su guía experta, paciencia y dedicación en cada etapa de este proceso de investigación. Sus conocimientos y consejos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, mi desarrollo académico y personal.

Al Dr. Luis Arturo Reyes Osorio, por su valiosa contribución y aportes, que enriquecieron significativamente esta tesis. Su compromiso académico ha sido de gran valor para alcanzar los objetivos planteados, mi desarrollo académico y personal.

Al Dr. Luis Alberto López Pavón, por su valiosa contribución y aportes, que enriquecieron significativamente este trabajo. Su compromiso académico ha sido de gran valor para alcanzar los objetivos planteados y mi desarrollo académico.

Al Dr. Miguel Delgado Pámanes y docentes de la UPIIZ, por su valiosa contribución y aportes que ayudaron para el desarrollo de este trabajo.

A los compañeros y docentes del posgrado que, de una u otra manera, brindaron su ayuda y conocimientos para el desarrollo de este trabajo.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	4
Tabla de contenidos	5
Lista de figuras	9
Lista de tablas	12
Resumen	13
Capítulo 1. Introducción	14
Justificación	15
1.1. Hipótesis	15
1.2. Objetivo	16
1.2.1. Objetivos específicos	16
Capítulo 2. Revisión de la literatura	17
2.1. Introducción	17
2.2. Mecanismos flexibles	19
2.2.1. Ventajas de los mecanismos flexibles	21
2.2.2. Retos de los mecanismos flexibles.	21
2.2.3. Antecedentes históricos	22
2.2.4. Flexibilidad y deflexión	22
2.3. Alas flexibles	23
2.3.1. Pielas flexibles	28
2.4 Materiales Inteligentes	29
2.4.1. Materiales con memoria de forma	30
2.4.2. Aleaciones con memoria de forma	31
2.4.3. Histéresis	32
2.4.4. Efecto Joule	33
2.4.5. Efecto de memoria de forma	33

2.4.6. Superelasticidad	36
2.4.7. Plasticidad	37
2.4.8. Híbridos con memoria de forma	38
2.4.9. Compuestos con memoria de forma	39
2.4.10. Materiales hiperelásticos	40
2.4.11. Modelado	41
2.5. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad	48
2.6. Actuadores con memoria de forma	52
2.7. Resumen	55
Capítulo 3. Metodología	56
3.1. Concepto	56
3.2. Desarrollo experimental de un actuador con memoria de forma	57
3.2.1. Selección de materiales	57
3.2.2. Diseño de actuador de borde ala	60
3.2.3. Manufactura del actuador con memoria de forma	61
3.2.4. Análisis de propiedades mecánicas	63
3.2.5. Análisis matemático de actuador mediante viga con carga de momento en el extremo	65
3.2.6. Pruebas de actuación	67
3.3. Simulación del actuador con memoria de forma	71
3.3.1. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad	71
3.3.2. Simulación del mecanismo flexible	74
3.4. Implementación del mecanismo flexible en VANT	77
3.4.1. Modelo CAD de la aeronave no tripulada	78
3.4.2. Manufactura del modelo del VANT	79
3.4.3. Implementación del mecanismo flexible	80

3.5. Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional para el mecanismo flexible	80
3.6. Pruebas en túnel de viento	81
3.7. Resumen	83
Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados	84
4.1. Manufactura del mecanismo flexible	84
4.2. Propiedades mecánicas	86
4.2.1. Ensayo de flexión	87
4.2.2. Pruebas con cámara termográfica	89
4.2.3. Pruebas de actuación	93
4.3. Análisis matemático del mecanismo mediante viga con carga de momento en el extremo	96
4.4. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad	100
4.4.1. Modelo de Auricchio mediante ANSYS	101
4.4.2. Simulación del efecto de memoria de forma, mediante calentamiento por efecto Joule	105
4.4.3. Simulación de efectos de superelasticidad y memoria de forma para diferentes secciones transversales mediante ANSYS y COMSOL	106
4.4.4. Simulación del mecanismo flexible	116
4.4.5. Simulación de configuraciones del mecanismo flexible	117
4.5. Implementación del mecanismo flexible en VANT	120
4.6. Simulación de dinámica de fluidos computacional del mecanismo	121
4.7. Resumen	134
Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro	135
5.1. Trabajo futuro	137
Referencias bibliográficas	138
Anexos	145
Anexo 1. Propiedades Nitinol	145

Anexo 2. Propiedades mecánicas material compuesto	147
Anexo 3. Propiedades Nitinol para simulación en ANSYS	148
Anexo 4. Propiedades Ni-Ti para simulación en COMSOL	149
Anexo 5. Metodología para simulación de SMA en COMSOL	151

Lista de figuras

Figura 1. Diferentes formas de alas de aves cazando [2].	17
Figura 2. Actuador de geometría variable de Boeing [2,6].	18
Figura 3. Mecanismo de liberación lineal para nanosatélite [5].	19
Figura 4. a) Mecanismos rígidos y b) mecanismos flexibles; pistón, pinzas de presión, pinzas de presión flexibles, mecanismo de guía paralela [8,9].	20
Figura 5. Mecanismo de vector de control de empuje con 2 grados de libertad [8].	20
Figura 6. Mecanismos flexibles comunes [9].	22
Figura 7. Línea del tiempo de las aplicaciones de las alas flexibles [14].	25
Figura 8. Concepto de la NASA de alas flexibles y ángulo de deflexión [2].	25
Figura 9. Posible diseño de dispositivos inteligentes implementados en aeronaves [2].	26
Figura 10. Programa SARISTU [2].	26
Figura 11. Diagrama de la estructura de un ala flexible.	28
Figura 12. Fuerzas aerodinámicas en un ave [18].	28
Figura 13. Proyección global de las aplicaciones de materiales inteligentes [4].	30
Figura 14. Curva de histéresis simple [25].	32
Figura 15. Representación esquemática del efecto de memoria de forma [4,23].	34
Figura 16. Curva de transformación de las SMA debido a la transición entre $M_f < M_s < A_s < A_f$ [23].	35
Figura 17. Efecto de memoria de forma (a) unidireccional, (b) bidireccional [4].	36
Figura 18. Respuesta mecánica: (a) memoria de forma y (b) superelasticidad [23].	37
Figura 19. Ciclo típico de pseudoelasticidad [30].	38
Figura 20. Materiales compuestos reforzados por diferentes orientaciones de fibras, a) 0° , b) 45° , c) 90° , d) -45° y e) orientación aleatoria [23].	39
Figura 21. Diagrama de esfuerzo-deformación de un material suave y un metálico [34]	40
Figura 22. Diagrama idealizado de esfuerzo-deformación para efecto de superelasticidad [44].	46
Figura 23. Rutas admisibles para el comportamiento elástico y transformación para el efecto de memoria de forma [44].	47
Figura 24. Actuador de borde de ala de Boeing con mecanismo rotatorio; Datos de movimiento bajo cargas aerodinámicas realistas y pruebas de vuelo.[57].	52
Figura 25. Concepto de diseño de actuadores con memoria de forma.	56
Figura 26. UAV REPTILE S800 Sky Shadow MINI FPV Wing [70].	60
Figura 27. Casos de estudio.	61
Figura 28. Borde de ala del VANT.	61
Figura 29. Herramental para alambres.	62
Figura 30. Distribución geométrica de los alambres, (a) no perpendicular y (b) perpendicular.	62
Figura 31. Modos de actuación de alambres con memoria de forma embebidos (a) flexión, (b) torsión y (c) flexión y torsión [21].	63
Figura 32. Viga en voladizo con un momento aplicado en el extremo libre [9].	65
Figura 33. Diferentes calibres de alambre con memoria de forma.	67
Figura 34. Sistemas de (a) control con PWM, (b) circuito oscilador simple.	69
Figura 35. Probetas para pruebas de actuación (a) flexión y (b) flexión-torsión.	70
Figura 36. Configuración para la prueba actuación.	70
Figura 37. Metodología para el análisis de elemento finito [77].	71
Figura 38. Metodologías de simulación para propiedades de materiales inteligentes.	72

Figura 39. Diagrama de simulación de actuador con memoria de forma.	75
Figura 40. Modelo CAD del mecanismo flexible.	76
Figura 41. Mallado a) y condiciones iniciales b).	76
Figura 42. Escaneo del VANT, a) modelo del VANT, b) borde de ala y c) ala.	78
Figura 43. Modelo CAD del VANT.	79
Figura 44. Modelo modificado del VANT.	79
Figura 45. Proceso de manufactura 3D del modelo.	80
Figura 46. Modelo del VANT para implementación del mecanismo flexible.	80
Figura 47. Geometrías para análisis CFD, borde (a) plano, (b) original y (c) actuador.	81
Figura 48. Túnel de viento subsónico de baja turbulencia.	82
Figura 49. Sección de prueba del túnel de viento subsónico.	82
Figura 50. Proceso de manufactura en bolsa de vacío.	85
Figura 51. Laminados de probetas.	85
Figura 52. Proceso de corte del mecanismo flexible.	86
Figura 53. Cortes para material compuesto, (a) disco de corte (b) láser y (c) herramienta mecánica.	87
Figura 54. Probetas para prueba de flexión.	87
Figura 55. Ensayo de flexión.	88
Figura 56. Gráfica de esfuerzo-deformación flexural.	89
Figura 57. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol unidireccional.	90
Figura 58. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibres 75 μm y 150 μm .	91
Figura 59. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibres 250 μm LT y 250 μm HT.	92
Figura 60. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibre 375 μm LT.	92
Figura 61. Imágenes térmicas de calibre de alambre 375 μm LT embebido en compuesto híbrido.	93
Figura 62. Probetas para prueba de actuación, modos de actuación a) flexión y b) flexión-torsión.	93
Figura 63. Deformación (mm) de la probeta.	94
Figura 64. Prueba de actuación para probeta de alambre de Nitinol embebido en compuesto híbrido.	94
Figura 65. Prueba de actuación para el modo de actuación a flexión-torsión.	95
Figura 66. Prueba de actuación para el mecanismo flexible.	96
Figura 67. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 250 μm .	98
Figura 68. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 375 μm .	99
Figura 69. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 500 μm .	100
Figura 70. Mallado y condiciones iniciales para efecto de superelasticidad.	101
Figura 71. Deformación (a) y dirección de la fuerza de reacción (b) para el efecto de superelasticidad.	102
Figura 72. Gráficas esfuerzo deformación (a) y fuerza-deformación (b).	103
Figura 73. Mallado y condiciones iniciales para efecto de memoria de forma.	104
Figura 74. a) Deformación (mm) y b) esfuerzo (MPa) para el efecto de memoria de forma bidireccional.	105
Figura 75. a) Deformación (mm), b) esfuerzo (MPa) y c) temperatura ($^{\circ}\text{C}$).	106
Figura 76. Gráficas fuerza-deformación para secciones transversales.	108
Figura 77. Comparación grafica fuerza-deformación para secciones transversales efecto de superelasticidad.	109

Figura 78. Gráficas esfuerzo-deformación para las secciones transversales efecto de superelasticidad.	110
Figura 79. Gráfica esfuerzo-deformación para secciones transversales efecto de superelasticidad.	111
Figura 80. Gráficas fuerza-deformación secciones transversales efecto de memoria de forma.	112
Figura 81. Gráfica fuerza-deformación secciones transversales efecto de memoria de forma	113
Figura 82. Graficas deformación vs. % volumen y esfuerzo vs. % volumen para las diferentes secciones transversales mediante el modelo de Lagoudas.	114
Figura 83. Graficas deformación vs. % volumen y esfuerzo vs. % volumen para las diferentes secciones transversales mediante el modelo de Souza-Auricchio.	116
Figura 84. a) Deformación (mm), b) esfuerzo (MPa).	117
Figura 85. Deformaciones para las diferentes configuraciones de actuadores	119
Figura 86. Mecanismo flexible y borde de ala original.	120
Figura 87. Implementación del mecanismo flexible en el modelo del VANT.	120
Figura 88. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde plano.	122
Figura 89. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde plano.	123
Figura 90. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde original.	124
Figura 91. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde original.	125
Figura 92. Relación L/D para borde original.	126
Figura 93. Relación L/D para borde plano.	126
Figura 94. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para mecanismo flexible.	127
Figura 95. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para mecanismo flexible.	128
Figura 96. Relación L/D para mecanismo flexible.	129
Figura 97. Comparación de coeficientes de sustentación y arrastre para los diferentes bordes a 15 m/s.	130
Figura 98. Comparación de coeficientes de sustentación y arrastre para los diferentes bordes a 30 m/s.	131
Figura 99. Comparación de relación L/D para los diferentes bordes a 15 m/s y 30 m/s.	132

Lista de tablas

Tabla 1. Ventajas de la transformación debido a las alas flexibles [19].	27
Tabla 2. Aplicaciones típicas de aleaciones con memoria de forma [24].	32
Tabla 3. Parámetros para simulación para superelasticidad [44].	47
Tabla 4. Propiedades físicas aleación de NiTi FLEXINOL por DYNALLOY Inc [66].	58
Tabla 5. Propiedades ECOFLEX 00-10 [69].	60
Tabla 6. Configuraciones de sistema de actuación.	77
Tabla 7. Propiedades físicas de la aleación de Nitinol.	148
Tabla 8. Propiedades de memoria de forma y superelasticidad para simulación en ANSYS.	148
Tabla 9. Propiedades Nitinol para el modelo de Lagoudas en COMSOL [62].	149
Tabla 10. Propiedades Nitinol para el modelo de Auricchio en COMSOL [51].	150

Resumen

Nuevos avances en ingeniería han llevado al desarrollo de materiales innovadores para aplicaciones en las alas flexibles, revolucionando nuestra forma de transporte. En lugar de utilizar mecanismos rígidos basados en actuadores mecánicos, hidráulicos, neumáticos y materiales inteligentes, se han adoptado mecanismos flexibles que ofrecen numerosas ventajas, incluida la reducción de costos y un mayor rendimiento. Esto se traduce en una disminución de las fuerzas de arrastre y, en consecuencia, un menor consumo de combustible.

En este trabajo, se desarrolló un mecanismo flexible utilizando una aleación con memoria de forma embebida en un compuesto híbrido. Mediante un modelo numérico, se predijeron los desplazamientos de este mecanismo flexible. La selección adecuada de materiales inteligentes y la configuración óptima del mecanismo permitieron obtener desplazamientos de hasta 22 mm, según lo demostrado en un análisis experimental que fue validado mediante simulación.

Además, este mecanismo flexible se implementó en el borde del ala de una aeronave no tripulada. Mediante un análisis de dinámica de fluidos computacional se determinaron los coeficientes aerodinámicos para diferentes bordes de ala. La incorporación del mecanismo flexible como borde de ala en la aeronave produjo una reducción significativa de los coeficientes aerodinámicos en un rango de 1-12%. Esto demuestra el potencial y la eficacia de estos mecanismos flexibles para mejorar el rendimiento y la eficiencia de las aeronaves.

Capítulo 1. Introducción

Se ha comprobado que los mecanismos flexibles presentan numerosas ventajas en comparación con los mecanismos rígidos. Algunos mecanismos flexibles han sido implementados como actuadores en diferentes componentes de aeronaves. Presentando ventajas como la reducción de los coeficientes aerodinámicos y reducción de ruido, lo que se refleja en un menor consumo de combustible y por lo tanto menores emisiones de contaminantes.

En el presente trabajo se desarrolló un mecanismo flexible conformado por un sistema de actuación conformado por alambres con memoria de forma embebidos en un compuesto híbrido.

El mecanismo flexible se implementó en el borde de ala de una aeronave no tripulada, el cual mejoró las propiedades aerodinámicas de la aeronave.

El segundo capítulo aborda los conceptos esenciales para el desarrollo de mecanismos flexibles implementados en las alas flexibles, analizando sus ventajas y desventajas, los principios fundamentales de las alas flexibles, los materiales inteligentes empleados y la metodología de simulación aplicada en estos sistemas conformados por materiales inteligentes, así como diferentes antecedentes relevantes para el presente trabajo.

En el tercer capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo del mecanismo, incluyendo la selección de los materiales, el proceso de fabricación, las pruebas mecánicas y pruebas de actuación. Además, se presenta una metodología de simulación utilizando ANSYS para la validación del mecanismo.

El cuarto capítulo exhibe los resultados obtenidos, así como la discusión de estos. En las pruebas mecánicas, los desplazamientos generados por el mecanismo a través de análisis analíticos, pruebas experimentales y simulaciones. También se detalla la implementación del mecanismo y los resultados de la reducción de los coeficientes aerodinámicos.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones de este trabajo, recomendaciones y posibles trabajos futuros.

Justificación

Derivado de la necesidad de reducir los costos de consumo de combustible de las aeronaves, se desarrollan materiales inteligentes implementados como sistemas de actuación mecánicos. Teniendo ya desarrollos relevantes en la industria, sin embargo, su implementación como mecanismos flexibles conformados por alambres con memoria de forma embebidos en materiales inteligentes son un concepto de reciente desarrollo. Estos mecanismos tienen aplicaciones como actuadores para aeronaves no tripuladas, mejorando sus características aerodinámicas.

En el presente trabajo se utilizó un sistema de actuación conformado por alambres con memoria de forma embebidos en un compuesto híbrido. Dependiendo de la configuración geométrica se generan diferentes modos de actuación y desplazamientos. El mecanismo se validó mediante un modelo numérico implementado en software de elemento finito. Esta herramienta es útil para el desarrollo de este tipo de mecanismos porque permite predecir el comportamiento de estos conforme a las propiedades de los materiales y la configuración geométrica de los mismos.

La implementación de este tipo de mecanismos mejora los coeficientes aerodinámicos de las aeronaves, su validación mediante simulación y pruebas físicas afirma las suposiciones de estos conceptos para su desarrollo.

1.1. Hipótesis

El desarrollo de un mecanismo flexible conformado por alambres con memoria de forma de Níquel titanio (NiTi) embebidos en un compuesto híbrido generará las deflexiones necesarias para su aplicación en alas flexibles. La implementación del mecanismo mejorará las propiedades aerodinámicas de la aeronave.

1.2. Objetivo

- Diseñar, modelar e implementar un mecanismo flexible conformado por alambres con memoria de forma de NiTi embebido en un compuesto híbrido con aplicación en el borde del ala de una aeronave no tripulada.

1.2.1. Objetivos específicos

- Seleccionar los materiales inteligentes para la manufactura del mecanismo flexible.
- Modelar y simular los efectos de superelasticidad y memoria de forma para una aleación de Níquel-Titanio embebida en un compuesto híbrido.
- Realizar análisis estructural para el mecanismo flexible.
- Implementar el mecanismo flexible en una aeronave no tripulada.
- Realizar la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) para el mecanismo flexible implementado.
- Realizar pruebas de túnel de viento para validar la reducción de los coeficientes aerodinámicos.

Capítulo 2. Revisión de la literatura

En este capítulo se abordan los conceptos básicos para la implementación de los materiales inteligentes necesarios para el desarrollo de los mecanismos flexibles y su implementación en alas flexibles. Partiendo desde sus características como lo son; las propiedades mecánicas y sus configuraciones geométricas para determinados modos de actuación. Se presentan algunos desarrollos de actuadores inteligentes para diferentes aplicaciones de ingeniería.

Derivado del creciente desarrollo de nuevas tecnologías se requiere del desarrollo de modelos matemáticos que describan el comportamiento de estos materiales para su implementación en procesos de simulación en software de elemento finito. Mediante esta herramienta se valida y predice el comportamiento de este tipo de mecanismos.

2.1. Introducción

El cambio en la morfología de algunos seres vivos, por ejemplo; aves y peces les brinda ventajas aerodinámicas para lograr maniobras complicadas, por ejemplo, aves cazando a su presa, como se muestra en la figura 1 [1,2].

Este tipo de seres vivos ha inspirado el desarrollo e implementación del concepto de transformación con aplicaciones de ingeniería, teniendo los desarrollos más relevantes en las disciplinas de ingeniería aeronáutica, aeroespacial, automotriz, biomédica y civil [3].

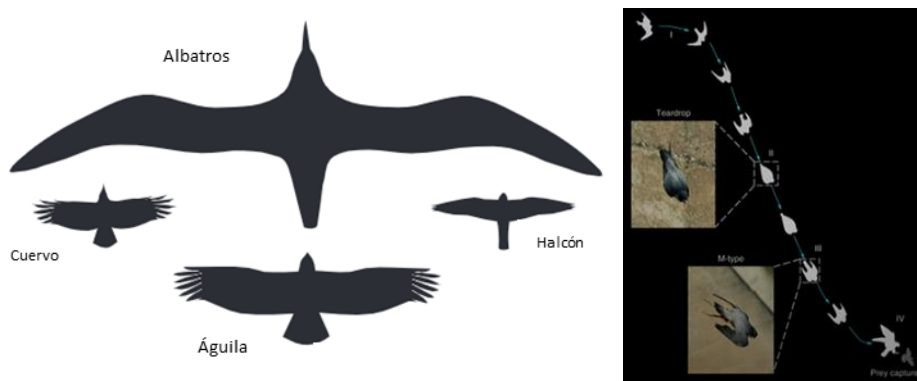


Figura 1. Diferentes formas de alas de aves cazando [2].

Los mecanismos son los agentes de cambio en la morfología de las alas. Estos están conformados por actuadores rígidos o flexibles. En ocasiones estos son fabricados con materiales inteligentes. Los materiales inteligentes son aquellos materiales que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas y mecánicas debido a la aplicación de estímulos generados por un agente externo.

Arun D. et al. [4], desarrollaron mecanismos flexibles conformados por materiales inteligentes como, por ejemplo, materiales termo crómicos, piezoeléctricos, aleaciones con memoria de forma, fotosensibles e hidrogeles.

La implementación de este tipo de materiales como generadores del cambio en la morfología de las alas flexibles ha presentado desarrollos en los últimos años para diferentes sistemas de actuación aeronáuticos y aeroespaciales, como se observa en la figura 2 y figura 3.

Dentro de las aplicaciones más importantes de los materiales inteligentes se presentan los trabajos de la NASA desarrollados con aleaciones con memoria de forma, como la reinención de la rueda para los vehículos aeroespaciales, aplicaciones de implantes, stents cardiovasculares, actuadores de borde de ala para aeronaves no tripuladas y mecanismos lineales para nanosatélites, ver figura 3 [5].

Hartl et al. [6], implementaron un actuador con memoria de forma, fabricado con una aleación de NiTi. Este se utilizó para reducir el ruido del motor de una aeronave, como se muestra en la figura 2.

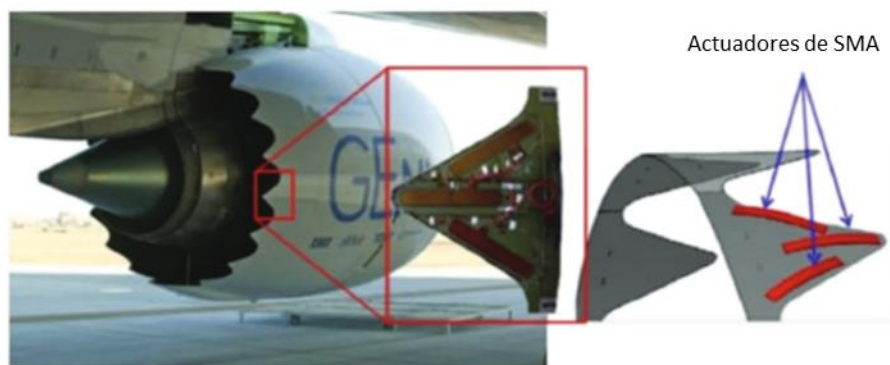


Figura 2. Actuador de geometría variable de Boeing [2,6].

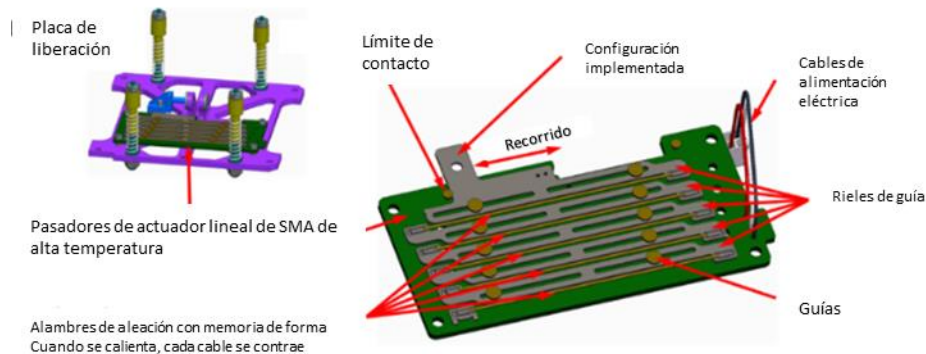


Figura 3. Mecanismo de liberación lineal para nanosatélite [5].

Varios modelos constitutivos describen el comportamiento de las aleaciones con memoria de forma, algunos de ellos basados en la microestructura o mecanismos de cambio. Estos modelos constitutivos fueron desarrollados hace más de 20 años, como por ejemplo el modelo de Longoudas, Auricchio, Tanaka-Nagaki, y Liang-Rogers [7]. Estos modelos son implementados por software de elemento finito para la simulación de las propiedades de memoria de forma y superelasticidad. Software como ANSYS, ABAQUS, MATLAB, COMSOL, LS-DYNA, LAMMPS emplean estos modelos para la simulación las propiedades de los materiales inteligentes.

2.2. Mecanismos flexibles

Un mecanismo es un dispositivo mecánico utilizado para trasferir o transformar movimiento, fuerza o energía. Algunos mecanismos tradicionales como lo son el mecanismo biela manivela, ver la figura 4 (a). Están conformados por eslabones rígidos los cuales consisten en uniones rígidas conectadas por juntas móviles.

Un mecanismo flexible como se muestra en la figura 4 (b), también transfiere o transforma movimiento, fuerza o energía. Sin embargo, a diferencia de los mecanismos de eslabones rígidos, los mecanismos flexibles obtienen parte de su movilidad de la deflexión de sus miembros flexibles en lugar de solo los eslabones rígidos.

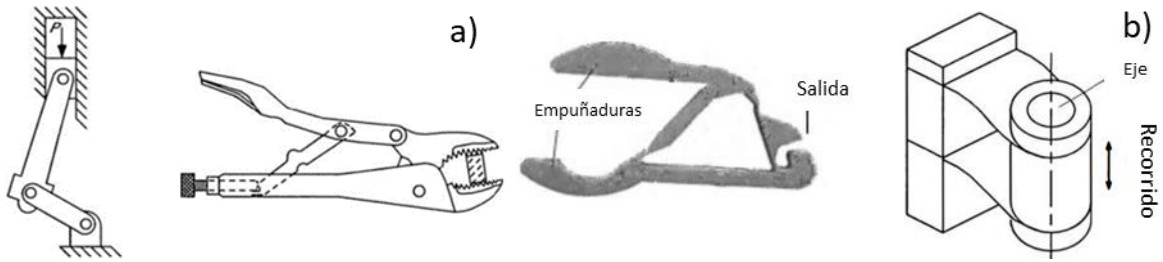


Figura 4. a) Mecanismos rígidos y b) mecanismos flexibles; pistón, pinzas de presión, pinzas de presión flexibles, mecanismo de guía paralela [8,9].

Dentro de los desarrollos destacados de los mecanismos flexibles, se encuentran para el sector aeroespacial, por ejemplo; sistemas de seguridad, apagadores y sistemas de embrague.

En la figura 5 se muestra un mecanismo de vector de control de empuje con dos grados de libertad [8], este mecanismo se usa para el sistema de propulsión de algunos satélites de la NASA en sustitución de un mecanismo rígido, presentando ventajas como la mejora en el sistema de control y reduciendo el ahorcamiento de las líneas de alimentación de combustible.



Figura 5. Mecanismo de vector de control de empuje con 2 grados de libertad [8].

Saggere et al. [10], desarrollaron un sistema de control para estructuras inteligentes usando mecanismos flexibles, este sistema fue evaluado mediante un análisis numérico.

Otra representación de la sustitución de mecanismos rígidos por flexibles se presenta una investigación desarrollada por Konh el al. [11], en donde un alambre con memoria de forma fue utilizado para deformar una barra de aluminio de un dispositivo médico. El modelo fue evaluado

mediante simulación por elemento finito y pruebas experimentales. Se presentó una deflexión máxima de 45.84 mm, sin embargo, el alambre necesito un sistema de aislamiento.

2.2.1. Ventajas de los mecanismos flexibles

Se puede considerar el uso de mecanismos flexibles para cualquier aplicación debido a varias razones. Las ventajas de los mecanismos flexibles se consideran en dos categorías:

- a) Reducción de costos (reducción en el número de piezas, tiempos de ensamblaje, procesos de manufactura simplificados).
- b) Mayor rendimiento (precisión, confiabilidad, menor desgaste, menor peso y mantenimiento).

Debido a que los mecanismos flexibles se basan en la deflexión de miembros flexibles, la energía se almacena en forma de energía de deformación. Presentándose así problemas geométricos y de materiales no lineales.

2.2.2. Retos de los mecanismos flexibles.

Aunque estos ofrecen ventajas, los mecanismos flexibles presentan varios desafíos y desventajas en algunas aplicaciones. Quizás el desafío más grande es la relativa dificultad para analizarlos y diseñarlos. Debido a problemas no lineales. Se requiere conocimiento de diferentes métodos de análisis, síntesis de mecanismos y la deflexión de eslabones flexibles. Así como de las interacciones en situaciones complejas.

El análisis de fatiga suele ser un tema más vital para estos a diferencia de los mecanismos de cuerpo rígido, esto debido a que los eslabones flexibles a menudo se cargan cíclicamente cuando se utiliza un mecanismo flexible. Es importante diseñar los eslabones para que tengan suficiente vida útil, en la figura 6 se presentan algunos mecanismos flexibles que se usan en la vida cotidiana [9,12].

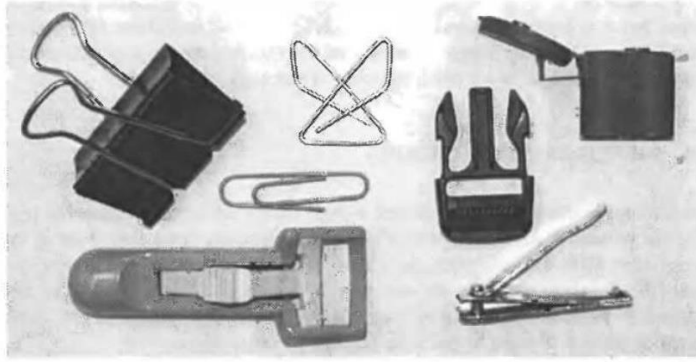


Figura 6. Mecanismos flexibles comunes [9].

2.2.3. Antecedentes históricos

El concepto de mecanismos flexibles para almacenar energía y generar movimiento se ha utilizado durante milenios. Evidencia sugiere que los arcos han estado en uso desde antes del 8000 a. C. Los primeros arcos se construyeron con materiales relativamente flexibles, como madera y tendones de animales. Las catapultas son otro ejemplo del uso temprano de mecanismos flexibles usados por los griegos en el siglo IV a. C. [9,12].

También se han utilizado eslabones flexibles para simular el movimiento de juntas giratorias, por ejemplo, bisagras de flexión para libros.

Estos mecanismos se han construido cambiando la composición y el espesor del material en el punto deseado de flexión para obtener el movimiento deseado [9].

2.2.4. Flexibilidad y deflexión

La flexibilidad es la capacidad de un material o estructura para soportar deformaciones aplicadas por una fuerza. La deflexión es la acción provocada por la presencia de estas fuerzas. Los mecanismos flexibles poseen la capacidad de adaptarse a cualquier entorno debido a un estímulo externo, sin embargo, estas deflexiones superiores son debido a propiedades geométricas y de los materiales utilizados [9].

2.2.4.1 Deflexiones lineales vs no lineales

Para el análisis cinemático tradicional de un mecanismo rígido se asume que sus elementos son rígidos y no se deforman. Esta suposición es adecuada para pequeñas deformaciones, los materiales tendrán alguna deflexión cuando se aplique una carga.

En la gran parte de los análisis de deflexión de eslabones se asume que su deflexión es mínima respecto a las dimensiones de su estructura completa, así como, el material es elástico y que las deformaciones son proporcionales al esfuerzo aplicado. Dichas suposiciones se emplean para simplificar el análisis mediante la linealización de las ecuaciones. Las no linealidades estructurales se dividen en dos:

- a) No linealidades materiales (surgen cuando no se aplica la ley de Hooke, que establece que el esfuerzo es proporcional a la deformación) [4].
- b) No linealidades geométricas (ocurren cuando las deformaciones son tales que alteran la naturaleza del problema).

Las no linealidades que resultan de grandes deformaciones deben tener en cuenta, si la deformación es lo suficientemente grande como para causar cambios significativos en la geometría, como el área o espesor [9,13].

2.3. Alas flexibles

Las alas flexibles son una novedosa tecnología que se ha desarrollado a lo largo de los años, esta tecnología genera beneficios aerodinámicos al modificar la geometría del ala o componentes de la aeronave [14].

El desarrollo del concepto de alas flexibles tiene sus principales desarrollos en el sector industrial. CHU et al. [15], desarrollaron una investigación en donde se presenta una revisión de las aplicaciones de las alas flexibles, donde se abordan desde los primeros desarrollos hasta los más recientes.

En general, las alas flexibles es uno de los campos de estudio de las estructuras inteligentes. Estas tienen el potencial de revolucionar el campo de la aviación, haciendo a las aeronaves más eficientes y seguras al volar.

Ajaj et al. [16] y Grigorie & Botez [17], presentaron diferentes tipos de control y estabilidad para fenómenos de aeroelasticidad mediante el uso de alas flexibles, dependiendo del tipo de diseño, mecanismo implementado y materiales de fabricación. Estos diferentes modelos de control se validaron mediante simulación.

El desarrollo de las alas flexibles no es un concepto reciente, partiendo desde el desarrollo del avión de los hermanos Wright. Diferentes organizaciones gubernamentales y no gubernamentales desarrollan estudios de este, en la figura 7 se presenta una línea del tiempo, en donde se observa desde los primeros desarrollos hasta los más recientes.

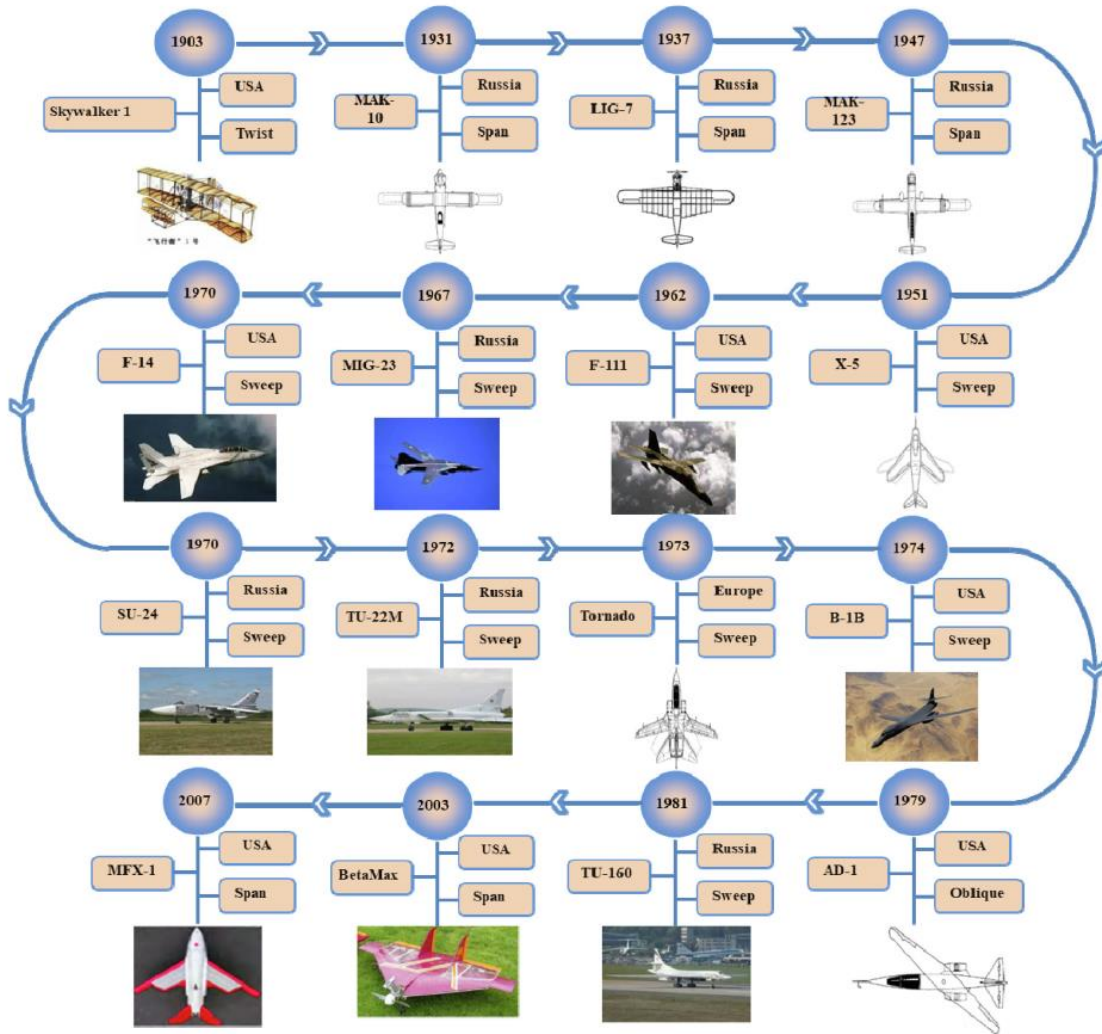


Figura 7. Línea del tiempo de las aplicaciones de las alas flexibles [14].

En particular estudios de la NASA desarrollaron los conceptos básicos de las alas flexibles, ver la figura 8 donde se presenta su concepto de alas flexibles [2,14].

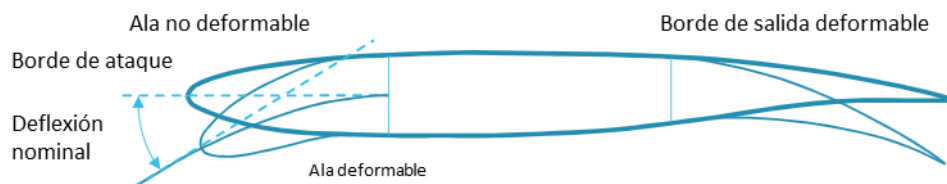


Figura 8. Concepto de la NASA de alas flexibles y ángulo de deflexión [2].

Una implementación reciente del concepto de alas flexibles se presenta en el programa de ala inteligente DARPA, ver la figura 9, donde se puso en funcionamiento deformaciones para los bordes de ataque y de salida de una aeronave del tipo militar.

AIRBUS desarrollo el programa SARISTU (estructuras de aviones inteligentes), un sistema de alas adaptables desarrollado para aeronaves comerciales, ver la figura 10.



Figura 9. Posible diseño de dispositivos inteligentes implementados en aeronaves [2].



Figura 10. Programa SARISTU [2].

Los progresos relevantes del desarrollo de las alas flexibles se llevan a cabo en la industria de la aviación privada, durante las últimas décadas la transformación en las alas ha estado en desarrollo debido a diferentes razones. Los principales motivos son la mejora en la eficiencia, reducción de emisiones de contaminantes para aviones comerciales y el aumentando el nivel de seguridad con alas de menor arrastre.

Sin embargo, la implementación de este concepto requiere del desarrollo de materiales y sistemas de control para su puesta en funcionamiento como actuadores inteligentes que cumplan con los requisitos para ser usados como alas flexibles en las aeronaves del futuro. Estos desarrollos requieren del uso de materiales compuestos que brinden la suficiente rigidez para soportar las cargas aerodinámicas y que sean flexibles.

El concepto básico para su implementación es el cambio en la morfología de las alas para generar la reducción en los coeficientes aerodinámicos, estos cambios se generan de manera rápida y segura. Una investigación desarrollada por Han et al. [18], presenta mejoras en el rendimiento y la capacidad de adaptabilidad para una aeronave en diferentes condiciones de vuelo mediante el cambio en la morfología de las alas.

La clasificación de la transformación de alas flexibles se divide en tres partes, en la tabla 1 se presentan las ventajas dependiendo del tipo de transformación.

Tabla 1. Ventajas de la transformación debido a las alas flexibles [19].

Tipos de transformación de alas flexibles		Ventajas
Largo	Plegable	Aumenta el número de Match crítico, disminuye el arrastre parásito.
	Barrido	Aumenta el número de Match crítico, Disminuye el arrastre a alta velocidad.
	Envergadura telescópica	Aumenta L/D, distancia crucero, reduce los requerimientos del motor.
Medio	Desplegable	Aumenta L/D, distancia crucero, reduce los requerimientos del motor.
	Giratorio	Aumenta la maniobrabilidad, prevenir el estancamiento de la punta.
	Flexión de borde de ala	Aumenta L/D, maniobrabilidad, disminución inducida (arrastre de vórtice de punta)
	Cuerda telescópica	Aumenta el rendimiento del perfil aerodinámico a baja velocidad, aumenta la eficiencia de la superficie de sustentación, separación de retardo.
	Comba variable	Aumenta el rendimiento de la superficie aerodinámica de alta velocidad.
Pequeño	Superficie aerodinámica variable	Aumenta la eficiencia del ala, disminuye el arrastre de la compresibilidad (onda).

Los sistemas de alas flexibles deben de ser lo suficientemente rígidos para soportar las cargas aerodinámicas y lo suficientemente flexibles para su implementación [2]. El sistema de un ala flexible se compone de la estructura interna, sistema de actuación, piel, sistema de sensores y

sistema de control, ver la figura 11. Dentro de los retos principales para los sistemas que las conforman se encuentran los sistemas de actuación y piel.

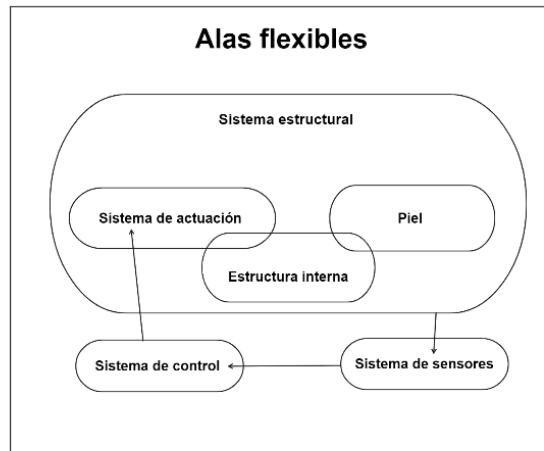


Figura 11. Diagrama de la estructura de un ala flexible.

2.3.1. Piel flexible

Investigaciones realizadas por Rodrigue et al. y Wang et al. [20–22], presentaron que la capa superficial de plumaje de las aves les ayuda a reducir el arrastre, en la figura 12 se presentan las fuerzas a las que está sometida un ave, en donde se observa que los bordes de sus alas le ayudan a reducir los vórtices en los bordes de ala. Estos investigadores desarrollaron actuadores para el cambio en morfología de las alas de algunas aeronaves no tripuladas.

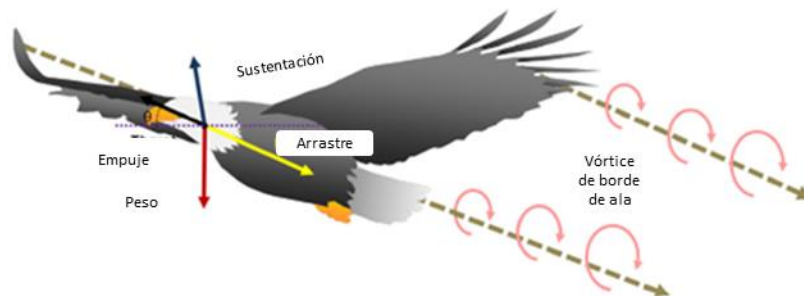


Figura 12. Fuerzas aerodinámicas en un ave [18].

La literatura muestra que, para el desarrollo de las alas flexibles, las pieles deben de estar conformadas por materiales que le brinden rigidez, elasticidad, resistencia alta a la fatiga y buenas propiedades de aislamiento. Si se requiere de pequeños cambios en la geometría, una solución es el uso de materiales inteligentes.

2.4 Materiales Inteligentes

La necesidad del desarrollo de nuevos materiales en la década de los 60 para aplicaciones de ingeniería propició el desarrollo de materiales confiables y con mejores propiedades mecánicas, surgiendo así el concepto de materiales inteligentes [4]. Estos materiales son capaces de cambiar sus propiedades debido a la experimentación y respuesta a estímulos externos.

Existen diversos materiales como lo son los piezoeléctricos, magnetostrictivos, sensibles a la luz, fotocromicos, ferrofluidos, fotomecánicos, dieléctricos, termoeléctricos y con memoria de forma, son algunos de los que se encuentran dentro del conjunto de materiales inteligentes [4]. Debido a las grandes ventajas que brindan, su uso en diferentes sectores industriales, su investigación y desarrollo ha ido en aumento, en la figura 13 se muestra una gráfica de barras de la proyección de las aplicaciones para los materiales inteligentes.

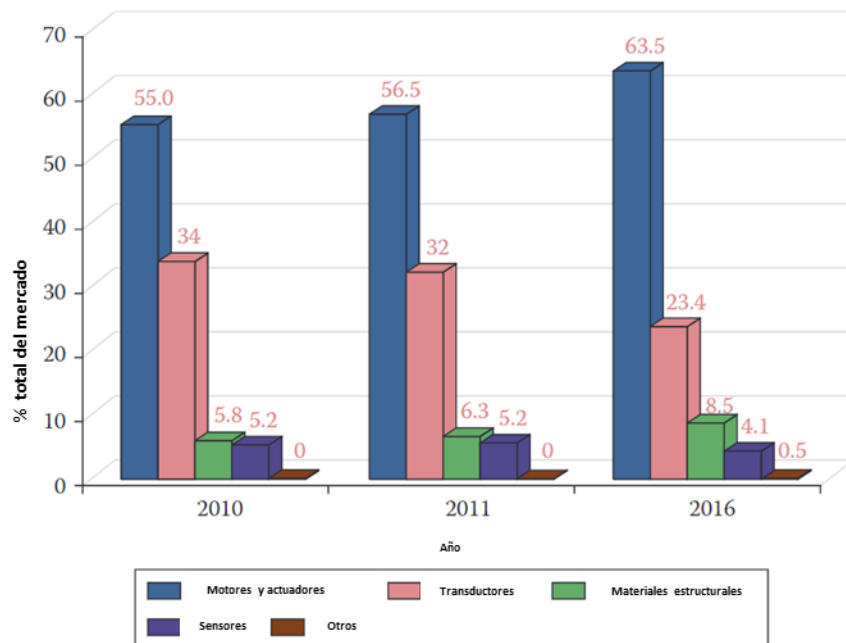


Figura 13. Proyección global de las aplicaciones de materiales inteligentes [4].

2.4.1. Materiales con memoria de forma

Los materiales con memoria de forma son aquellos materiales que memorizan su forma original y regresan a la misma después de la aplicación de un estímulo externo sin presentar deformaciones permanentes.

El efecto de memoria de forma (Shape memory effect SME) fue descubierto por el físico Sueco Arne Olander en 1932 trabajando con aleaciones de oro cadmio. Treinta años después en el laboratorio de artillería Estadounidense (US Naval Ordnance Laboratory) se realizó el descubrimiento de la aleación níquel-titanio por el científico William J. Buehler, marcando este como el inicio del uso de los materiales con memoria de forma [4].

Los materiales con memoria de forma se clasifican de la siguiente manera:

- Aleaciones con memoria de forma SMAs (Shape Memory Alloys).
- Polímeros con memoria de forma SMPs (Shape Memory Polimers).
- Cerámicos con memoria de forma SMCs (Shape Memory Ceramics).
- Híbridos con memoria de forma SMHs (Shape Memeory Hibrids)

- Geles con memoria de forma SMGs (Shape Memory Gels).
- Compuestos con memoria de forma SMCs (Shape Memory Composites).

La mayoría de los materiales con memoria de forma se utiliza para aplicaciones que requieren de actuaciones precisas, los cuales remplazan mecanismos complejos en diferentes áreas de la ingeniería.

2.4.2. Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma se pueden definir como aquellas que poseen la capacidad de regresar a su forma original debido a ciclos mecánicos o térmicos después de aplicarles grandes deformaciones, sin presentar deformaciones permanentes.

Estas aleaciones presentan dos estructuras cristalográficas características las cuales permiten el cambio de fase entre si debido a la aplicación de ciclos térmicos o mecánicos.

Las dos estructuras cristalográficas son la martensita, fase de baja temperatura, y la austenita, fase de alta temperatura. Estas variantes estructurales pueden existir en dos formas; maclada y demaclada. El cambio de estructura entre estas dos fases significa que el material presenta diferentes temperaturas y esfuerzos para cada una de las fases.

La aleación de memoria de forma más conocida es el NITINOL, la cual debe su nombre a las siguientes siglas Ni-Ti-NOL (Níquel-Titanio-Naval Ordinance Laboratory) [4,23].

Las aleaciones de NiTi no son las únicas que se emplean, la tabla 2 presenta las principales aleaciones con memoria de forma y sus aplicaciones.

Tabla 2. Aplicaciones típicas de aleaciones con memoria de forma [24].

Aleación	Principal aplicación
Base - Au	Dental Joyería
NiTi	Acoplamientos de tubería Conectores eléctricos Actuadores Ortodoncia Stents Implantes quirúrgicos
Base - Cu	Atenuación sísmica Aislante y amortiguador en la construcción civil Elementos de refuerzo Conectores y acoplamientos Válvulas de seguridad y otros dispositivos de seguridad
Base - Fe	Acoplamiento de tubos Acoplamientos ferroviarios Aislamiento sísmico Amortiguadores a gran escala

2.4.3. Histéresis

La histéresis se define como la dependencia del estado de un sistema debido a su historia. Esta ocurre en materiales ferromagnéticos y ferroeléctricos, así como en la deformación de bandas de goma y aleaciones con memoria de forma, en la figura 14 se presenta una curva para un efecto simple de histéresis, en donde se observan los ciclos de carga y descarga reversibles.

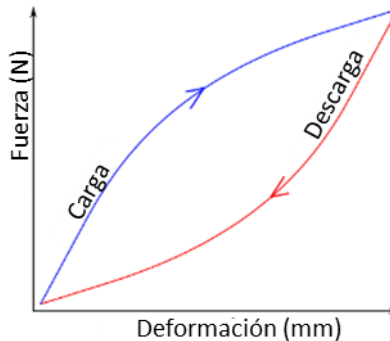


Figura 14. Curva de histéresis simple [25].

Los sistemas con histéresis no son lineales y pueden ser matemáticamente difíciles de modelar. La histéresis es un proceso difícil de definir. Isaak D. Meyergoyz [25], escribió «el significado de la

histéresis varía de un área a otra, de un artículo a otro y de un autor a otro. Como resultado, se necesita una definición matemática estricta de histéresis para evitar confusiones y ambigüedades».

2.4.4. Efecto Joule

El efecto Joule y la ley de Joule son varios efectos físicos, fueron descubiertos por el físico Inglés James Prescott Joule. Dichos efectos físicos no son los mismos, sin embargo, se denominan de la misma manera, pero para la aplicación en las aleaciones con memoria de forma se aplica como calentamiento por efecto Joule y expansión térmica.

El efecto Joule es característico para en el funcionamiento de las aleaciones con memoria de forma y para su aplicación como actuadores en mecanismos flexibles.

2.4.4.1. Calentamiento por efecto Joule y expansión térmica

El calentamiento ocurre en un conductor que transporta energía provocando una resistencia en el conductor. El flujo de electrones sobre el conductor provoca un incremento de temperatura de este [26]. Lo que propicia el ciclo térmico para el cambio de fase en las aleaciones con memoria de forma.

2.4.5. Efecto de memoria de forma

Las propiedades de las aleaciones con memoria de forma captan la atención desde el primer momento en que se tiene contacto con las mismas. Chen K. [27], escribió «NiTi- ¿Magia o Cambio de fase?».

El efecto de memoria de forma se presenta en la transformación de fase martensítica a austenítica durante este proceso se presenta el término de martensita maclada, este es debido a la difusión de la estructura a baja temperatura. En la figura 15 se presenta el efecto de memoria de forma representado por sus dos estructuras características, se puede observar que, cuando se encuentra en la fase martensítica maclada, no se presentan esfuerzos. Después de aplicar una deformación, se presentan esfuerzos. El cambio a la fase de martensítica maclada se produce bajo la aplicación

de un ciclo térmico pasando de la martensita deformada a la fase austenítica. Después de un periodo de enfriamiento se regresa a la fase martensítica maclada. Teniendo así el efecto de memoria de forma [4].

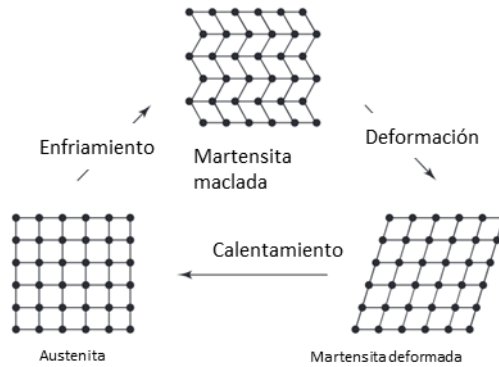


Figura 15. Representación esquemática del efecto de memoria de forma [4,23].

Como se mencionó anteriormente en el efecto de memoria de forma la fase martensítica se presenta de dos maneras maclada y demaclada (deformada). La fase martensítica es la que determina la máxima deformación para las aleaciones con memoria de forma. Por lo general el rango máximo de deformación es del 6% y presentan una alta tasa de recuperación de esfuerzo alrededor de 800 MPa si el material está bajo la aplicación de alguna deformación, la cual es recuperable bajo la aplicación de un ciclo térmico regresando a la fase austenítica [23].

En la figura 16 se presenta la curva de transformación de las SMA, la fase austenítica cambia a la fase martensítica al enfriarse. El cambio finaliza cuando se enfría por debajo de la temperatura martensítica M_f (Temperatura final de la martensita). Al aplicar el ciclo térmico se obtiene el cambio de la fase martensítica M_s (Temperatura inicial de la martensita) a austenítica a la temperatura de inicio de la austenita A_s (Temperatura inicial de la austenita). Cuando la aleación se calienta por encima de la temperatura final de la austenita, el cambio de fase termina más allá de la temperatura A_f (Temperatura final de la austenita). En este punto se tiene una fase completa de austenita.

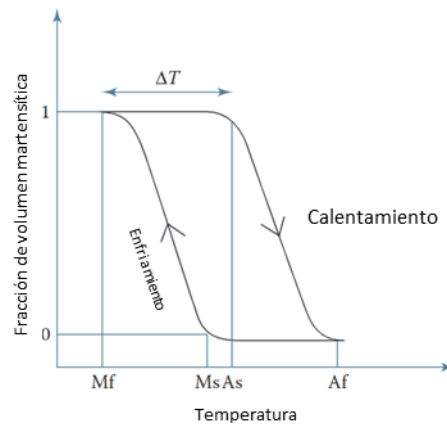


Figura 16. Curva de transformación de las SMA debido a la transición entre $M_f < M_s < A_s < A_f$ [23].

Las fases austenítica y martensítica coexisten entre las temperaturas A_s y M_s .

Típicamente, la austenita es estable a altas temperaturas y bajos niveles de esfuerzo, mientras que la martensita es estable a bajas temperaturas y altos niveles de esfuerzo. Las transformaciones de fase de martensita a austenita son reversibles y da como resultado efectos únicos como lo son la superelasticidad (pseudoeelasticidad) y el efecto de memoria de forma [28].

Las investigaciones desarrolladas por Benafan y Rodrigue et al. [21,29], no solo se centran en los mecanismos de cambio de forma, sino también en los elementos integrados de las SMA que tienen aplicaciones como actuadores, sistemas de amortiguamiento, etc.

El efecto de memoria de forma, ver figura 18 (a) donde se observa una curva tridimensional dependiente del esfuerzo, deformación y temperatura, también se observa donde es que se presentan las dos fases cristalográficas.

2.4.5.1. Memoria de forma unidireccional vs. bidireccional

En estas aleaciones se presentan dos efectos de memoria de forma, unidireccional y bidireccional, como se puede ver en la figura 17. Estos efectos dependen de la magnitud de deformación y el ciclo térmico aplicado. Dependiendo del efecto de memoria de forma, será la aplicación que tendrá como sistema de actuación [4].

- Memoria de forma unidireccional

Cuando la aleación está por debajo de la temperatura de transición de la aleación se puede deformar y está mantendrá las formas establecidas hasta que se aplique un ciclo térmico por encima de la temperatura de transición. Después de aplicar el ciclo térmico la aleación regresa a su forma original, al final, cuando la aleación se enfría por debajo de la temperatura de transición la aleación conserva su forma original, como se muestra en la figura 17 (a).

- Memoria de forma bidireccional

El efecto bidireccional es el efecto en el cual la aleación recuerda dos formas diferentes, una a bajas temperaturas y otra a altas temperaturas, este efecto se puede obtener sin la aplicación de deformaciones, ver la figura 17 (b). Generalmente al proceso de memoria de forma bidireccional se conoce como entrenamiento lo que implica que la aleación «aprenda» a comportarse conforme al usuario lo desee.

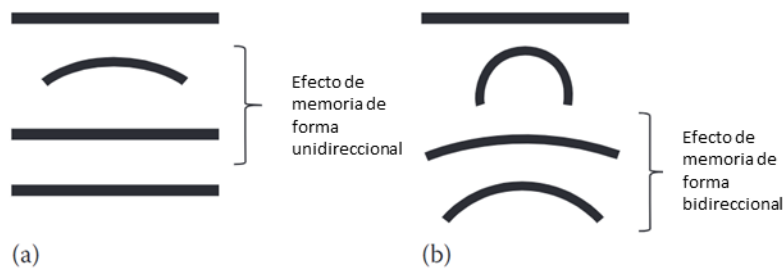


Figura 17. Efecto de memoria de forma (a) unidireccional, (b) bidireccional [4].

2.4.6. Superelasticidad

La segunda propiedad fundamental de las aleaciones y materiales con memoria de forma es la superelasticidad o pseudoelasticidad, en la figura 18 (b) se presenta una curva típica de superelasticidad. Es un fenómeno en el cual, si el material se induce a grandes deformaciones por efecto de una carga, estas se recuperan al descargar sin presentar deformaciones permanentes. Las aleaciones con memoria de forma presentan superelasticidad debido a dos componentes, la

formación de martensita inducida por tensión reversible al aplicar una carga la aleación en su fase austenítica y su transformación nuevamente a la fase austenítica al dejar de aplicar la carga [4].

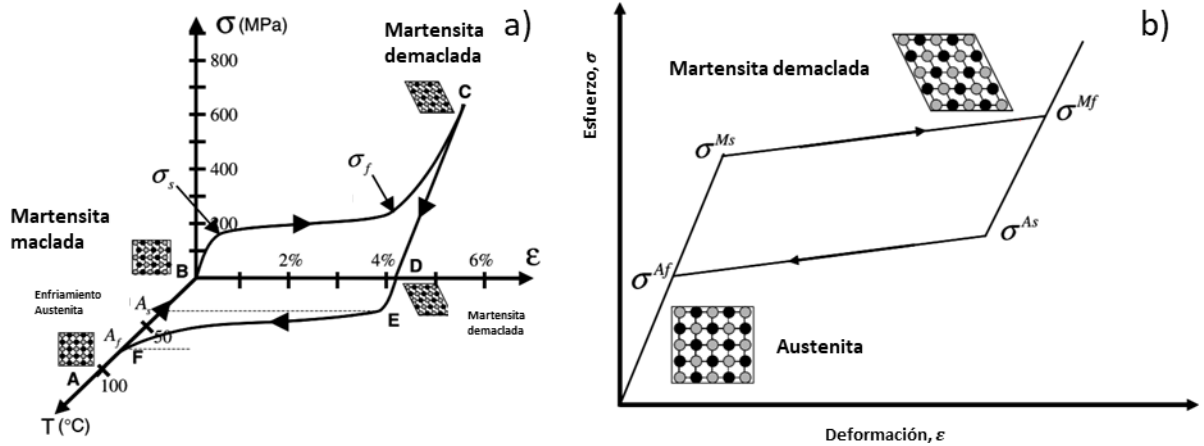


Figura 18. Respuesta mecánica: (a) memoria de forma y (b) superelasticidad [23].

La superelasticidad, ver la figura 18 (b), donde se observa una curva dependiente del esfuerzo y deformación, estas características ocurren debido a la microestructura del material. El punto clave de las aleaciones con memoria de forma es la incidencia de una transformación de fase martensítica a austenítica y viceversa.

2.4.7. Plasticidad

Similar a la plasticidad en otros metales, la deformación plástica en estas aleaciones ocurre dentro de la fase austenítica o martensítica cuando el esfuerzo alcanza el límite elástico, ver la figura 19. La transformación de fase de las aleaciones con memoria de forma y la plasticidad están acopladas a través de la fracción de volumen martensítica.

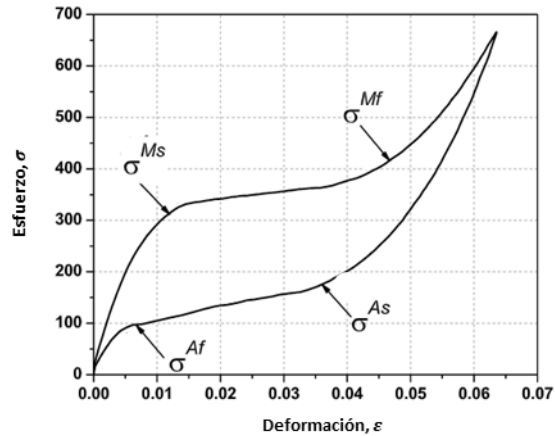


Figura 19. Ciclo típico de pseudoelasticidad [30].

2.4.8. Híbridos con memoria de forma

Los híbridos con memoria de forma, como su nombre lo indica son la conjunción de dos o más materiales inteligentes. Son un material heterogéneo conformado por la integración de un sistema de materiales inteligentes, con la combinación de las propiedades de cada uno de sus integrantes para un fin determinado. Los híbridos con memoria de forma son sistemas con doble dominio en lo que la fase elástica es uno y la fase de transición es otro [4].

La selección de los materiales inteligentes que se combinan para la formación de los híbridos es fundamental porque se debe determinar la proporción de cada uno de ellos. Las propiedades de cada uno de los materiales seleccionados influyen en las propiedades y comportamiento final del material.

N. G. Kim et al. [31], desarrollaron un actuador híbrido compuesto por una aleación y polímero con memoria de forma, este redujo la presencia de componentes mecánicos, teniendo ventajas en la reducción de la velocidad, arrastre y ruido. Se presentó una deformación máxima de 102° .

Wang et al. [20], implementaron un actuador compuesto por tres materiales inteligentes, este fue capaz de producir pequeñas deformaciones. La rigidez del actuador dependió del diseño de la estructura embebida. Los resultados de las deformaciones se evaluaron mediante un modelo numérico y fueron validadas mediante pruebas experimentales.

2.4.9. Compuestos con memoria de forma

Un material compuesto es aquel donde dos o más materiales diferentes se combinan macroscópicamente para formar un material con propiedades y características particulares respecto a sus componentes individuales. Un material compuesto básico se compone por dos agentes, uno que es la fibra y otro que es la matriz.

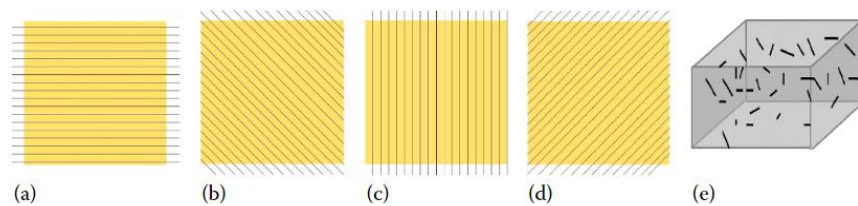


Figura 20. Materiales compuestos reforzados por diferentes orientaciones de fibras, a) 0° , b) 45° , c) 90° , d) -45° y e) orientación aleatoria [23].

Se puede clasificar a los materiales compuestos en dos categorías. Compuestos reforzados con partículas y reforzados con fibras, en la figura 20 se presentan diferentes orientaciones para materiales compuestos.

En años recientes han tomado relevancia los plásticos reforzados, materiales compuestos utilizados en aplicaciones aeroespaciales, por ejemplo; poliéster, éster de vinilo, epoxi, fenólico, poliamida, polipropileno y el PEEK. Son ejemplos de los materiales que se utilizan como matriz. Para las fibras comúnmente se utilizan fibra de vidrio, carbono, aramida, carburo de silicio y celulosa.

Los compuestos con memoria de forma suelen ser combinados con polímeros, cerámicos y geles, como matriz, aleaciones, cerámicos y polímeros como fibras.

La aplicación de materiales compuestos con memoria de forma presenta desarrollos en mecanismos para diferentes ramas de la ingeniería.

Por ejemplo, un actuador desarrollado por Mohammad [32], compuesto por una SMA y SMP fue simulado en ABAQUS prediciendo su comportamiento mediante una subrutina. Se desarrollaron modelos constitutivos en MATLAB para predecir las propiedades de estos materiales. La simulación del SMC presento una aproximación considerable con los resultados experimentales.

2.4.10. Materiales hiperelásticos

En general la mayoría de los materiales experimentan deformaciones elásticas antes de llegar al punto de ruptura, sin embargo, existen los materiales hiperelásticos. Estos materiales poseen la capacidad de resistir grandes deformaciones (50 % o más) y poseen la capacidad de revertirla sin presentar deformaciones permanentes.

La mayoría de los metales resisten pequeñas deformaciones. En la figura 21 se presenta un diagrama esfuerzo-deformación para metales y materiales suaves, donde se observa que los materiales suaves tienen mayor resistencia a la deformación. Estos materiales exhiben propiedades de hiperelasticidad [33].

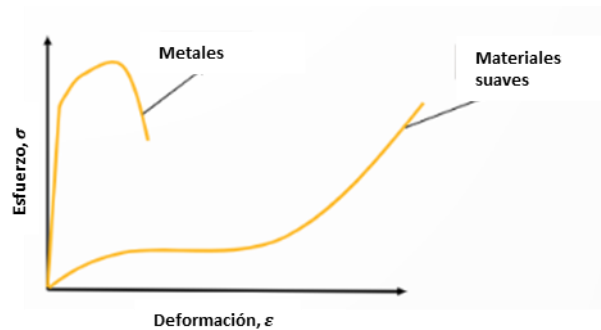


Figura 21. Diagrama de esfuerzo-deformación de un material suave y un metálico [34]

Estos materiales presentan respuestas no lineales, en ocasiones estas no linealidades se consideran como una suposición lineal para tales materiales puede resultar en una respuesta demasiado rígida.

Existen varios ejemplos de la implementación de estos materiales en conjunto con otros, por ejemplo; H. Kim et al. [35], desarrollaron un robot flexible con un sistema de propulsión en base a una SMA y cuerpo de polímeros flexibles. El modelo experimental fue probado, midiendo sus fuerzas de empuje. Se demostró un 38 % de eficiencia.

Un robot flexible fabricado por Wang et al. [36], capaz de realizar movimientos lineales en dos pasos «como una oruga». El robot fue conformado por alambres con memoria de forma embebidos en un polímero flexible, se demostró la capacidad de las SMA como sistemas de actuación.

2.4.11. Modelado

El modelado matemático para los materiales inteligentes es importante ya que es posible determinar su comportamiento debido a la aplicación de ciclos de carga y descarga para su posterior aplicación. Sin embargo, debido a que estos materiales presentan características no lineales por los efectos de histéresis, estos modelos matemáticos en ocasiones son complicados. Estos modelos matemáticos o mejor conocidos como modelos constitutivos describen el comportamiento complejo de estos materiales. En particular es fundamental comprender el comportamiento de las aleaciones con memoria de forma. Una investigación realizada por De la Flor [37], presentó el análisis e implementación para diferentes modelos constitutivos de aleaciones con memoria de forma en donde se evalúan sus ventajas y desventajas respecto a su aplicación.

La metodología para obtener las ecuaciones constitutivas, en específico para aleaciones con memoria de forma, deben de cumplir con las leyes de conservación y los principios básicos de la termodinámica.

Durante los ciclos a los que está sometida la aleación con memoria de forma se presentan los siguientes tipos de comportamientos mencionados anteriormente.

- Superelasticidad (pseudoeelasticidad): Es cuando se presentan grandes deformaciones sin la presencia de esfuerzos residuales [38].
- Efecto de memoria de forma: Es cuando el material recupera su forma original a través de ciclos térmicos después de la aplicación de grandes deformaciones [38,39].
- Plasticidad: Es cuando una deformación permanece permanentemente en estado descargado [40].

Dependiendo del efecto presente será el que dictamine las condiciones iniciales para el desarrollo del modelo constitutivo.

2.4.11.1. Modelos constitutivos

El desarrollo de modelos constitutivos para materiales con memoria de forma ha sido principalmente para el comportamiento termomecánico. Destacando dentro de los modelos desarrollados a nivel micromecánico, micro-macromecánico y macromecánicos [37].

Debido a la complejidad de las aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma se necesita que existan herramientas computacionales capaces de soportar los procesos de diseño, sin embargo, no predicen con precisión el comportamiento del material en su totalidad. Los primeros modelos constitutivos desarrollados fueron para análisis en 1D, actualmente se tienen modelos que predicen el comportamiento de las aleaciones para modelos en 3D [7]. La mayoría de los modelos constitutivos desarrollados solo describen una determinada fase de las propiedades. Lagoudas presento una tabla donde se describen los diferentes modelos constitutivos para 1D y 3D.

La implementación de los modelos constitutivos se desarrolla mediante el siguiente procedimiento. El primero paso es obtener las ecuaciones de los modelos constitutivos para las aleaciones con memoria de forma, donde se seleccionan las variables de estado, las cuales son la respuesta al cambio de microestructura debido al ciclo térmico o de carga.

Cada uno de los modelos desarrollados debe de tener en cuenta los siguientes puntos:

- Dependencia de condiciones iniciales
- Diferentes condiciones iniciales y finales para cada transformación (Histéresis)
- Efectos reversibles a través de ciclos termodinámicos adecuados.

Para los modelos macromecánicos se asume que el comportamiento del material está basado en cuatro condiciones: tensión, deformación, temperatura y coeficientes de variación termodinámicos [37,41].

La mayoría de los modelos están basados en el modelo de Tanaka.

El modelo de Tanaka es para un caso unidimensional, considerando solo la transformación de martensita inducida por tensión ec. 1., en donde E es el tensor de deformación de Green-Lagrange,

ε la deformación total uniaxial, ξ fracción total de martensita, Θ el tensor del módulo térmico, Ω el coeficiente de transformación y T la temperatura de referencia.

$$\sigma = E\varepsilon + \Omega\xi + \Theta T \quad (1)$$

El modelo de Liang y Rogers, también para un caso unidimensional, basado en el modelo de Tanaka donde solo se considera la fase de transformación martensítica ec. 2., este modelo considera las temperaturas, deformaciones y fracción martensítica iniciales.

$$\sigma - \sigma_0 = E(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Theta(T - T_0) + \Omega(\xi - \xi_0) \quad (2)$$

Para el modelo de Brinson, basado en los modelos de Tanaka y Liang Rogers, se redefine el concepto de fracción martensítica (multivariante y mono variante) ec. 3.

$$\sigma = E(\xi)\varepsilon - E(\xi)^* \varepsilon_L * \xi_s + \Theta^*(T - T_0) \quad (3)$$

La implementación numérica de algunos de los modelos mencionados se realiza traduciendo cada modelo a un modelo discreto en el tiempo y tratando el comportamiento no lineal del material como un problema controlado por la deformación en el tiempo. Este proceso se realiza mediante algoritmos de mapeo de retorno.

La simulación de las propiedades de los materiales inteligentes implementa alguno de los modelos constitutivos anteriormente mencionados. Dentro de los modelos implementados en software de elemento finito están disponibles para las diferentes propiedades:

- Simulación del comportamiento superelástico, basado en el modelo de Auricchio [38] donde el material sufre una gran deformación sin mostrar una deformación permanente en condiciones isotérmicas.
- Simulación del comportamiento del efecto de memoria de forma, basado en el modelo termomecánico 3D para la transformación de fase sólida inducidas por tensión de Souza – Auricchio y Auricchio – Petrini [38,39]. Combinando la plasticidad, superelasticidad (pseudoelasticidad) y el efecto de memoria de forma se tiene una forma modificada del modelo de Hartl y Lagoudas [42].

2.4.11.1.1. Modelo constitutivo de Auricchio

El modelo de Auricchio se enfoca en los modelos inelásticos, este es basado en la variable interna o plasticidad generalizada. Esta se adoptó para desarrollar el modelo constitutivo en tres dimensiones para materiales con memoria de forma. [43].

También se basa en la teoría de plasticidad generalizada desarrollada por Lubliner, contempla variantes internas de fracción martensítica (mono variante y multivariante) [38].

Tomando un modelo macroscópico, se presentan los mecanismos de fase involucrados en el comportamiento superelástico, como se describe en la figura 19, los cambios de fase presentes se definen entre la austenita (A) y martensita (M), los cuales son:

- Austenita a martensita (A > M)
- Martensita a austenita (M > A)
- Reorientación de martensita (M > M)

En este punto se consideran las dos transformaciones de fase: $A > M$ (AM) y $M > A$ (MA). Durante esta transformación las fases martensita y austenita coexisten. Se introducen dos variables internas, la fracción de martensita ξ_M y la fracción de austenita ξ_A . Una de estas fracciones es una variable dependiente y satisface la siguiente relación:

$$\xi_M + \xi_A = 1 \quad (4)$$

La evolución de la fracción de martensita, ξ_M se define como se muestra en la ec. 5, en donde H es la deformación máxima:

$$\xi_M = \begin{cases} -H^{AM}(1 - \xi_M) \frac{F}{F - R_f^{AM}} & A \rightarrow M \text{ Transformación} \\ H^{AM} \xi \frac{F}{MF - R_f^{MA}} & M \rightarrow A \text{ Transformación} \end{cases} \quad (5)$$

Donde R_f^{AM} y R_f^{MA} se definen en la ecuación 6 y 7 respectivamente, siendo α el coeficiente de expansión térmica:

$$R_f^{AM} = \sigma_f^{AM}(1 + \alpha) \quad (6)$$

$$R_f^{MA} = \sigma_f^{MA}(1 + \alpha) \quad (7)$$

Donde los valores del esfuerzo σ_f^{AM} y σ_f^{MA} son los parámetros del material obtenidos de la figura 22.

$$H^{AM} = \begin{cases} 1 & \text{si } \begin{cases} R_M^{AM} < F < R_f^{AM} \\ F \dot{>} 0 \end{cases} \\ 0 & \text{caulquier otro} \end{cases} \quad (8)$$

$$H^{MA} = \begin{cases} 1 & \text{si } \begin{cases} R_f^{MA} < F < R_M^{MA} \\ F \dot{>} 0 \end{cases} \\ 0 & \text{caulquier otro} \end{cases} \quad (9)$$

R_M^{AM} se define como

$$R_M^{AM} = \sigma_M^{AM}(1 + \alpha) \quad (10)$$

$$\sigma_M^{AM} \text{ y } \sigma_M^{MA} \quad (11)$$

Donde σ_M^{AM} y σ_M^{MA} son parámetros obtenidos de la figura 22. Las relaciones de esfuerzo–deformación están dadas por:

$$\sigma = D: (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \quad (12)$$

$$\dot{\varepsilon}_{tr} = \dot{\xi} \overline{\varepsilon}_L \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (13)$$

Donde D es el tensor de rigidez elástico, ε_{tr} es el tensor de transformación de deformación, y $\overline{\varepsilon}_L$ es un parámetro de obtenido de la figura 22.

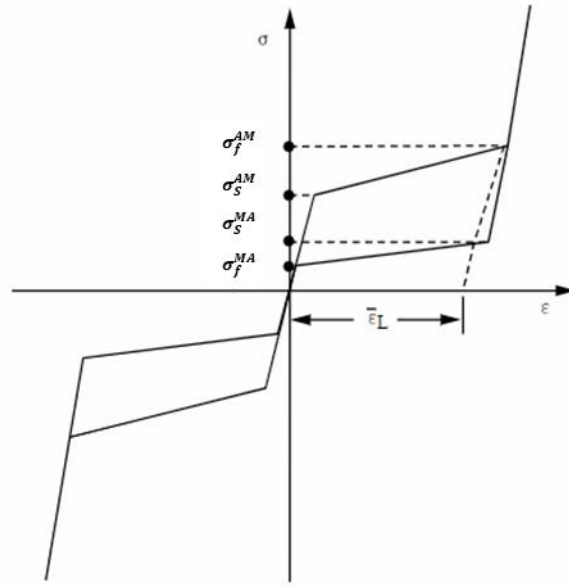


Figura 22. Diagrama idealizado de esfuerzo-deformación para efecto de superelasticidad [44].

Para modelar la diferencia entre las propiedades elásticas de la austenita y la martensita, el módulo elástico E (utilizado en el modelo constitutivo del material) es una función de la fracción martensítica ξ_M , el módulo de elástico de la fracción austenítica pura E_A (el módulo elástico de la entrada inicial) y el módulo elástico de la martensita pura E_M .

$$E = \frac{E_A}{1 + \left(\frac{E_A}{E_M} - 1\right) \xi_M} \quad (14)$$

Para modelar el comportamiento superelástico de las aleaciones con memoria de forma se requieren de 7 constantes, se obtienen de la figura 22. Estas constantes se describen en la tabla 3, las cuales definen el comportamiento esfuerzo-deformación para el efecto de superelasticidad.

Tabla 3. Parámetros para simulación para superelasticidad [44].

Constante	Variable	Propiedad
C1	σ_s^{AM}	Valor del esfuerzo inicial para la transformación directa
C2	σ_f^{AM}	Valor del esfuerzo final para la transformación de fase directa
C3	σ_s^{MA}	Valor del esfuerzo inicial para la transformación de fase inversa
C4	σ_f^{MA}	Valor del esfuerzo final para la transformación inversa
C5	$\overline{Q_L}$	Deformación residual máxima
C6	α	Diferencia entre las respuestas del material a tensión – compresión
C7	E_M	Módulo elástico de la fase martensítica completa

Si es 0 o indefinido, las fases de martensita y austenita comparten el mismo módulo de Young $E = E_A = E_M$

Modelo constitutivo para el efecto de memoria de forma

Este modelo constitutivo se basa en un modelo termomecánico 3D para transformaciones de fase sólidas inducidas por esfuerzo. El modelo puede reproducir todas las características principales relativas a los materiales con memoria de forma en un estado de tensión 3D. La figura 23 muestra la serie de características del modelo mecánico. El potencial de energía libre (Ψ) se establece como:

$$\Psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{tr}) = \frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_{tr}) : D : (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) + \tau_M(T) \|\varepsilon'_{tr}\| + \frac{1}{2}h \|\varepsilon'_{tr}\|^2 + I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr}) \quad (15)$$

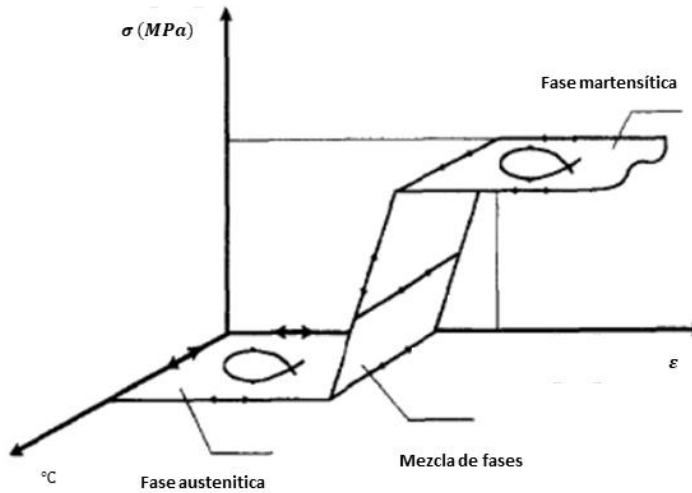


Figura 23. Rutas admisibles para el comportamiento elástico y transformación para el efecto de memoria de forma [44].

2.4.11.1.2. Modelo constitutivo de Lagoudas

Este modelo contempla los efectos de memoria de forma, superelasticidad, deformación térmica, condiciones iniciales y la evolución de las deformaciones plásticas. Para el desarrollo de las ecuaciones del modelo constitutivo se realiza mediante un procedimiento termodinámico considerando las variables de interés. Mediante la energía libre de Gibbs.

Como primer paso tenemos la selección de las variables de estado internas que son la representación de la respuesta termodinámica del cambio en la microestructura.

Este modelo constitutivo considera la fracción de volumen martensítica ξ y la deformación por transformación ε^t , como variables de estado internas. Se asume que la deformación se compone de dos partes, termoelástica ε^{th} y inelástica ε^{in} :

$$\varepsilon = \varepsilon^{th} + \varepsilon^{in} \quad (16)$$

La deformación inelástica se puede descomponer en componentes adicionales debido a varios fenómenos, como lo son, deformación por transformación ε^t y deformación plástica ε^p . En donde la deformación inelástica está asociada a la deformación por transformación $\varepsilon^{in} = \varepsilon^t$.

Teniendo las variables internas seleccionadas y las suposiciones cinemáticas tenemos la ecuación constitutiva termodinámica para las SMA, ecuación 17, en donde S es el tensor de cumplimiento (compliance tensor), s_0 la entropía específica a la temperatura de referencia, u_0 la energía interna específica a la temperatura de referencia y ρ la densidad.

$$G(\sigma, T, \xi, \varepsilon^t) = -\frac{1}{2\rho} \sigma : S : \sigma - \frac{1}{2\rho} \sigma : [\alpha(T - T_0) + \varepsilon^t] + c \left[(T - T_0) - T \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right] - s_0 T + u_0 + \frac{1}{\rho} f(\xi) \quad (17)$$

2.5. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad

Ya que las aleaciones con memoria de forma se someten a ciclos de carga y descarga generando grandes deformaciones, el material se comporta elásticamente sin presentar deformaciones residuales (superelasticidad o pseudoelasticidad). La aplicación de estos ciclos de carga a bajas temperaturas genera esfuerzos residuales en las aleaciones con memoria de forma.

Comprender el comportamiento de las propiedades de las aleaciones es fundamental para sus aplicaciones de ingeniería. Aunque el desarrollo de nuevas aleaciones y estudio de los modelos constitutivos ha avanzado, aún se presentan grandes desafíos para predecir y controlar con precisión su comportamiento debido a la transformación histérica no lineal, la degradación del material y la fatiga termomecánica.

Gracias a la implementación de los diferentes modelos constitutivos en el análisis de elemento finito, se utilizan ampliamente para simular estos materiales. En particular, las aleaciones con memoria de forma presentan una ventaja en su simulación. Software como ANSYS, COMSOL, ABAQUS y Matlab permiten la simulación de estas propiedades.

Existen varias metodologías de simulación para las SMA, a continuación, se presentan varias investigaciones que evalúan las propiedades de las SMA mediante diferente software presentando antecedentes de la simulación e integración de diferentes modelos constitutivos para las SMA, por ejemplo;

- Karakalas [45] presentó notas de ABAQUS donde se realizó la simulación de tubos de torsión implementando la propiedad de superelasticidad, también se presenta la investigación de César H. et al. [46], donde utilizaron subrutinas de programación en Matlab. En ABAQUS solo se puede simular las propiedades de superelasticidad, teniendo así un antecedente para simular y comparar los resultados para el efecto de superelasticidad.

La simulación de materiales con memoria de forma también depende de la aplicación del sistema y la propiedad que se esté simulando, generalmente software como ANSYS, ABAQUS se utiliza para análisis estructural. COMSOL es utilizado para aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, las siguientes investigaciones implementaron diferentes modelos constitutivos;

- Chemisky et al. [47], investigaron una herramienta numérica para la simulación de SMA, esta se desarrolló en ABAQUS mediante el modelo de Mori-Tanaka. Se presenta la comparación entre los resultados de simulación y pruebas experimentales de una SMA

embebida en un elastómero. Esta investigación es relevante en el presente trabajo ya que se simularon dos materiales inteligentes en ABAQUS implementando la propiedad de superelasticidad.

- Thiebanud et al. [48], implementaron en COMSOL un modelo para predecir los efectos dinámicos de una SMA con aplicaciones para un sistema de amortiguamiento. Con esta investigación se tiene evidencia de otra herramienta de simulación para las propiedades de las SMA.

Las siguientes investigaciones presentan ejemplos de la simulación de actuadores con memoria de forma implementados en ANSYS, teniendo así varias investigaciones ya realizadas en este software de elemento finito, por tal motivo este fue el software que se seleccionó para la simulación del mecanismo flexible realizada en el presente trabajo.

- Barrett & Fridline [49], evaluaron el comportamiento de una aleación de NITINOL mediante una subrutina de simulación para componentes biomédicos implementándola en ANSYS 5.6. Gracias a esta investigación se tiene un antecedente de la simulación del material utilizado como sistema de actuación, teniendo así una metodología de simulación como base.
- Terriault et al. [50], implementaron un modelo no isotérmico para un actuador con memoria de forma, este fue implementado en ANSYS mediante una subrutina. El modelo validó el efecto de memoria de forma bidireccional y los valores de esfuerzos presentes. Estos resultados se validaron mediante pruebas experimentales.
- Alazzawi & Filip [51], desarrollaron una simulación de elemento finito implementada en ANSYS para evaluar una probeta en forma de «C» en donde se implementó el modelo Auricchio para aleaciones con memoria de forma. Se encontró que la SMA está influenciada por sus cambios en la microestructura, como defectos internos y tamaños de grano. Los resultados presentan sus efectos como sistema de amortiguamiento. Estos fueron validados mediante una prueba experimental.

- Khodaei & Terriault [52], realizaron simulaciones de elemento finito en ANSYS para predecir la respuesta mecánica de las aleaciones con memoria de forma bajo diferentes cargas axiales. Los resultados se validaron mediante pruebas experimentales. Comparándolos se demostró que el modelo implementado por ANSYS presenta una predicción cercana para efectos de superelasticidad, sin embargo, para efectos de memoria de forma se presentan deficiencias.
- Una simulación implementada en ANSYS APDL desarrollada por Guan et al. [53] para el efecto de superelasticidad de un modelo a tensión, donde se compararon dos elementos (SOLID185 y LINK8) para análisis de elementos finitos. Se demostró que el elemento LINK8 es más eficiente para la simulación.
- Una evaluación desarrollada por McCummiskey et al. [54] exploraron las limitaciones del software de elemento finito ANSYS para evaluar modelos para el material de Nitinol. Mediante la implementación del modelo de Auricchio, el cual representa un modelo simplificado de las SMA. Se encontró que el modelo implementado no predice con exactitud las propiedades bajo cargas de compresión.
- En una investigación reciente Tomar & Singh Parihar [55], presentaron una metodología de simulación para una SMA embebida en fibra de carbono y resina epoxi. Mediante ANSYS se determinaron los esfuerzos y desplazamientos conforme a determinadas configuraciones geométricas. Se encontró que las aleaciones con memoria de forma incrementan la resistencia de las estructuras.
- Tirmizi & Shen [56], evaluaron un actuador en ANSYS APDL, el actuador fue conformado por alambres con memoria de forma embebidos en resina epoxi y fibra de vidrio. La simulación se validó mediante pruebas experimentales. Las deformaciones dependen del rango de temperaturas aplicadas, así como la deflexión depende del número de laminados.

2.6. Actuadores con memoria de forma

El desarrollo de estructuras y materiales inteligentes para el sector aeroespacial ha presentado desarrollos importantes a base de diferentes configuraciones de la geometría, utilizadas en diferentes tipos de actuadores, en la figura 24 se presenta un actuador implementado en una aeronave comercial [19].

Como se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones relevantes de los materiales inteligentes es como actuadores en diferentes sectores de la ingeniería.

La razón fundamental de la aplicación de las aleaciones es debido a la transformación martensítica a austenítica.

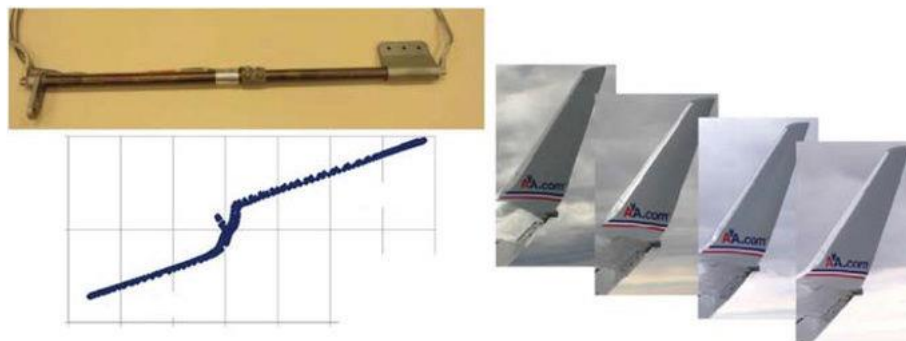


Figura 24. Actuador de borde de ala de Boeing con mecanismo rotatorio; Datos de movimiento bajo cargas aerodinámicas realistas y pruebas de vuelo.[57].

- En el 2016 Han et al. [18], desarrollaron un actuador con memoria de forma, este se implementado en una aeronave no tripulada y fue fabricado con una SMA y fibra de vidrio, este logro reducir los coeficientes de arrastre.
- Cuatro años después Han et al. [58], embebieron alambres con memoria de forma en una tela de fibra de vidrio y nylon para elaborar un actuador. Este presento diferentes modos de actuación dependiendo de la dirección en la que se embebieron los alambres, transformando una estructura 2D en una 3D. Esta investigación propone otras variantes de materiales para embeber alambres con memoria de forma para mecanismos flexibles.

Las siguientes dos investigaciones analizaron los efectos de amortiguamiento para alambres embebidos en algún material inteligente, teniendo presentes antecedentes de actuadores analizando sus propiedades de amortiguamiento para efectos de aeroelasticidad.

- Ostachowicz et al. [59], evaluaron las frecuencias naturales de alambres con memoria de forma embebidos en un material compuesto. Demostrando que las SMA pueden controlar las frecuencias naturales de un sistema. El modelo fue valorado mediante un análisis analítico y simulación. Esta investigación es relevante debido a que se presenta un antecedente de un sistema de amortiguamiento conformado por alambres con memoria de forma, lo cual es fundamental para reducir efectos de aeroelasticidad.
- Un actuador diseñado por H. Song et al. [60], conformado por materiales inteligentes capaz de realizar movimientos de flexión rápidos con largas deformaciones. Donde se realizó una configuración de alambres con memoria de forma para disipar el calor generado por los mismos. Se midieron las frecuencias naturales del mismo. Este actuador propone otro tipo de aplicaciones para los mecanismos conformados por SMA.

En las investigaciones posteriores, realizadas en años recientes se presentan diferentes actuadores conformados por alambres con memoria de forma embebidos en diferentes materiales, presentando diferentes diseños y aplicaciones para los mismos.

- En el 2010 un actuador bio-inspirado compuesto por una aleación con memoria de forma desarrollado por Villanueva et al. [61] fue diseñado para realizar grandes deformaciones. Mediante un modelo de elemento finito se determinaron las deformaciones generadas. Se encontró que dependiendo de la longitud del actuador será la deformación máxima, así como que la deformación depende del espesor del actuador. La aplicación de los valores de carga eléctrica también determinará la deformación.
- Ashir et al. [62], desarrollaron en el 2016 una estructura inteligente 3D fue desarrollada a base de alambres con memoria de forma embebidos en resina epoxi. La estructura fue capaz de deformarse y regresar a su forma establecida.

- Dos años más tarde Ashir et al. [63], embebieron hilos con memoria de forma en resina epoxi, las probetas se fabricaron con dimensiones de 240 mm y 120 mm, presentando deformaciones de 17-11 mm.

2.7. Resumen

En este capítulo se presentaron los conceptos básicos para el desarrollo e implementación de las alas flexibles, generando los cambios en su morfología mediante mecanismos flexibles. Se describe el, porque, y las ventajas que brindan estas para su implementación.

La sustitución de mecanismos rígidos por mecanismos flexibles brinda la posibilidad de implementar las alas flexibles con relativa facilidad. Estos mecanismos flexibles se conforman por materiales inteligentes. Los cuales, al aplicarles una deformación y después de la aplicación de un ciclo termodinámico, regresan a su estado original, esto sin presentar deformaciones permanentes. La aplicación de estos materiales inteligentes depende del tipo de problemática que se tenga que resolver, con esto se determinará el tipo de material a utilizar como mecanismo de generación de cambio en la geometría.

La validación de las propiedades de los materiales inteligentes se realiza mediante el desarrollo de modelos constitutivos que predicen su comportamiento. Estos modelos constitutivos se implementan en software de elemento finito, teniendo así herramientas de validación mediante simulación para la implementación de mecanismos flexibles conformados por materiales inteligentes en el desarrollo de alas flexibles.

Capítulo 3. Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología para el desarrollo y puesta en funcionamiento para el mecanismo flexible. Como lo son las características para la selección de los materiales, método de manufactura, simulación de las propiedades para materiales inteligentes, simulación del mecanismo flexible e implementación de este en un modelo de vehículo aéreo no tripulado.

Se describe un análisis matemático para mecanismos flexibles, la metodología de simulación para el mecanismo flexible implementada en ANSYS, la metodología para el análisis en CFD y pruebas en túnel de viento

3.1. Concepto

Investigaciones realizadas por Saggere & Kota en el 2012, Howell en el 2013 y Lateş et al., en el 2017 [10,64,65], demostraron que el diseño de mecanismos flexibles para la sustitución de mecanismos rígidos requiere de la selección de materiales inteligentes, manufacturabilidad y conceptos estructurales, estos son los principales conceptos para desarrollar este tipo de actuadores. En la figura 25 se muestra un esquema que resume las características a considerar para el diseño de actuadores con memoria de forma.

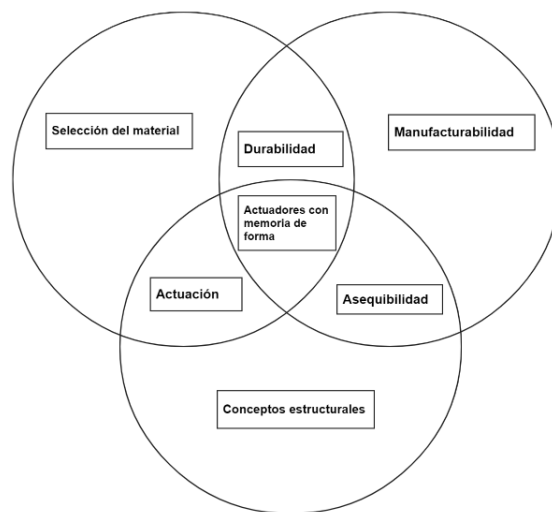


Figura 25. Concepto de diseño de actuadores con memoria de forma.

Se debe considerar que la fuerza de arrastre inducida está relacionada con la corriente descendente alrededor del ala, provocada por la fuerza de sustentación, como se mostró en la figura 12, y por lo general da como resultado del 30 – 40 % del arrastre total. Han et al. [18] mencionó en una investigación «un ala bien diseñada puede tener un efecto significativo en la reducción del arrastre».

El mecanismo propuesto para este trabajo se conformó por alambres con memoria de forma embebidos en un compuesto híbrido. Sustituyendo el borde de ala fijo de un VANT (vehículo aéreo no tripulado) por el mecanismo flexible, capaz de generar diferentes modos de actuación. Estos modos de actuación benefician a la aeronave reduciendo los coeficientes aerodinámicos, así como permitirle a la aeronave realizar maniobras de mayor complejidad.

Se proponen diferentes configuraciones geométricas conforme a la selección de materiales inteligentes para el sistema de actuación del mecanismo. Estas pueden ser evaluadas mediante modelos analíticos para mecanismos flexibles e implementar los modelos constitutivos para SMA en software de elemento finito, prediciendo su comportamiento, tanto analíticamente y mediante simulación. Teniendo así una reducción en tiempos y costos manufactura para su desarrollo.

3.2. Desarrollo experimental de un actuador con memoria de forma

Conforme a la revisión de la literatura, se han desarrollado diferentes actuadores con memoria de forma, que fueron mencionados en el capítulo 2, empleando diferentes calibres de alambre en combinación con otros materiales inteligentes.

En el presente trabajo se tomó en cuenta los trabajos de estos autores, como; Rodrigue et al., Wang et al., en el 2015 y Han et al., en el 2016 [18,20,21] para la selección de los materiales a utilizar y el diseño de la geometría del mecanismo.

3.2.1. Selección de materiales

La selección de los materiales para el desarrollo del mecanismo es importante debido a que los materiales que lo conforman deben de ser compatibles entre ellos para una adecuada interacción. Ya que el mecanismo de actuación para el cambio en la geometría del borde de ala son los alambres con memoria de forma.

Los materiales que conformen al mecanismo deben tener excelentes propiedades mecánicas como lo son: la resistencia a la fluencia, resistencia a grandes deformaciones, rigidez, resistencia a la fatiga, térmicas y ser aislantes eléctricos. Esto debido a las deformaciones generadas por la aleación con memoria de forma, superiores al 6 %, así como los ciclos de fatiga esperados y el flujo de cargas eléctricas.

3.2.1.1. Aleación con memoria de forma

Dentro de los parámetros para la selección de la aleación con memoria de forma como sistema de actuación del mecanismo, se consideró que debería de ser comercial, asequible y probada.

Se seleccionó una aleación con características de efecto de memoria de forma bidireccional. Para su aplicación como sistema de actuación en el mecanismo flexible. Por tales motivos se seleccionó una aleación comercial de NiTi denominada FLEXINOL por DYNALLOY Inc [66]. La tabla 4 presenta las propiedades físicas de esta aleación.

Tabla 4. Propiedades físicas aleación de NiTi FLEXINOL por DYNALLOY Inc [66].

Propiedad	Valor
1 Densidad	6.45 g/cm^3
2 Calor específico	0.2 $cal/g * ^\circ C$
3 Punto de fusión	1300 $^\circ C$
4 Calor latente de transformación	5.78 cal/g
5 Conductividad térmica	0.18 $W/cm * ^\circ C$
6 Coeficiente de expansión térmica	
Martensítica	6.6x10 ⁻⁶ / $^\circ C$
Austenítica	11.0x10 ⁻⁶ / $^\circ C$
7 Relación de Poisson	0.33
8 Resistividad eléctrica	
Martensítica	80 micro-Ohms*cm
Austenítica	100 micro-Ohms*cm

La selección del calibre de alambre se realizó conforme a la revisión de la literatura y las propiedades proporcionadas por el proveedor, ver el anexo 1. Se tienen desarrollos del uso para calibres de alambre superiores a 300 μm en donde estos se han empleado como mecanismos lineales [18,20,60].

El calibre de alambre de 375 μm es el que presenta mayor fuerza de reacción, mayor radio de curvatura, menor resistencia eléctrica. Sin embargo, es importante considerar las desventajas, como el alto consumo de energía, ver el anexo 1.

Una de las características importantes para la selección de este calibre de alambre es debido a la rigidez que estos le proporcionaron al mecanismo, teniendo así una mayor resistencia a fenómenos de aeroelasticidad (flutter).

3.2.1.2. Fibra de vidrio

La selección de la fibra de vidrio como agente de refuerzo para el mecanismo le proporciona la rigidez cuando los alambres con memoria de forma no se encuentran en funcionamiento. Se consideró que la fibra para el desarrollo del compuesto híbrido no debería de ser conductora de electricidad como lo son las fibras de carbono y kevlar, por lo tanto, estas fibras no son adecuadas para el desarrollo de este tipo de mecanismos.

Dentro de las fibras de vidrio disponibles en el mercado se seleccionó la fibra HexForce TM 7725 [67]. Una fibra bidireccional que permite la aplicación para diferentes modos de actuación, estos fueron demostrados por Rodrigue et al., en el 2015 [21].

3.2.1.3. Elastómero

Como matriz del compuesto híbrido se seleccionó un elastómero disponible en el mercado. El cual cumple con los requisitos establecidos para su aplicación en conjunto con la aleación con memoria de forma. Wang et al., H. Kim et al., y Hao et al. [35,36,68] desarrollaron robots inteligentes y diferentes actuadores compuestos por este elastómero. Teniendo así un material ya probado para estas aplicaciones. El material seleccionado fue ECOFLEX 00-10 [69], en la tabla 5 se presentan las propiedades del material.

Tabla 5. Propiedades ECOFLEX 00-10 [69].

Parámetro	Valor
Resistencia a la tracción	7.07 MPa
Alargamiento de rotura	120 %
Viscosidad mixta	3,500 CPS
Gravedad específica	1.04
Módulo de Young	0.5 MPa

3.2.2. Diseño de actuador de borde ala

Se seleccionó el borde de ala de una aeronave no tripulada que se muestra en la figura 26 [70] para la implementación del mecanismo flexible. Donde se implementaron dos casos de estudio, este mecanismo flexible trabajara en dos modos de actuación, flexión, y flexión-torsión, se muestran los dos casos en la figura 27.

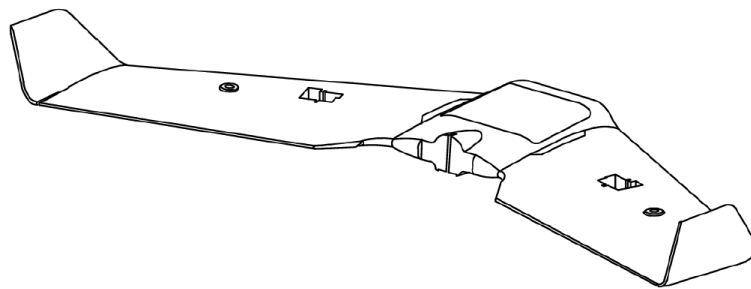


Figura 26. UAV REPTILE S800 Sky Shadow MINI FPV Wing [70].

Las dimensiones del actuador se tomaron conforme a la geometría del borde de ala original del VANT, como se puede observar en la figura 28. Estas dimensiones se ajustaron a la geometría del modelo físico fabricado. La distribución geométrica para el sistema de actuación conformado por los 8 alambres y el número de laminados para los casos de flexión y flexión – torsión, ver la figura 27.

Se consideraron 8 alambres para el sistema de actuación conforme a la revisión de la literatura.

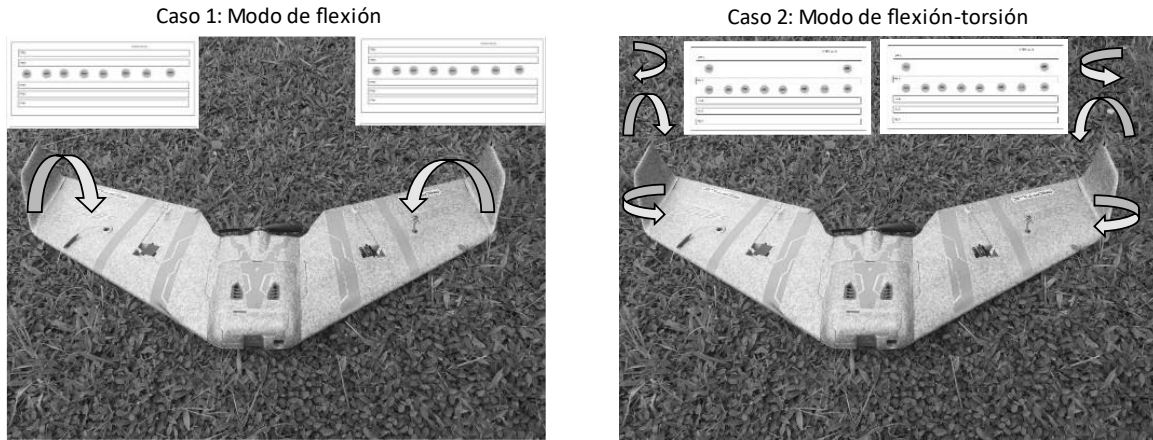


Figura 27. Casos de estudio.

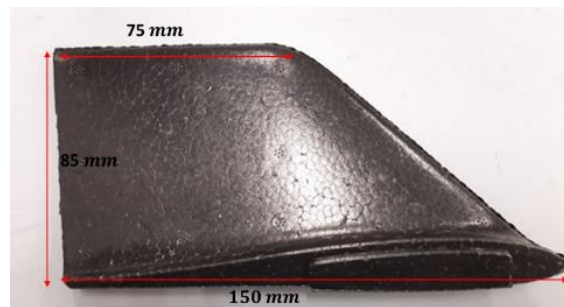


Figura 28. Borde de ala del VANT.

3.2.3. Manufactura del actuador con memoria de forma

El proceso de manufactura seleccionado para el desarrollo del mecanismo fue mediante laminado manual en bolsa de vacío. La selección de esta metodología de fabricación es debido a los materiales con los que se fabricó el mecanismo.

Se diseñó y fabricó un herramental, que se muestra en la figura 29. Para alinear los alambres perpendicularmente, ver la figura 30 (a) y así, no se presente una distribución no perpendicular de los mismos al realizar el laminado, como se observa en la figura 30 (b). Schrooten et al. [71] utilizaron este tipo de manufactura para embeber alambres con memoria de forma en resina epoxi.

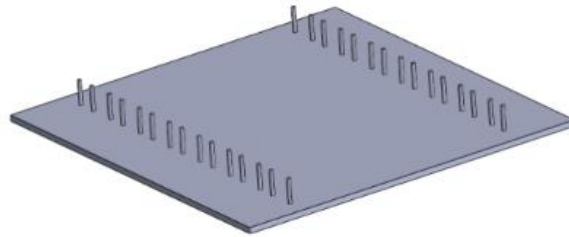


Figura 29. Herramental para alambres.

Con la distribución geométrica paralela de los alambres, se presenta una correcta actuación, configuración mostrada en la figura 30 b). Generando los efectos esperados por los alambres como agente de cambio en la geometría del mecanismo, teniendo así la ventaja de generar los modos de actuación a flexión y flexión-torsión [21].

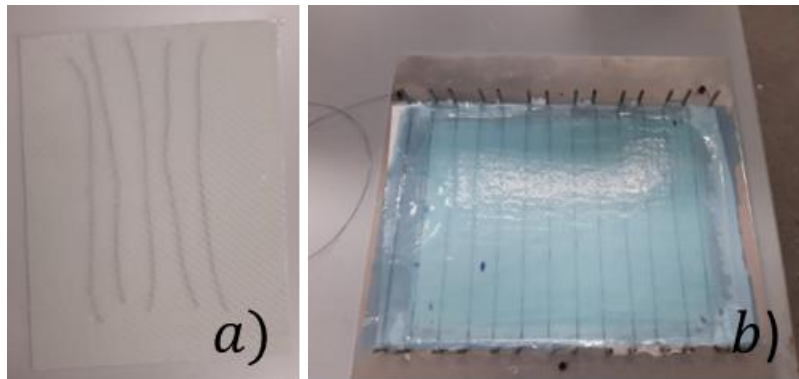


Figura 30. Distribución geométrica de los alambres, (a) no perpendicular y (b) perpendicular.

3.2.3.1. Modos de actuación

Dependiendo de la distribución geométrica de los alambres al momento de ser embebidos, ver la figura 27. Rodrigue et al., encontraron diferentes modos de actuación, como lo son flexión y flexión-torsión, ver la figura 31 (a) y flexión-torsión, ver la figura 31 (b) [21,72]. Para el actuador de borde de ala se implementarán estos modos de actuación, ver la figura 31.

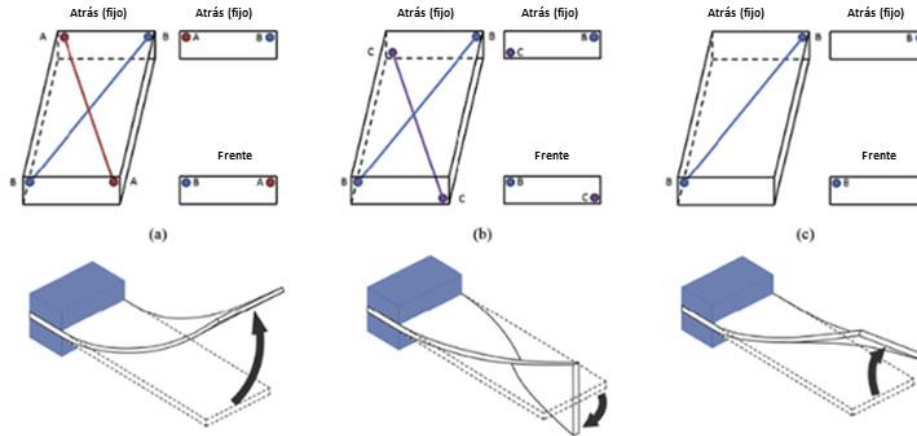


Figura 31. Modos de actuación de alambres con memoria de forma embebidos (a) flexión, (b) torsión y (c) flexión y torsión [21].

Se comprobó que el desarrollo de actuadores a efectos de torsión fabricados con materiales inteligentes como SMA, PDMS y PLA, presentan mejoras en los coeficientes aerodinámicas cuando son implementados [22].

3.2.4. Análisis de propiedades mecánicas

Para el desarrollo de mecanismos flexibles, es necesario tener conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales con los que es fabricado. Las propiedades mecánicas del compuesto se determinaron analíticamente mediante métodos para materiales compuestos, en el anexo 2 se presentan estas propiedades [73].

Para la evaluación de las propiedades del material para el mecanismo se realizó una prueba de flexión y pruebas térmicas. Con la finalidad de determinar las propiedades resistencia al esfuerzo-deformación flexural, así como la distribución de las temperaturas generadas por los alambres de aleación con memoria de forma embebida en un compuesto híbrido.

3.2.4.1. Ensayo de flexión

Para determinar la propiedad de esfuerzo-deformación del mecanismo, se fabricaron probetas del compuesto híbrido para tres diferentes calibres de alambre, dos de ellas con alambres con memoria de forma bidireccional y una unidireccional. Con estas probetas se realizó el ensayo de flexión.

Las muestras se cortaron de un laminado conforme a las siguientes dimensiones, 50.8 mm de longitud, sección transversal de 12.7 mm y 1.2 mm de espesor. Para la realización de la prueba se asignó una longitud entre soportes de 25.4 mm. Se investigaron tres calibres de alambre de 250 μm , 375 μm y 500 μm , con una configuración de 5 laminados de fibra de vidrio.

Se utilizó una máquina universal (SHIMADZU Autograph AGS-X Series de 10 KN) con un herramental para prueba de tres puntos.

Cada uno de los ensayos se realizó bajo la norma ASTM D790-03 [74] con una velocidad de deformación de 0.1 mm/mm/min. Para determinar el esfuerzo flexural máximo, el cual se presenta en el punto medio de la viga, se calculó de la siguiente manera considerando una deflexión máxima de la viga de 10 % de la distancia entre soportes:

$$\sigma_f = \left(\frac{3PL}{2bd^2} \right) \left[1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{d}{L} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right] \quad (18)$$

Donde P es la carga en un punto dado de la curva carga-deflexión (N), L es la distancia entre soportes (mm), b es el ancho de la viga (mm), d es la profundidad de la viga (mm) y D es la deflexión en el punto medio de la distancia entre soportes (mm).

La deformación en el punto medio por flexión se calculó de la siguiente manera:

$$\epsilon_f = \left(\frac{6Db}{L^2} \right) \quad (19)$$

3.2.4.2. Pruebas con cámara termográfica

Cuando los alambres son activados mediante la aplicación de una corriente eléctrica dependiendo del calibre de alambre utilizado, ver el anexo 1, se presenta una diferencia de temperaturas. Por lo tanto, es importante tener un panorama de la distribución de temperaturas en el compuesto híbrido. Se realizaron pruebas con una cámara termográfica FLIR one pro, mediante ensayos a diferentes calibres de alambre disponibles, estos calibres se muestran en la figura 34. Así como a un alambre embebido en un compuesto híbrido.

3.2.5. Análisis matemático de actuador mediante viga con carga de momento en el extremo

Para el análisis matemático del desplazamiento del mecanismo flexible se asume que el actuador se comporta como una viga, ver la figura 32. Por lo tanto, mediante la ecuación de Euler-Bernoulli ec. 20.

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_o}{EI} \quad (20)$$

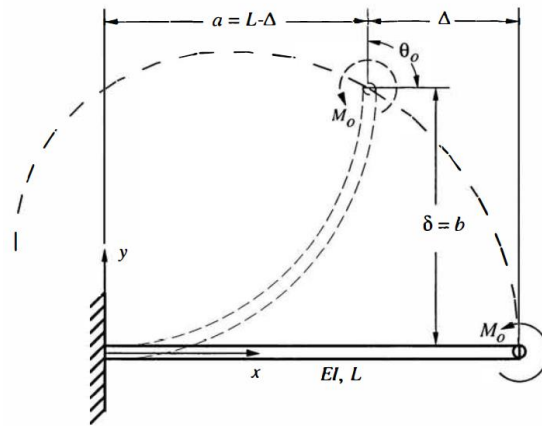


Figura 32. Viga en voladizo con un momento aplicado en el extremo libre [9].

Donde M_o es el momento de actuación generado por cada uno de los alambres, el cual es constante a lo largo del actuador, E el módulo de elasticidad del actuador, I el momento de inercia del actuador, L la longitud del actuador, a la deformación horizontal y b la deformación vertical. La deflexión del actuador θ_o se determina integrando como se muestra en la ec. 21.

$$\int_0^{\theta_o} d\theta = \int_0^L \frac{M_o}{EI} ds \quad (21)$$

$$\theta_o = \frac{M_o}{EI} \quad (22)$$

Donde θ_o está en radianes. Se asume que no se tienen pequeñas deformaciones.

La deflexión vertical $\delta = b$ se determina utilizando la regla de la cadena de diferenciación, se obtiene

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d\theta}{dy} \frac{dy}{ds} \quad (23)$$

Si simplificamos mediante la siguiente ecuación $dy/ds = \sin \theta$

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{dy} \sin \theta \quad (24)$$

Integrando en la ec. 25 y dividiendo ambos lados de la ecuación por L tenemos como resultado la deflexión vertical de la viga ec. 27.

$$\int_0^b \frac{dy}{EI} = \frac{EI}{M_o} \int_0^{\theta_o} \sin \theta d\theta \quad (25)$$

$$b = \frac{EI}{M_o} (-\cos \theta_o + 1) \quad (26)$$

$$\frac{b}{L} = \frac{EI}{M_o L} (1 - \cos \theta_o) \quad (27)$$

Substituyendo la ec. 26 en la ecuación ec. 27 tenemos que

$$\frac{b}{L} = \frac{1 - \cos(M_o L / EI)}{M_o L / EI} \quad (28)$$

De igual manera la determinación de la deflexión horizontal se determina rescribiendo la ecuación de Euler-Bernoulli para la dirección horizontal

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{ds} = \frac{d\theta}{dx} \frac{dx}{ds} \quad (29)$$

Si simplificamos mediante la siguiente ecuación $dx/ds = \cos \theta$

$$\frac{M_o}{EI} = \frac{d\theta}{dx} \cos \theta \quad (30)$$

Integrando la ec. 31 y dividiendo ambos lados de la ecuación por L tenemos como resultado la deflexión horizontal de la viga

$$\int_0^a dy = \frac{EI}{M_o} \int_0^{\theta_o} \cos \theta d\theta \quad (31)$$

$$\int_0^a dy = \frac{EI}{M_o} \int_0^{\theta_o} \cos \theta d\theta \quad (32)$$

$$a = \frac{EI}{M_o} (-\sin \theta_o + 1) \quad (33)$$

$$\frac{a}{L} = \frac{EI}{M_o L} (1 - \sin \theta_o) \quad (34)$$

Por lo tanto, para la deflexión en la dirección horizontal se determina por la siguiente ecuación.

$$\frac{a}{L} = \frac{\sin \theta_o}{\theta_o} = \frac{\sin(M_o L/EI)}{M_o L/EI} \quad (35)$$

3.2.6. Pruebas de actuación

La determinación del desplazamiento máximo generado por los alambres se realizó mediante pruebas de actuación a diferentes calibres disponibles, como se observa en la figura 33, así como para el calibre de 375 μm embebido en un compuesto híbrido. Se analizaron probetas para los dos casos de actuación, flexión, ver la figura 35 (a) y flexión-torsión, ver la figura 35 (b). Se realizaron pruebas de actuación para el mecanismo a flexión, la probeta se muestra en la figura 36.

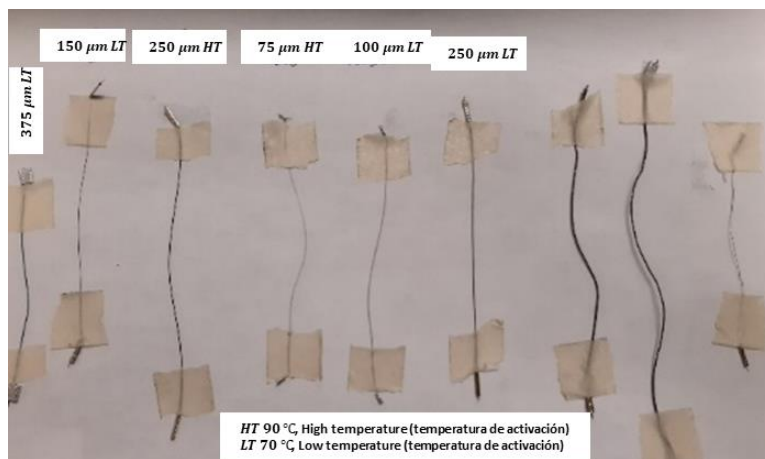


Figura 33. Diferentes calibres de alambre con memoria de forma.

3.2.6.1. Control del actuador mediante modulación por ancho de pulsos

La selección y adaptación de un sistema de control adecuado conforme a las características de los materiales utilizados para las pruebas realizadas en este trabajo. Se seleccionó un sistema de modulación por ancho de pulsos usando un microcontrolador, el diagrama se presenta en la figura 34 (a). El control de los alambres con memoria de forma se puede efectuar de diferentes maneras por ejemplo mediante un circuito oscilador simple, ver la figura 34 (b) [75].

El circuito de control mediante PWM se utilizó para todas las pruebas de actuación realizadas en el presente trabajo.

Un estudio realizado por Theodore & Bishay [76] demostró que embeber alambres con memoria de forma como sistema de actuación propicia desplazamientos considerables. Se implementó un sistema de control con base en Arduino. En las pruebas experimentales se obtuvieron desplazamientos de 9 a 56 mm. Hassan Falah y Abdulkadhim [75] utilizaron un sistema de control de PID para controlar un actuador 2-D.

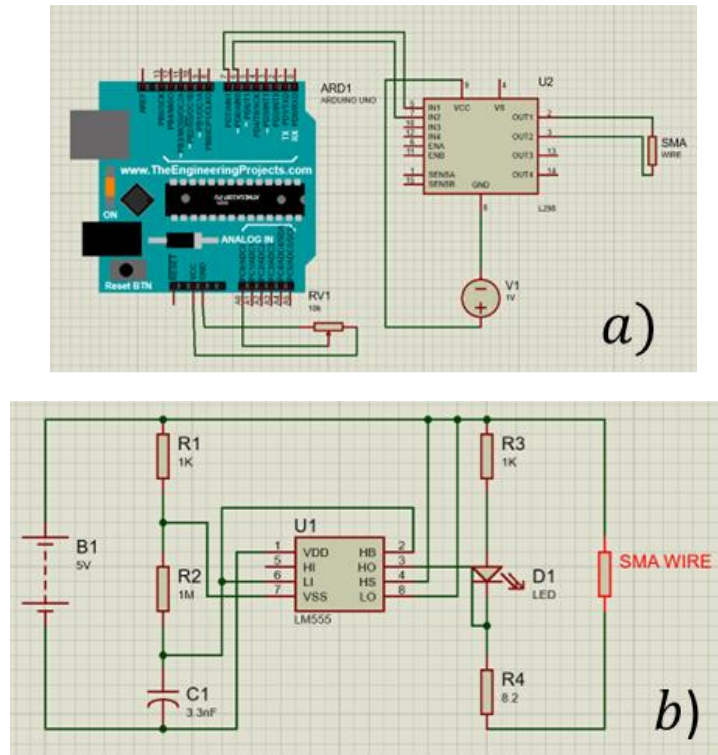


Figura 34. Sistemas de (a) control con PWM, (b) circuito oscilador simple.

3.2.6.2. Pruebas de actuación a flexión y flexión-torsión

Se fabricaron probetas conforme al proceso de manufactura del apartado 3.2.3, estableciendo para cada una de ellas la configuración geométrica de los alambres para los casos de flexión y flexión-torsión. En la Figura 36 se muestra las probetas fabricadas para las pruebas de actuación.

Las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, utilizando el sistema de control mediante PWM y aplicando un amperaje establecido por el proveedor para cada alambre seleccionado, ver el anexo 1.

El ensayo de la prueba de flexión, para la probeta de la figura 35 (a) y flexión-torsión ver la figura 35 (b), cada una de las probetas se colocó en una configuración de viga en voladizo.

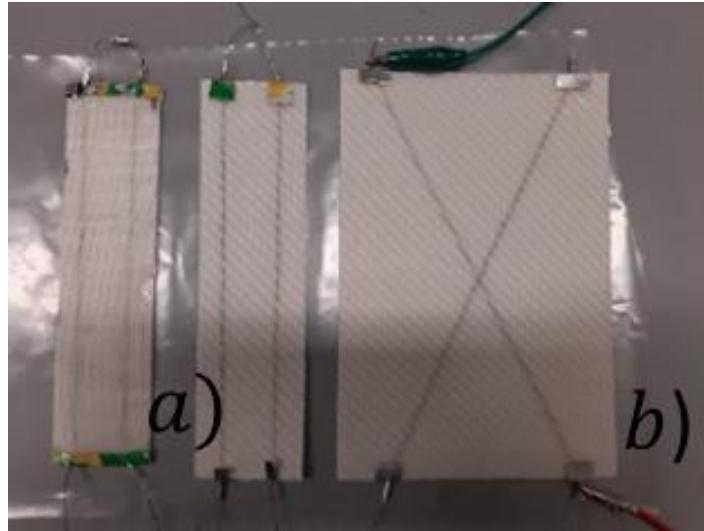


Figura 35. Probetas para pruebas de actuación (a) flexión y (b) flexión-torsión.

3.2.6.3. Pruebas de actuación para el actuador con memoria de forma

Las pruebas de actuación para el mecanismo flexible se realizaron siguiendo la metodología del apartado anterior. La probeta se dispuso como una viga en voladizo, como se muestra en la figura 36, utilizando el sistema de control mediante PWM.

Conforme al aumento de número de alambres o longitud del alambre para el mecanismo, mayor será el consumo de energía que necesitará el sistema de actuación para generar los desplazamientos.



Figura 36. Configuración para la prueba actuación.

3.3. Simulación del actuador con memoria de forma

Con base en la revisión de la literatura se seleccionó el software ANSYS para realizar la simulación del mecanismo flexible. Sin embargo, como se mencionó en capítulos anteriores, se dispone de una amplia variedad de software de simulación para materiales inteligentes.

La simulación del mecanismo comprende la integración de materiales con propiedades de memoria de forma, superelasticidad, compuestos y materiales hiperelásticos.

La simulación del mecanismo se realizó mediante un análisis estructural, la metodología se muestra en la figura 37.

En general, la simulación de las propiedades de memoria de forma y superelasticidad se puede definir mediante las condiciones de frontera y una condición térmica. Sin embargo, la selección de las condiciones depende del tipo de análisis que se realiza y el efecto de memoria de forma (unidireccional y bidireccional) usado como sistema de actuación.

Metodología para análisis de elemento finito		
Pre-procesamiento	Solución	Post-procesamiento
<ol style="list-style-type: none">1. Definir geometría2. Seleccionar el tipo de elemento3. Definir propiedades del material4. Mallado	<ol style="list-style-type: none">1. Definir condiciones de frontera2. Definir cargas3. Establecer opciones de solución4. Resolver	<ol style="list-style-type: none">1. Trazar, ver y exportar resultados2. Comparar y verificar resultados

Figura 37. Metodología para el análisis de elemento finito [77].

3.3.1. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad

La simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad mediante ANSYS se siguió conforme a la metodología para análisis de elementos finitos, que se presentó en la figura 37.

Tomando en cuenta las condiciones iniciales, carga térmica, geometría y propiedades de los materiales empleados.

La selección de las propiedades de la aleación depende del caso que se desee aplicar en particular, en la figura 38 se muestran diferentes metodologías de simulación para el mecanismo flexible encontradas en esta investigación, la selección del método depende de la geometría, tipo de propiedad y aplicación.

La simulación de las propiedades de memoria de forma y superelasticidad se implementa de manera separada. Dependiendo del caso de aplicación.

Ejemplificando la metodología anterior se tiene como geometría base un alambre con dimensiones de 10 mm de longitud por 375 μm de sección transversal. Condiciones iniciales, un soporte fijo en un extremo y la aplicación de un desplazamiento.

Simulación de efecto de memoria de forma y superelasticidad

Cada metodología de simulación depende de la aplicación

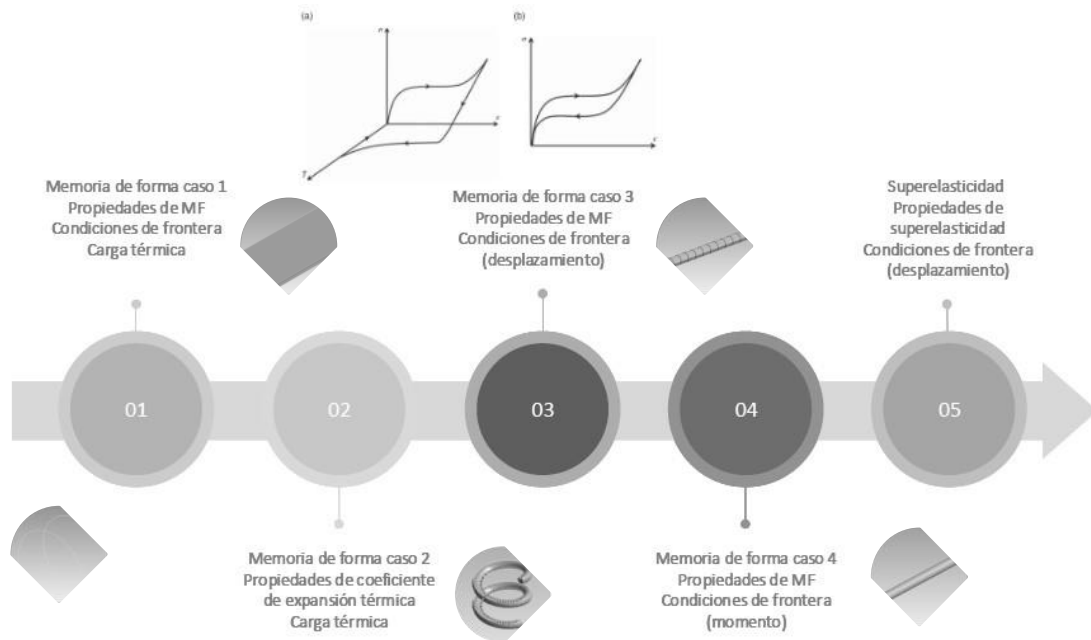


Figura 38. Metodologías de simulación para propiedades de materiales inteligentes.

3.3.1.1. Simulación modelo constitutivo de Auricchio implementado en ANSYS

El software de elemento finito ANSYS implementa el modelo constitutivo de Auricchio para la simulación de las propiedades de memoria de forma y superelasticidad. Conforme a alguna de las metodologías de simulación de la figura 38, dependiendo del caso de aplicación. Solo se tiene que intercambiar entre las propiedades de memoria de forma y superelasticidad del material y aplicando diferentes condiciones iniciales, estas propiedades se presentan en el anexo 3.

3.3.1.2. Simulación del modelo constitutivo de Lagoudas y Souza-Auricchio implementado en COMSOL

La simulación de materiales con memoria de forma en COMSOL está disponible en la interfaz de mecánica de sólidos. Se requiere del modelo para materiales no lineales (modelos constitutivos de Lagoudas y Souza-Auricchio). Dentro de este modelo se pueden integrar las condiciones iniciales que se involucran en estos materiales, como lo son expansión térmica, esfuerzo y deformación inicial.

Para la simulación se requiere de condiciones iniciales como las anteriores mencionadas, así como de la selección del modelo constitutivo a implementar. COMSOL dispone de dos modelos, Lagoudas y Souza-Auricchio, el anexo 5 presenta la metodología a seguir para simular las propiedades de las SMA en COMSOL. Las propiedades del material con memoria de forma para la simulación de cada modelo se presentan en el anexo 4 [78].

Adicionalmente, COMSOL brinda la posibilidad de simular efectos de memoria de forma mediante el efecto Joule por coeficientes de expansión térmica, ver el anexo 5.

3.3.1.3. Simulación de diferentes secciones transversales de alambre con memoria de forma

Se realizó la simulación de diferentes secciones transversales de alambres con memoria de forma para ser implementadas en diferentes sistemas de actuación mediante ANSYS y COMSOL.

Comparando así los modelos implementados en cada software y un ensayo físico con un elemento de las mismas dimensiones. Cada sección transversal es de la misma área de sección transversal del calibre de alambre de 375 μm .

3.3.2. Simulación del mecanismo flexible

La simulación del mecanismo flexible mediante ANSYS se realizó conforme al árbol de trabajo de la figura 39. Utilizando la interfaz de ANSYS Workbench, se utilizaron los módulos de ACP Pre, Mechanical, Static Structural y ACP Post. Dentro de estos módulos se configuró la geometría, propiedades de los materiales, configuración de material compuesto, condiciones iniciales y visualización de los resultados.

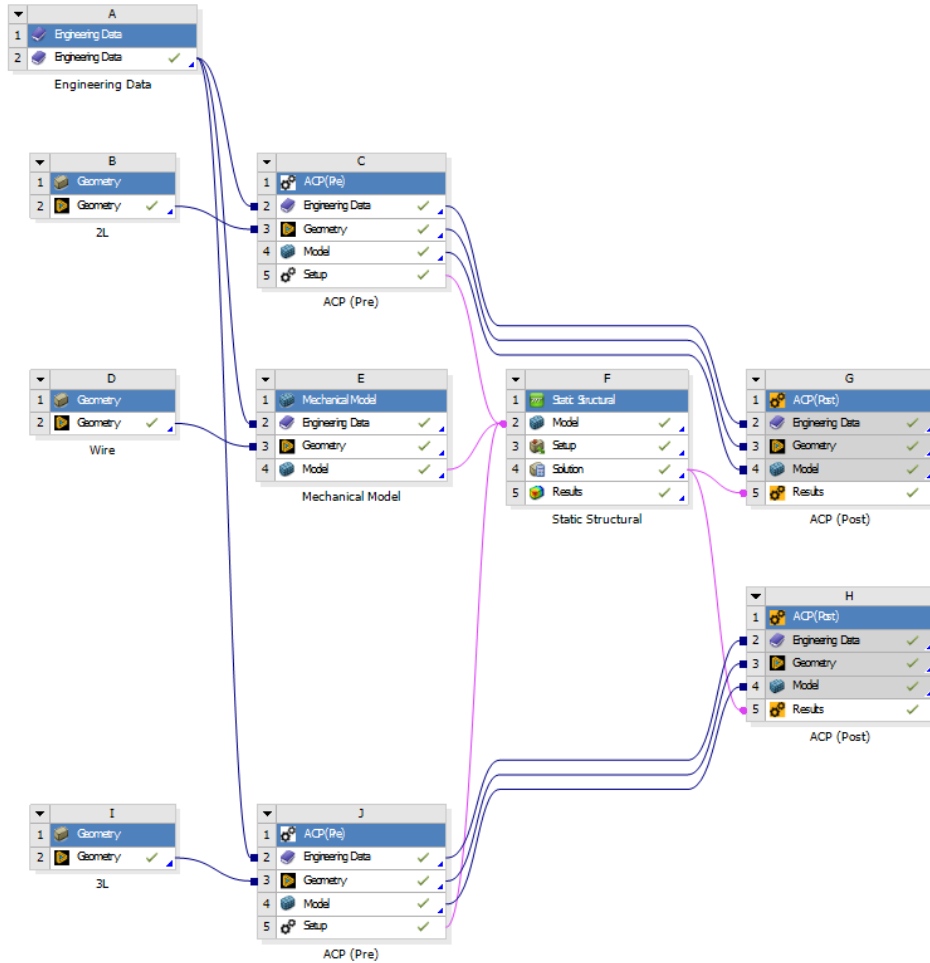


Figura 39. Diagrama de simulación de actuador con memoria de forma.

La configuración geométrica con 8 alambres para la simulación del mecanismo, donde se observa que las líneas rectas son los alambres con memoria de forma, en la figura 40 se presenta el modelo CAD del mecanismo flexible.

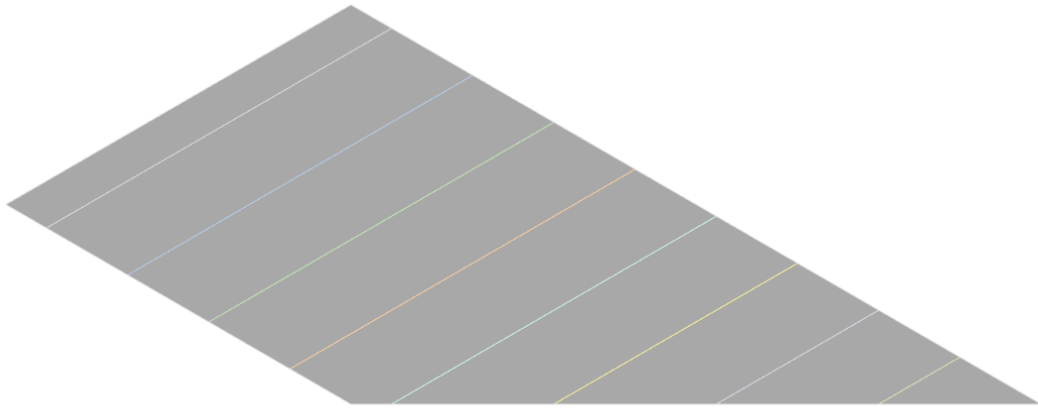
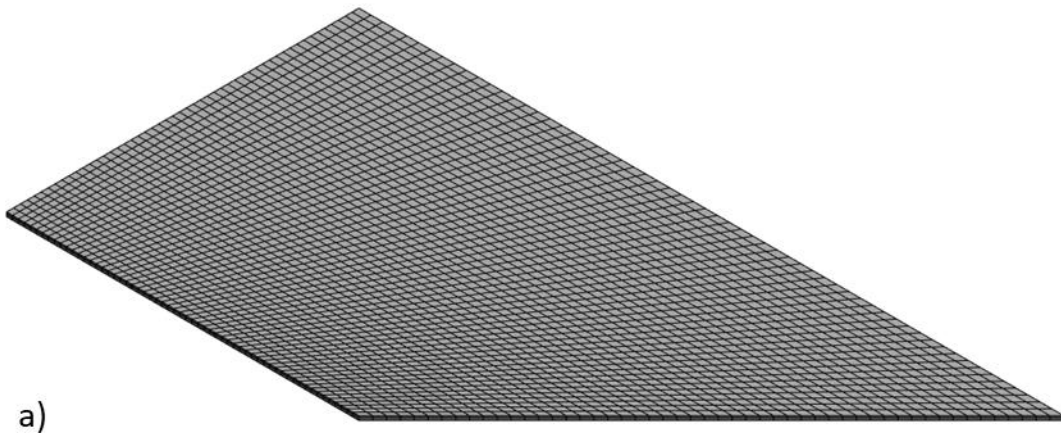
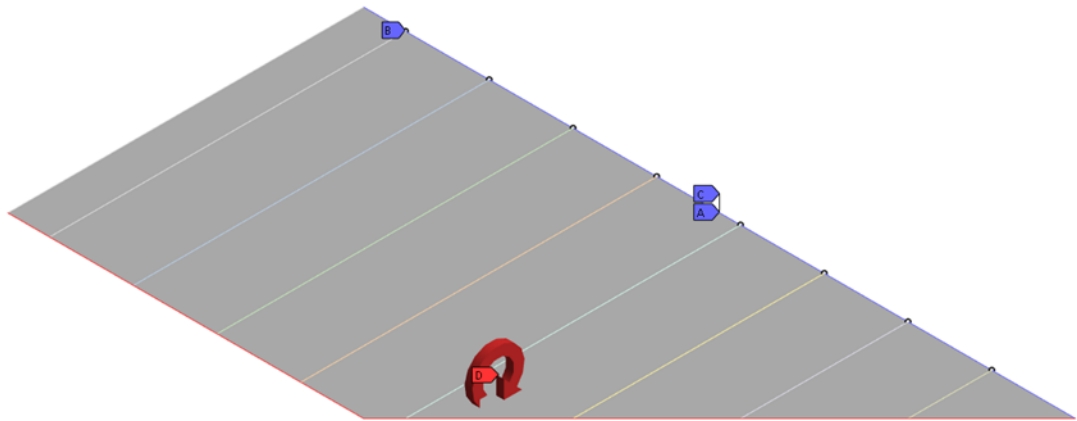


Figura 40. Modelo CAD del mecanismo flexible.



a)

- A** Fixed Support
- B** Fixed Support 2
- C** Fixed Support 3
- D** Moment: -209.95 Nmm



b)

Figura 41. Mallado a) y condiciones iniciales b).

El mallado, ver la figura 41 a) y las condiciones iniciales, como se muestra en la figura 41 b) para la simulación conforme a las características geométricas y el número de alambres que conformaron el mecanismo flexible se consideró un mallado adecuado.

3.3.2.1. Simulación de configuraciones para el mecanismo flexible

El objetivo de estas simulaciones es evaluar las distintas configuraciones propuestas para diferentes mecanismos. En donde se compararon las deformaciones generadas respecto al calibre de alambre y la configuración de laminados del material compuesto.

En la tabla 6 se presenta las diferentes configuraciones del sistema de actuación para el mecanismo flexible.

Tabla 6. Configuraciones de sistema de actuación.

Configuración	Calibre de alambre		
	250 μm	375 μm	500 μm
1		1L_8W_1L	
2		2L_8W_1L	
3		3L_8W_1L	
4		2L_8W_2L	
5		3L_8W_2L	

Nota: L: Laminado, W: Alambre

Así mismo se propuso la simulación para diferentes áreas de sección transversal para alambres con memoria de forma. Estos serían implementados como sistema de actuación para los diferentes mecanismos propuestos. Las secciones transversales propuestas fueron; circular, cuadrada, rectangular, triangular, hexagonal y elíptica. Cada una de estas secciones presentó la misma área de sección transversal, se tomó como base el área del alambre de 375 μm . Estos alambres tienen dimensiones de 375 μm de diámetro y 10 mm de longitud.

3.4. Implementación del mecanismo flexible en VANT

Para la implementación del mecanismo se realizó el proceso de ingeniería inversa. Obteniendo un modelo CAD de la aeronave UAV REPTILE S800, que se presentó en la figura 26, en donde el modelo se modificó conforme a las características deseadas para la implementación del mecanismo

flexible. Con este modelo se fabricó un prototipo físico para la puesta en funcionamiento del mecanismo.

3.4.1. Modelo CAD de la aeronave no tripulada

Mediante un proceso de ingeniería inversa, en donde como primer paso se escaneó el modelo del VANT UAV REPTILE S800, ver la figura 42 a), en la figura 42 b-c) se muestra el proceso de escaneo de las piezas del VANT, se obtuvo un modelo digital del VANT, generando así una serie de modelos de mallas del modelo físico de la aeronave. Posteriormente, estos mallados fueron procesados en un software de ingeniería inversa (Geomagic). Teniendo este modelo se exportó a un software CAD (SolidWorks) donde se presenta como resultado final el modelo CAD de la figura 43.

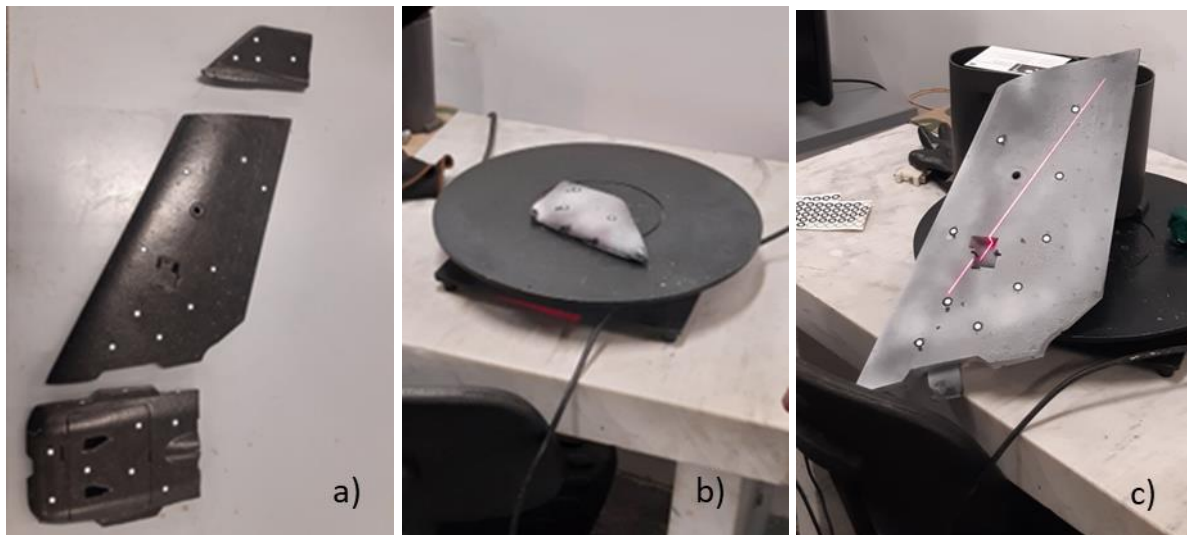


Figura 42. Escaneo del VANT, a) modelo del VANT, b) borde de ala y c) ala.

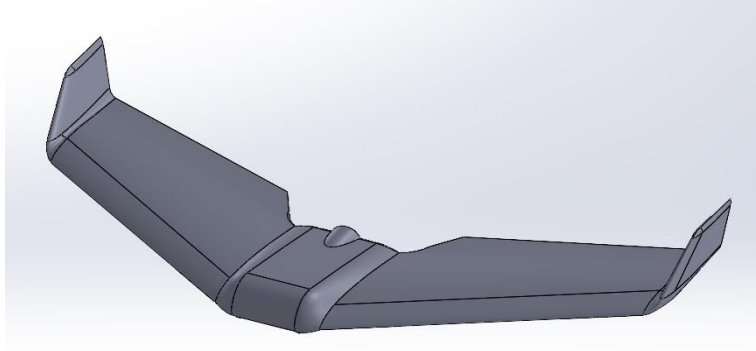


Figura 43. Modelo CAD del VANT.

3.4.2. Manufactura del modelo del VANT

El modelo CAD de la aeronave de la figura 43 se le modifico para adaptar el mecanismo al VANT, como se observa en la figura 44. Estas modificaciones comprendieron el vaciado interno del ala para poder instalar el sistema de alimentación eléctrica del mecanismo, así como la adaptación para el mismo. Debido a que la aeronave es simétrica, solo se fabricó la mitad de esta.

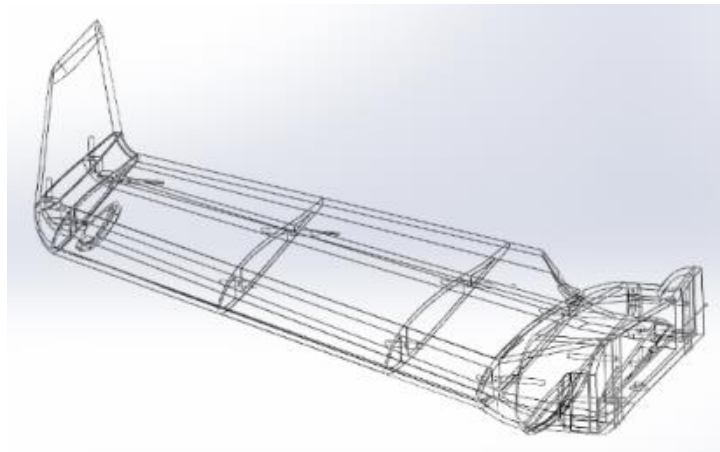


Figura 44. Modelo modificado del VANT.

Utilizando el proceso de manufactura aditiva se fabricó el modelo de la aeronave de la figura 44. Se utilizó software para el desarrollo del modelo de impresión. Utilizando una impresora Ender 3Pro se fabricó este modelo con material PLA, en la figura 45 se presenta la fabricación de las diferentes secciones del modelo.

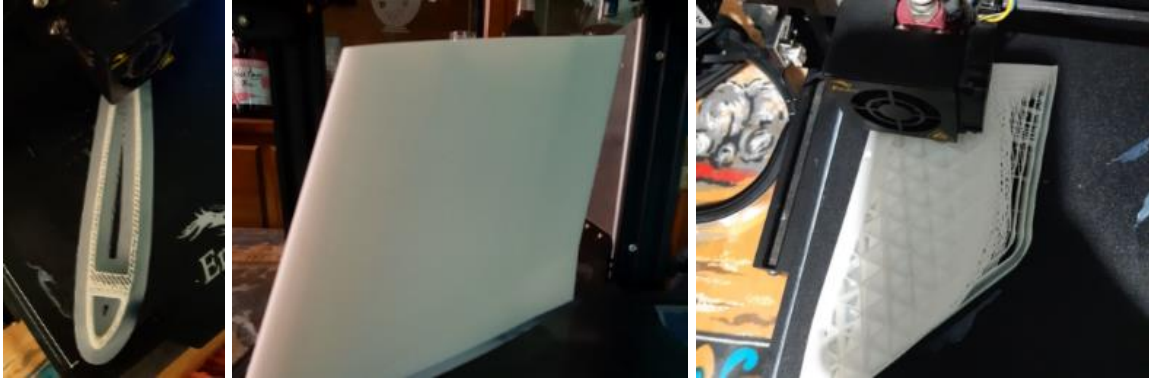


Figura 45. Proceso de manufactura 3D del modelo.

3.4.3. Implementación del mecanismo flexible

Teniendo el modelo fabricado mediante manufactura aditiva de la aeronave, este se modificó para adaptar el mecanismo. El modelo físico con el mecanismo implementado se utilizará para las pruebas en túnel de viento, en la figura 46 se presenta el modelo con el mecanismo flexible, ver la figura 46 a) y el modelo con el borde de ala original, ver la figura 46 b).

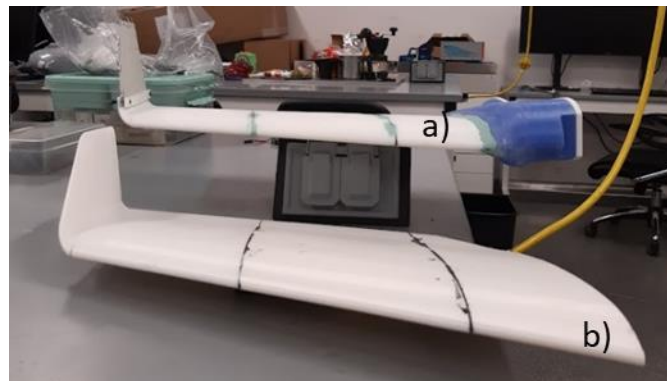


Figura 46. Modelo del VANT para implementación del mecanismo flexible.

3.5. Simulación de Dinámica de Fluidos Computacional para el mecanismo flexible

Se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacionales para la mitad del modelo CAD de la aeronave de la figura 43. Utilizando el software de elemento finito ANSYS mediante el

módulo FLUENT. Las simulaciones se configuraron a diferentes ángulos de ataque de 0-15 ° para tres diferentes bordes de ala, borde plano a), borde original b) y borde actuador c), ver la figura 47. Cada uno de los análisis se realizó para dos diferentes velocidades, 15 m/s y 30 m/s. Se calcularon los coeficientes y fuerzas de sustentación y arrastre para cada modelo.

La metodología para el análisis en CFD se realizó de la siguiente manera:

- Definir los objetivos del modelo
- Crear la geometría y malla del modelo
- Configurar el solucionador y los modelos físicos
- Realizar la solución
- Examinar y guardar resultados

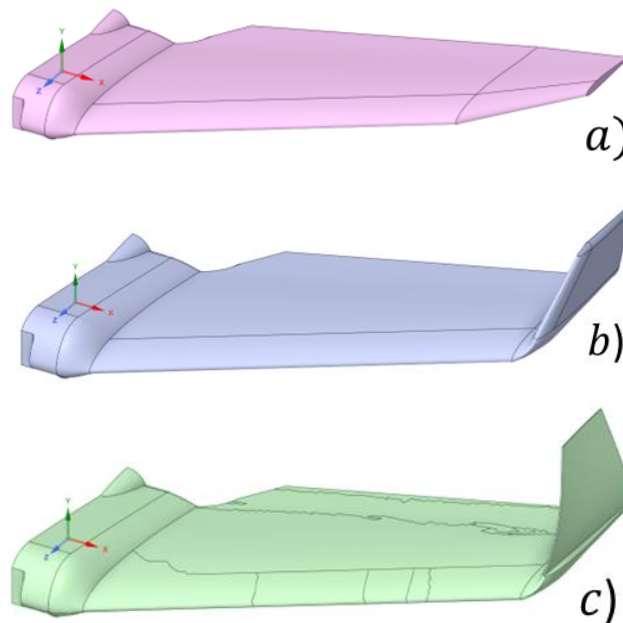


Figura 47. Geometrías para análisis CFD, borde (a) plano, (b) original y (c) actuador.

3.6. Pruebas en túnel de viento

El análisis en túnel de viento para dos configuraciones de borde de ala que se presentaron en la figura 47, borde original a) y borde actuador b). Las pruebas se realizaron a velocidades de 15 m/s y 30 m/s para ángulos de ataque de 0-15 °.



Figura 48. Túnel de viento subsónico de baja turbulencia.

Las pruebas se realizaron en un túnel de viento subsónico de baja turbulencia, mostrado en la figura 48, dentro del laboratorio de aerodinámica de la UANL. El túnel presenta una sección de prueba de 1m x 1m x 2m, como se muestra en la figura 49, con un rango de velocidades de 5 m/s – 70 m/s y una intensidad de turbulencia menor al 5 %.



Figura 49. Sección de prueba del túnel de viento subsónico.

3.7. Resumen

Partiendo de las propiedades de los materiales para el desarrollo del mecanismo flexible, se seleccionaron materiales que cumplieron con características compatibles para el uso de la aleación con memoria de forma. Se determinaron algunas de las propiedades mecánicas de la combinación de estos materiales para la manufactura del mecanismo flexible.

La selección de la aleación y el tipo de efecto de memoria de forma se determinó el tipo de manufactura para la fabricación del mecanismo. Las medidas del actuador se tomaron basándose en la geometría original del VANT. Un modelo físico del VANT se manufacturó mediante un proceso de manufactura aditiva, dicho modelo se modificó para la implementación del mecanismo flexible. Con este modelo se realizaron pruebas de actuación para el mecanismo.

Mediante simulación por elemento finito y un análisis analítico para mecanismos flexibles se determinaron las deformaciones generadas por el sistema de actuación en el mecanismo flexible. Se realizaron simulaciones de las propiedades de memoria de forma y superelasticidad para el material implementado como sistema de actuación.

Mediante la implementación de los modelos constitutivos de Auricchio y Lagoudas implementados en ANSYS y COMSOL se simuló propiedades de memoria de forma y superelasticidad.

La simulación del mecanismo flexible se realizó mediante ANSYS prediciendo el comportamiento del mecanismo de actuación, así como simulaciones para diferentes configuraciones geométricas y sistemas de actuación para el mecanismo flexible.

Simulaciones en CFD fueron realizadas para determinar las propiedades de la implementación del mecanismo flexible, comparando y comprobando la reducción de los coeficientes aerodinámicos respecto a otros bordes de ala.

Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología del capítulo 3. La elaboración del compuesto híbrido presenta un reto al embeber los alambres con memoria de forma. Los valores del ensayo de flexión para el material brindan valores sobre la resistencia a la flexión, cuando los alambres actúan como sistema de cambio en la morfología y, por lo tanto, debido a esta resistencia a la flexión serán las deformaciones presentes en el mecanismo flexible.

Los resultados de la simulación del mecanismo flexible se compararon con los resultados obtenidos mediante análisis experimentales y analíticos.

Se presentan los resultados del desarrollo e implementación del mecanismo flexible en un modelo del VANT.

Los resultados de las simulaciones en CFD como lo son las gráficas de los coeficientes aerodinámicos para los diferentes bordes de ala, también se muestran las gráficas para la reducción de los coeficientes aerodinámicos.

4.1. Manufactura del mecanismo flexible

En la figura 50 se muestra el proceso de manufactura mediante bolsa de vacío, mismo que se usó en este trabajo para la fabricación de los laminados para las probetas de las pruebas de flexión, pruebas de actuación y mecanismo flexible. Se puede observar el corte de la fibra de vidrio y algunos de los insumos utilizados, ver figura 50 a). En la figura 50 b) se presenta el paso final del laminado en bolsa de vacío, cada uno de los laminados tubo un tiempo de curado de 24 hrs.

Después del proceso de curado, los laminados no necesitaron un proceso de post-curado, esto debido a que el elastómero no lo requiere y de aplicársele los alambres con memoria de forma presentarían deformaciones debido al incremento de temperatura por efectos del post-curado el cual se realizaría en un horno. Se observó que la parte inferior de los laminados presentaba una superficie «pegajosa», esta característica es debido al elastómero, sin embargo, esto no afecta el funcionamiento del mecanismo.

Mediante el desarrollo del herramental para la distribución de los alambres, presentado en la figura 29. Se logró una distribución paralela entre los mismos, por lo tanto, no se presenta una actuación inadecuada de los alambres, como se observó en la figura 30 b). Gracias a este también fue posible configurar los alambres para las probetas de flexión-torsión, ver figura 51 b).

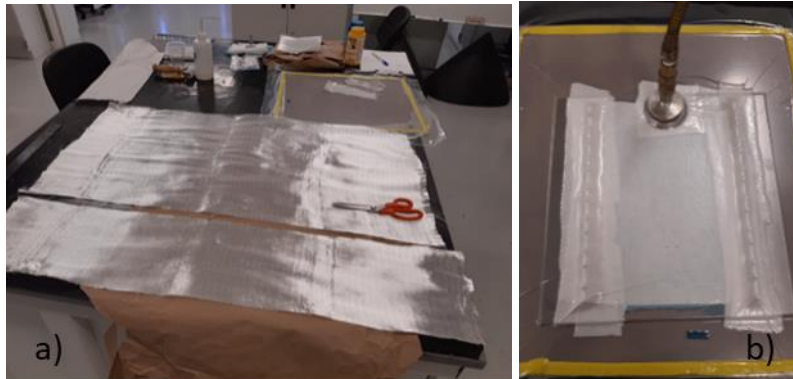


Figura 50. Proceso de manufactura en bolsa de vacío.

Los laminados realizados para las pruebas de flexión y probetas de actuación para los casos de flexión y torsión-flexión, se muestran en la figura 51 a) y figura 51 b) respectivamente, así como para las pruebas de flexión, estos también se realizaron mediante laminado en bolsa de vacío.

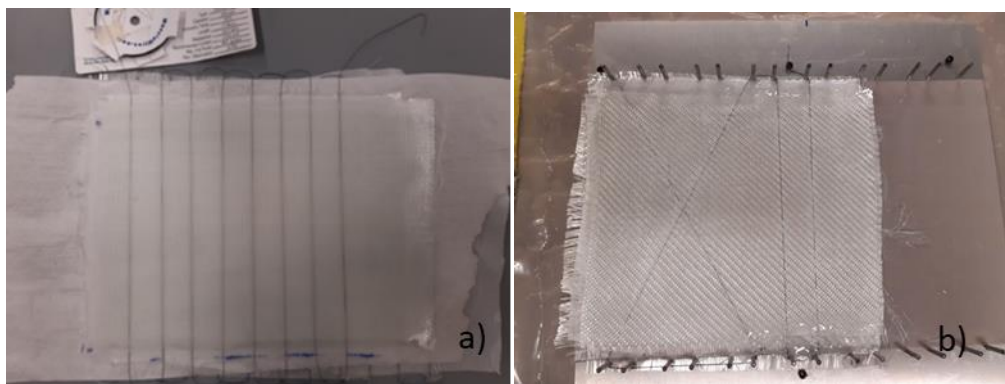


Figura 51. Laminados de probetas.

El proceso para el corte del mecanismo flexible se realizó conforme a las dimensiones del borde de ala presentado en la figura 29 del capítulo 3. En la figura 52 a) se observa cómo se colocó el borde de ala original en el laminado para el actuador, donde se aprecian los 8 alambres de SMA

para el sistema de actuación, la figura 52 b) presenta el actuador ya cortado mediante una herramienta de corte manual «bisturí».

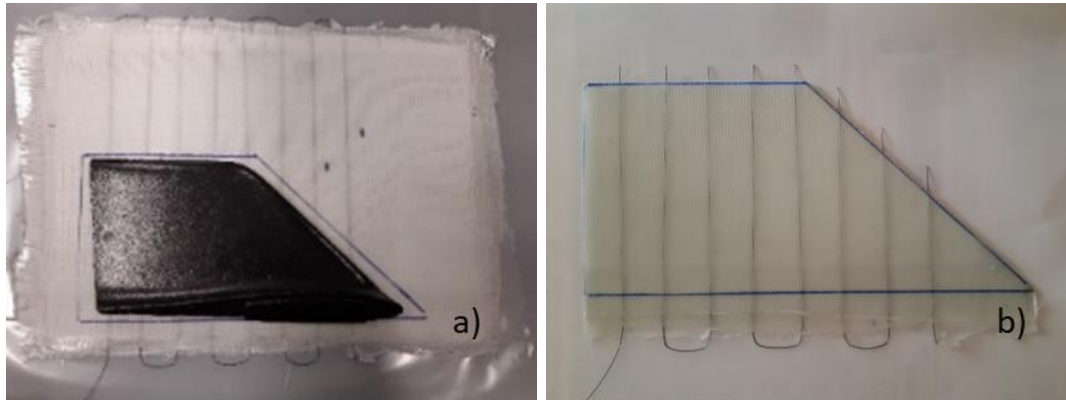


Figura 52. Proceso de corte del mecanismo flexible.

4.2. Propiedades mecánicas

Se probaron diferentes métodos de corte para el material compuesto, como se observa en la figura 53. En esta figura se muestran los resultados para las pruebas de corte, las cuales se realizaron mediante un disco de corte, ver la figura 53 a), corte por láser, ver la figura 53 b) y corte con herramienta manual que se muestra en la figura 53 c). después de realizar estas pruebas y analizar los resultados obtenidos se determinó que, la herramienta que infringió un menor daño al material fue un bisturí y, por lo tanto, se realizó un corte «limpio». Con estas pruebas realizadas se seleccionó esta herramienta de corte para realizar el corte de todos los laminados.

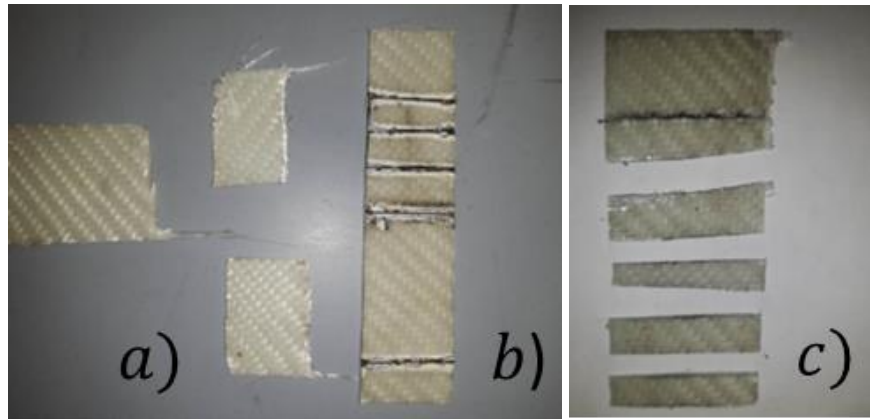


Figura 53. Cortes para material compuesto, (a) disco de corte (b) láser y (c) herramienta mecánica.

4.2.1. Ensayo de flexión

Se tomaron cinco muestras para realizar el ensayo de flexión. En la figura 54 se observan las probetas conforme a las dimensiones determinadas por la norma, con dimensiones de 50.8 mm x 12.7 mm x 1.2 mm [79].

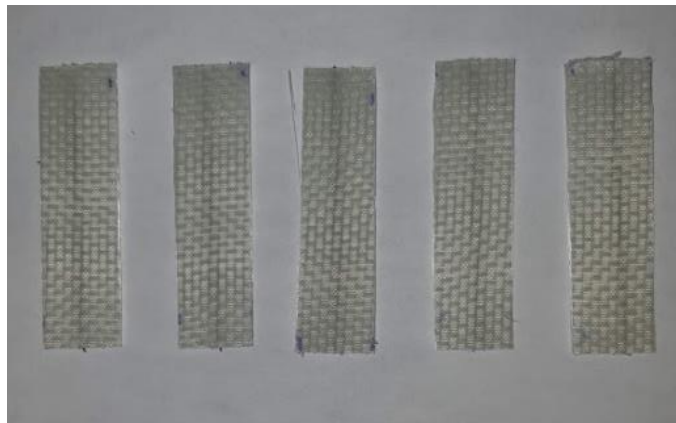


Figura 54. Probetas para prueba de flexión.

Las probetas fueron colocadas en un soporte de tres puntos para el ensayo de flexión conforme a la norma, como se muestra en la figura 55. Se realizaron ensayos de flexión a 5 probetas para los tres calibres de alambre teniendo un total de 15 muestras.

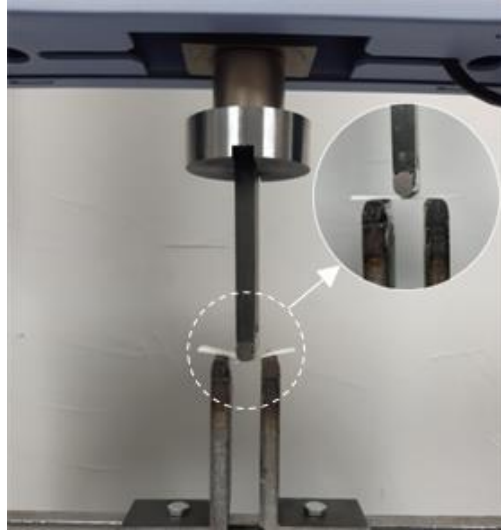


Figura 55. Ensayo de flexión.

Después de realizar los ensayos y analizar los datos. Se obtuvieron como resultados las curvas de la gráfica esfuerzo-deformación flexural para las probetas con los calibres de alambre de 250 μm , 375 μm y 500 μm , que se muestra en la figura 56. En esta figura se aprecian las curvas para los tres diferentes calibres con 5 pruebas para cada uno, para el calibre de 250 μm le corresponden las curvas de color negro, para el calibre de 375 μm las curvas de color azul y para el calibre de 500 μm las curvas de color rojo, ver la figura 56.

Los resultados obtenidos, para el calibre de alambre de 375 μm se muestran en la figura 56. Este calibre presentó una resistencia al esfuerzo flexural de 100 MPa para una de las probetas. Este para el caso de la configuración de laminados implementados en el mecanismo flexible. Se tiene una resistencia aproximada de 90 MPa. Esta resistencia al esfuerzo-deformación flexural se comprobó con la obtenida mediante la simulación del mecanismo, la cual fue de 37 MPa, valor que se encuentra por debajo de la resistencia máxima, presentando un factor de seguridad de 2.4.

Dependiendo de la configuración del número de laminados y calibre de alambre implementado será la resistencia al esfuerzo-deformación flexural que se presente para cada configuración.

Por lo tanto, estos valores y configuraciones determinan la resistencia a efectos de aeroelasticidad.

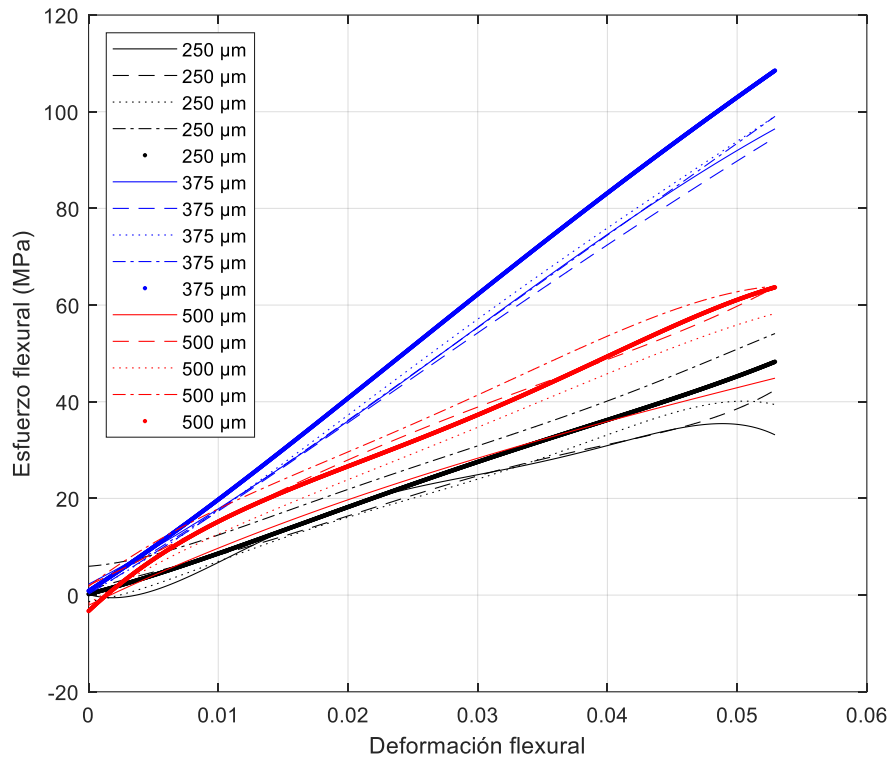


Figura 56. Gráfica de esfuerzo-deformación flexural.

4.2.2. Pruebas con cámara termográfica

Los resultados de las pruebas con la cámara termográfica para un alambre de Nitinol con efecto de memoria de forma unidireccional, se muestran en la figura 57. Se observa el incremento de temperatura de un tiempo t_0 y un tiempo t_3 , donde se observan los incrementos de temperatura respecto al tiempo, para un tiempo t_0 se presentan temperaturas de 27 – 37 °C llegando a una temperatura máxima de 45 °C para un tiempo t_2 .

Las pruebas térmicas realizadas a las diferentes probetas muestran las temperaturas de activación de 68 °C para los alambres de LT (low temperature), que se presentan en la figura 57 y figura 58, así como 78 °C para HT (high temperature), ver la figura 59. Se observó la distribución de estas temperaturas al aplicar la carga de activación para un alambre unidireccional, mostrado en la figura 58.

En la figura 57 también se observa que conforme al incremento de temperatura sobre el alambre con memoria de forma se presentan deformaciones y por lo tanto el cambio en la geometría, esto debido a la aplicación del ciclo térmico.

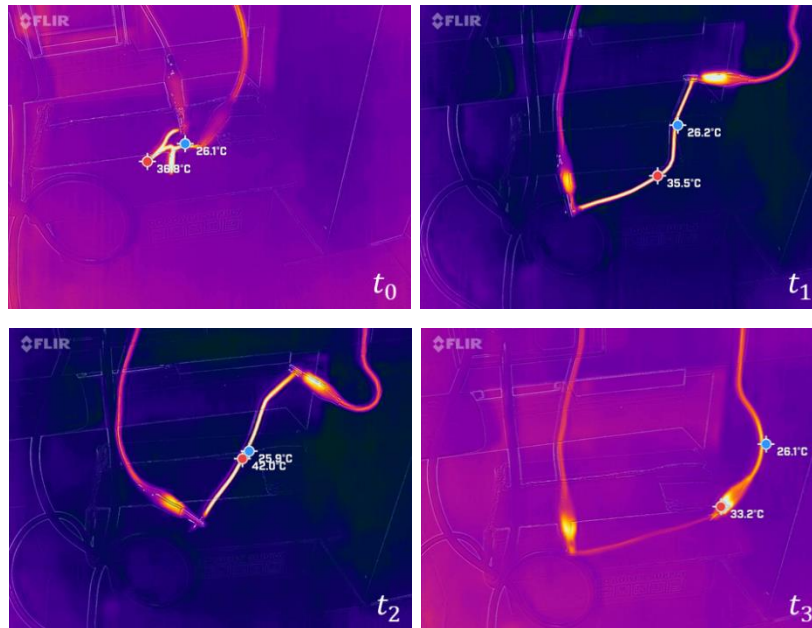


Figura 57. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol unidireccional.

Se observó la distribución del incremento de las temperaturas para cada calibre de alambre. De igual manera, se presentan imágenes térmicas para calibres de alambre de Nitinol de alta (HT) y baja (LT) temperatura de activación, ver la figura 58 para un calibre de alambre de 75 μm en donde se observa que para un tiempo inicial t_0 con una temperatura de 43.9 °C y t_8 con una temperatura de 63.4 °C para un tiempo final y para el calibre de 150 μm se presentaron temperaturas de 36.1 °C para un tiempo t_0 y 65.1 °C para un tiempo t_6 .

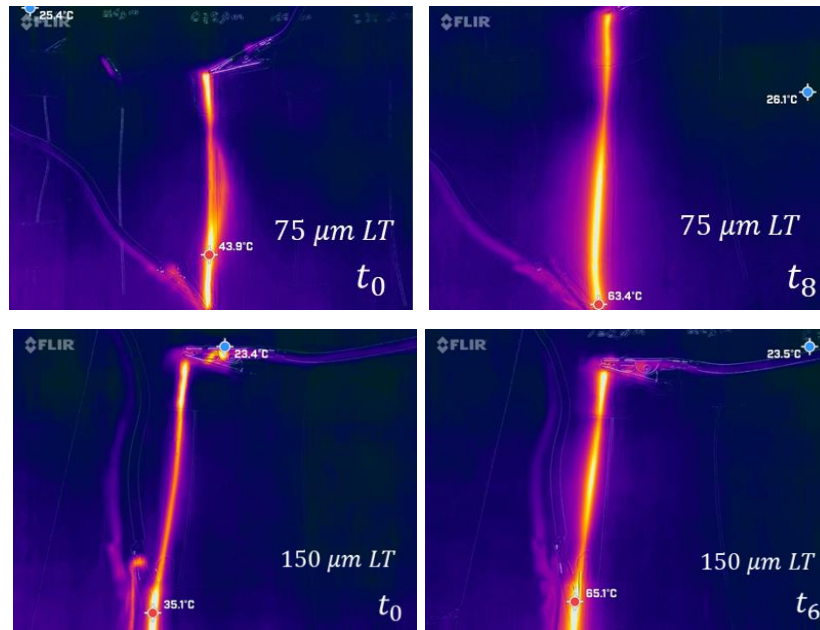


Figura 58. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibres 75 μm y 150 μm .

Estos resultados experimentales se comparan con la simulación mediante efecto Joule implementada en el software COMSOL.

En la figura 59 se presentan las imágenes térmicas para el calibre de 250 μm LT y HT donde se observa que para un tiempo t_0 una temperatura de 53.1 $^{\circ}\text{C}$, en un tiempo t_5 se presentó una temperatura de 81.6 $^{\circ}\text{C}$ y la figura 60 presenta las imágenes térmicas para el calibre de 375 μm donde se observa que para un tiempo t_0 una temperatura de 47.1 $^{\circ}\text{C}$, para un tiempo t_6 se presentó una temperatura de 69.7 $^{\circ}\text{C}$.

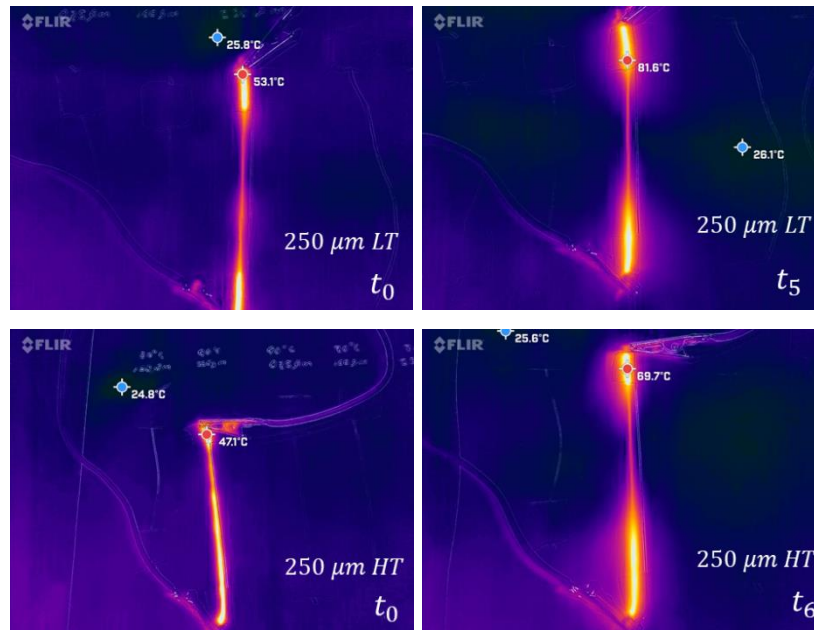


Figura 59. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibres 250 μm LT y 250 μm HT.

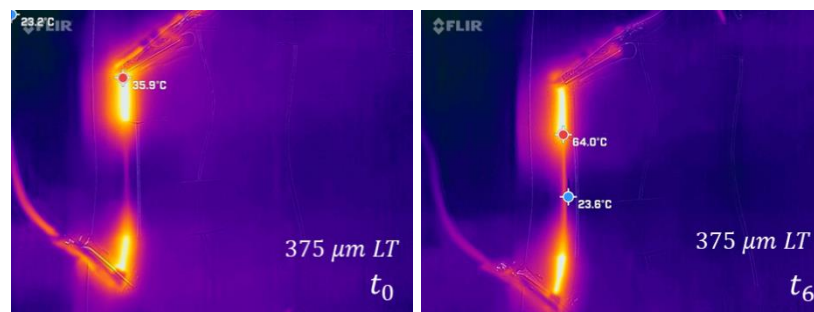


Figura 60. Imágenes térmicas para alambre de Nitinol calibre 375 μm LT.

La prueba realizada para el alambre de Nitinol embebido en el compuesto híbrido es mostrada en la figura 61, donde se observa la distribución de temperaturas generadas por la aleación en el compuesto híbrido. Para un tiempo t_0 se observa que el mayor incremento de temperatura esta en el centro de la probeta, esto debido a que es el alambre el que esta incrementando su temperatura, después para un tiempo t_4 se observa un incremento de la temperatura en el material compuesto.

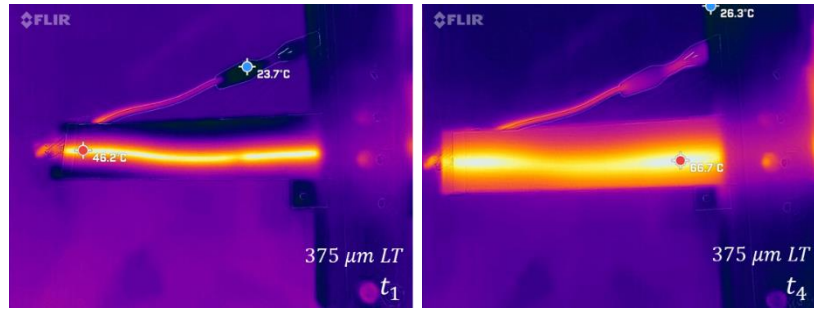


Figura 61. Imágenes térmicas de calibre de alambre 375 μm LT embebido en compuesto híbrido.

La distribución de temperaturas sobre el material compuesto se considera que no es suficiente como para dañar el material donde se presentó una temperatura máxima de 66.7 °C, para un tiempo t_4 , ver la figura 61, sin embargo, si el tiempo de activación del alambre es prolongado, esto se verá reflejado en un aumento de las temperaturas sobre el compuesto, se observó que causa un daño interno en el material, sin embargo, esto no dañará al mecanismo flexible y, por lo tanto, no restringirá su funcionamiento.

4.2.3. Pruebas de actuación

En la figura 62 se presentan las probetas de alambre de aleación con memoria de forma embebido en un compuesto híbrido para las pruebas de actuación a flexión y flexión-torsión, como se muestra en la figura 62 (a) y figura 62 (b), respectivamente.

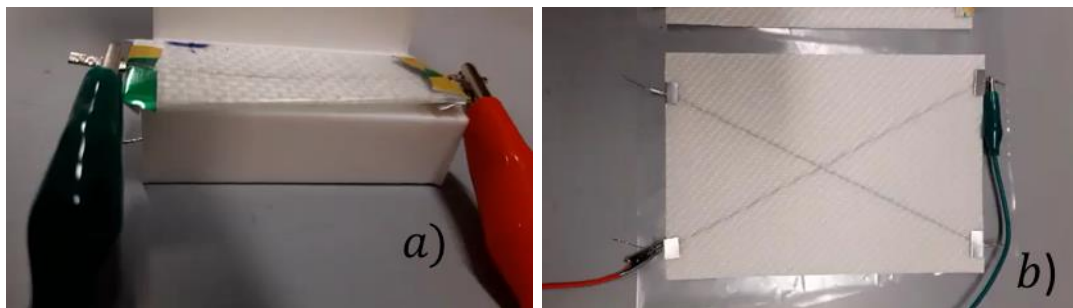


Figura 62. Probetas para prueba de actuación, modos de actuación a) flexión y b) flexión-torsión.

En las pruebas experimentales para la probeta a flexión de la figura 62 a) se apreció una deformación de 5 mm aproximadamente para un tiempo t_2 , como se muestra en la figura 64. Este

resultado se validó mediante la simulación de una probeta con las mismas dimensiones y propiedades en ANSYS, ver la figura 63, bajo las mismas condiciones iniciales de la prueba física donde se presentó una deformación máxima de 4.15 mm. Esta misma deformación se puede apreciar en la figura 64 para la prueba experimental.

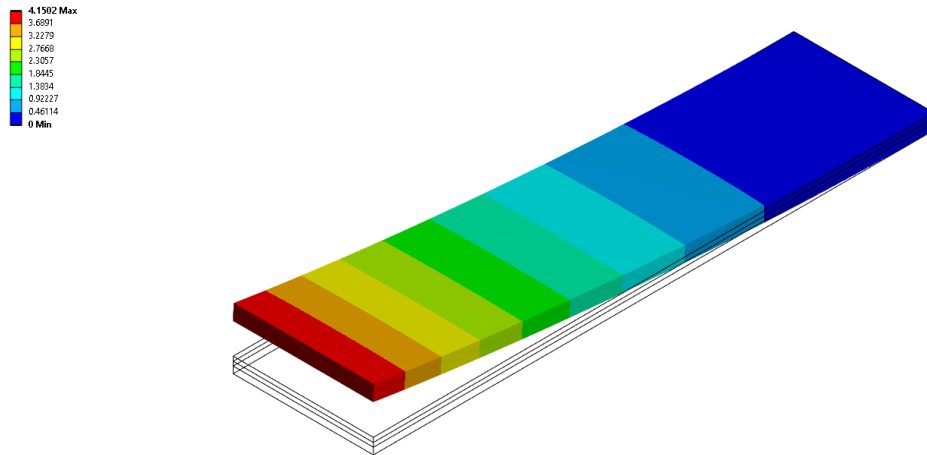


Figura 63. Deformación (mm) de la probeta.

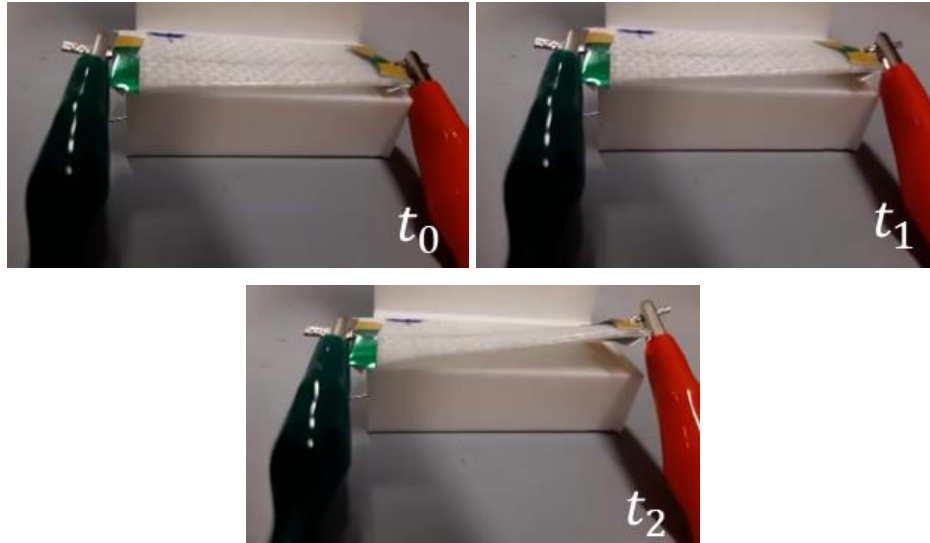


Figura 64. Prueba de actuación para probeta de alambre de Nitinol embebido en compuesto híbrido.

Para la prueba de actuación de la probeta de flexión-torsión de la figura 62 (b), se realizó mediante una configuración de viga en voladizo, como se muestra en la figura 65 para un tiempo t_0 , después de aplicar el ciclo térmico mediante una diferencia de potencial se apreció una deformación

máxima de 25 mm, para un tiempo t_2 , en la figura 65 se observa que la escala de referencia en donde cada cuadro es de 10 mm. En esta figura también se aprecia que conforme a la disposición geométrica de los alambres se generó el efecto de torsión esperado para la probeta.

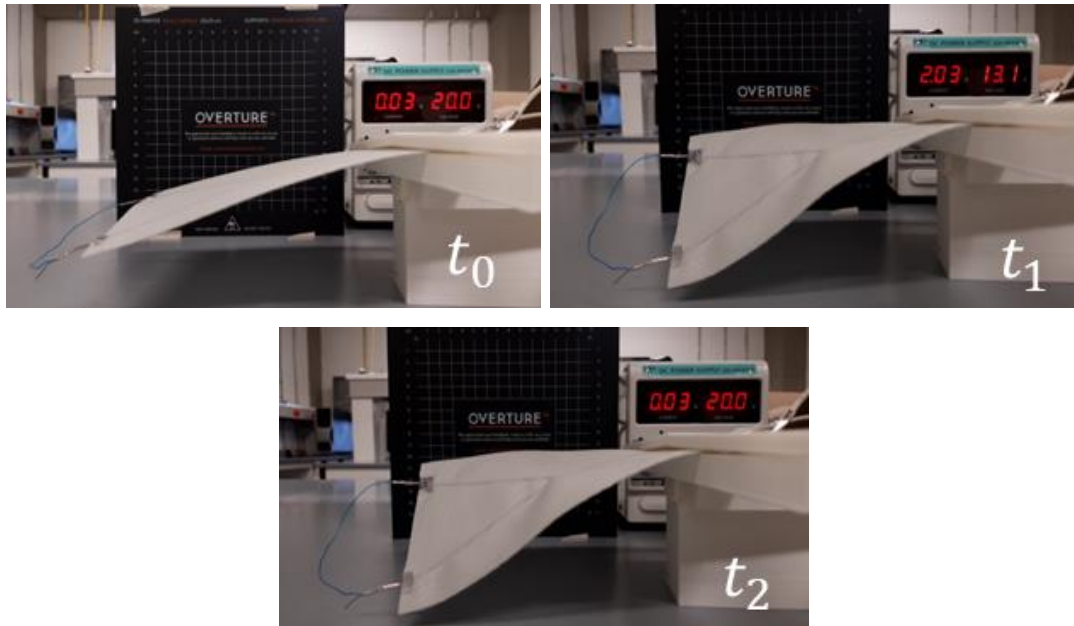


Figura 65. Prueba de actuación para el modo de actuación a flexión-torsión.

La prueba de actuación para el mecanismo flexible de la figura 52 b) se realizó con la misma configuración de viga en voladizo, como se muestra en la figura 66, en este ensayo se observa que para un tiempo t_0 el actuador se encuentra 3 cuadros por encima del final de la escala que se muestra en la parte trasera, cada cuadro tiene dimensiones de 10 mm x 10 mm. Después de aplicar

la diferencia de potencial, para un tiempo t_3 se apreció un desplazamiento máximo de 25 mm aproximadamente, como se muestra en la figura 66.

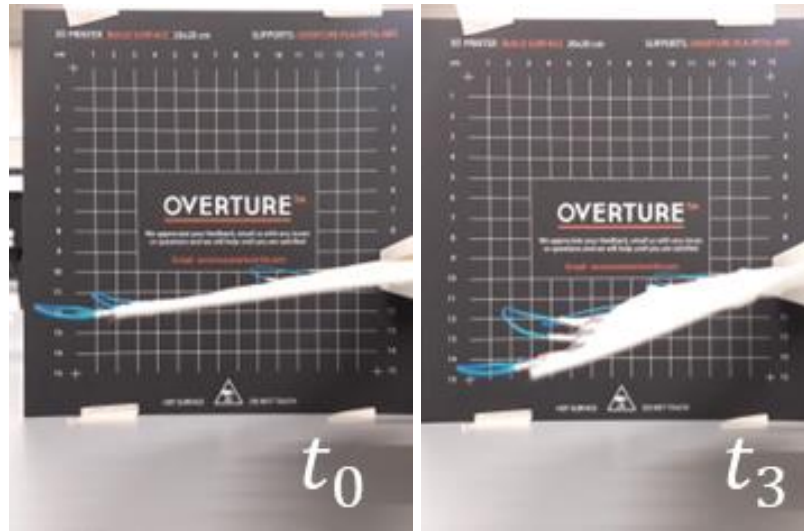


Figura 66. Prueba de actuación para el mecanismo flexible.

4.3. Análisis matemático del mecanismo mediante viga con carga de momento en el extremo

Mediante el análisis analítico para mecanismos flexibles se determinaron, el ángulo de deformación y deformación vertical para las diferentes configuraciones geométricas propuestas en el capítulo 3 del apartado 3.3.2.1, en la tabla 6 se presentan las diferentes configuraciones del número de laminados (L) inferiores y superiores, y número de alambres (W) para el sistema de actuación.

Los resultados del análisis matemático para las configuraciones con calibre de alambre de 250 μm se presentan en la figura 67, para el sistema de actuación con el calibre de alambre de 375 μm , ver la figura 68 y para las configuraciones con el calibre de alambre de 500 μm se presentan en la figura 69.

Las configuraciones que presentan mayores desplazamientos son configuraciones con solo un laminado para los tres diferentes calibres de alambre. Esto debido a la resistencia a la flexión que

presentan. A mayor número de laminados, mayor resistencia al esfuerzo flexural y a menor número de laminados, mayores desplazamientos.

Una configuración mínima de laminados no brinda la suficiente rigidez al actuador, debido a esto se tiene menor resistencia a fenómenos de aeroelasticidad.

Para la configuración del laminado del mecanismo se presentó una deformación máxima de 30 mm, como se observa en la figura 68, para la deformación vertical de la configuración geométrica implementada en el mecanismo flexible. Comparando con la deformación de 15 mm mediante simulación y 22 mm mediante una prueba experimental. Se considera que los estos valores son adecuados. La diferencia entre estos es debido a las propiedades geométricas y de materiales no lineales.

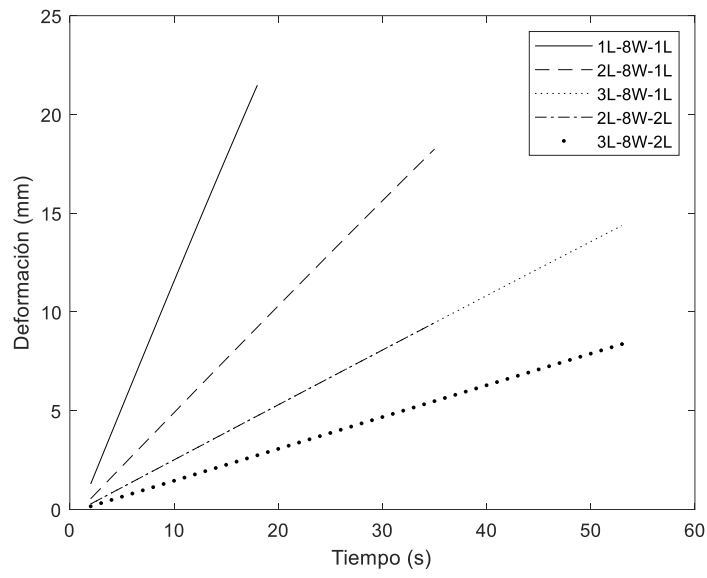
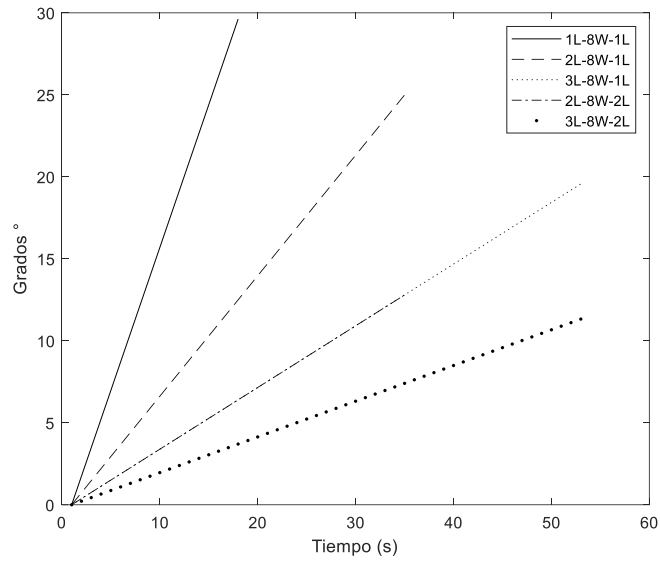


Figura 67. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 250 μm .

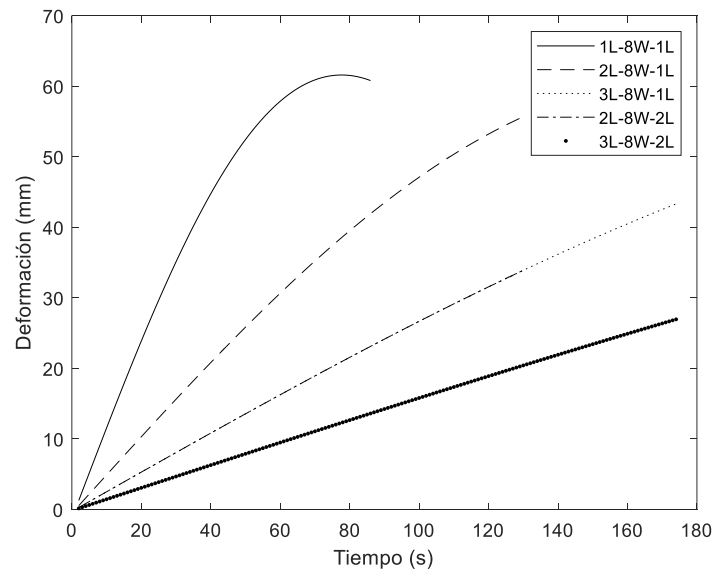
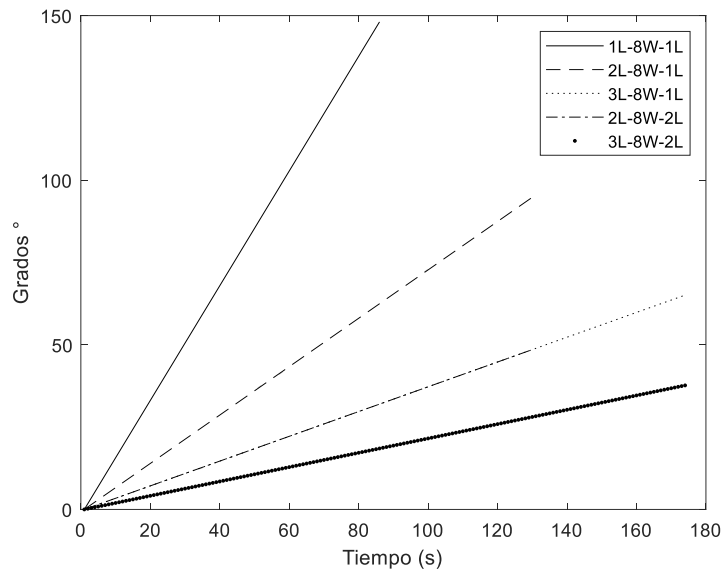


Figura 68. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 375 μm .

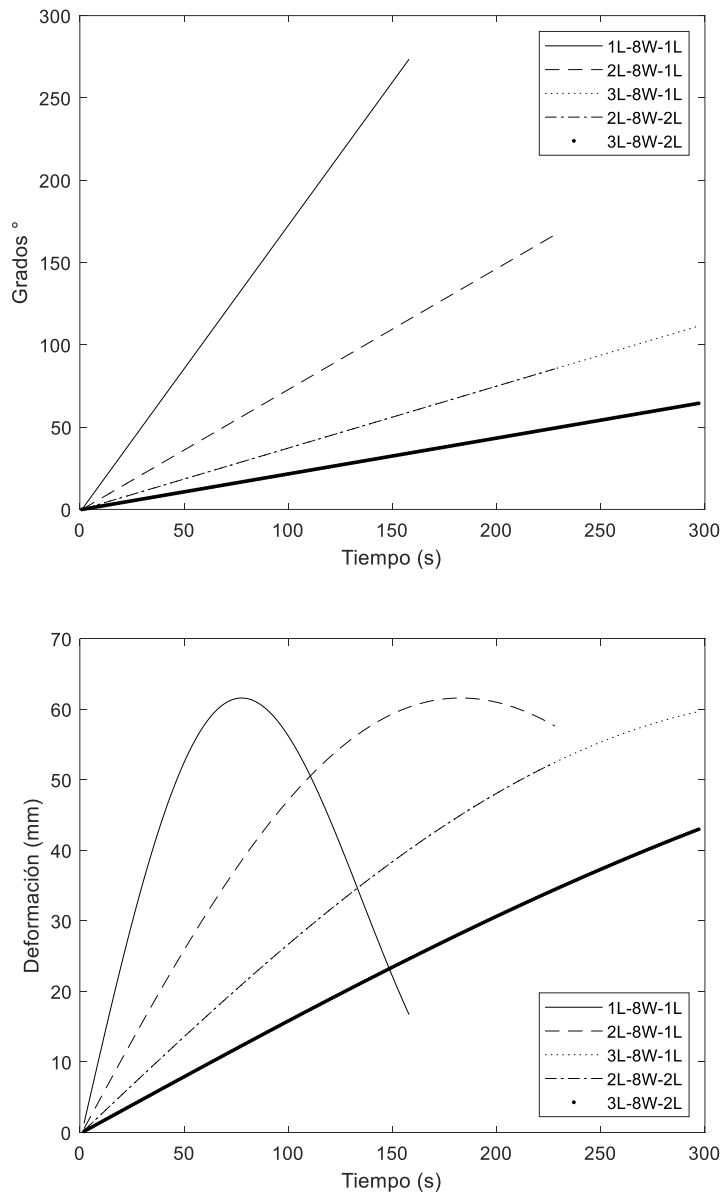


Figura 69. Ángulo y deformación vertical para configuraciones con calibre 500 μm .

4.4. Simulación de propiedades de memoria de forma y superelasticidad

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el software, ANSYS y COMSOL. En donde se efectuaron simulaciones implementando los modelos constitutivos de Souza-Auricchio y Lagoudas para las propiedades de las aleaciones con memoria de forma.

Para las simulaciones realizadas en ambos software, se configuro una geometría de un alambre con dimensiones de 375 μm de diámetro y 10 mm de longitud.

4.4.1. Modelo de Auricchio mediante ANSYS

Un mallado simple como se muestra en la figura 70 a) y condiciones iniciales de desplazamiento, y soporte fijo, ver la figura 70 b). Se aplicaron las propiedades de memoria de forma de la tabla 8, que se presentan en el anexo 3. Estas condiciones iniciales y propiedades del material fueron aplicadas para la simulación de la propiedad de superelasticidad, implementando el modelo constitutivo de Auricchio empleado por el software ANSYS.

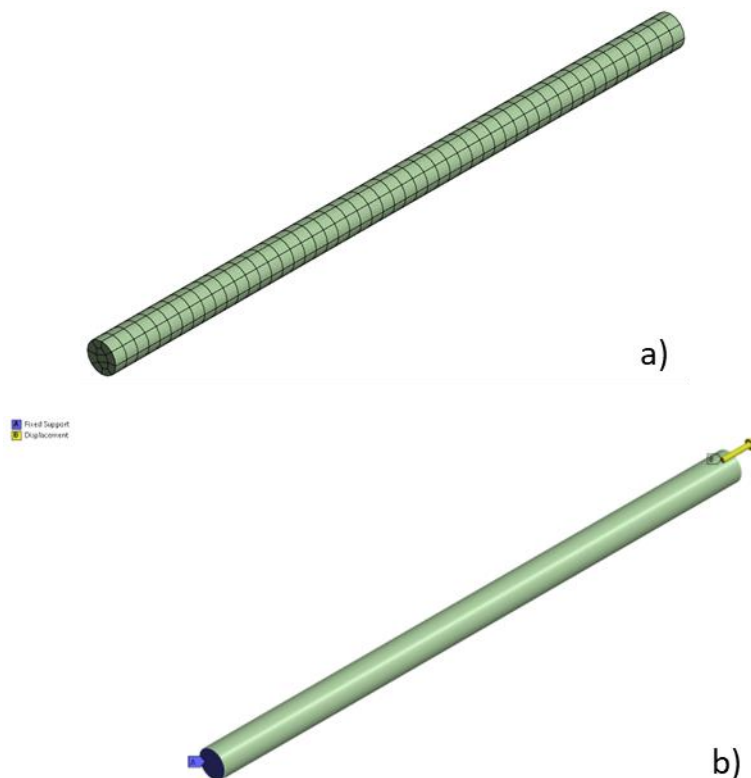


Figura 70. Mallado y condiciones iniciales para efecto de superelasticidad.

Los resultados de deformación se muestran en la figura 71 a) y la dirección de la fuerza de reacción para el efecto de superelasticidad, se presenta en la figura 71 b).

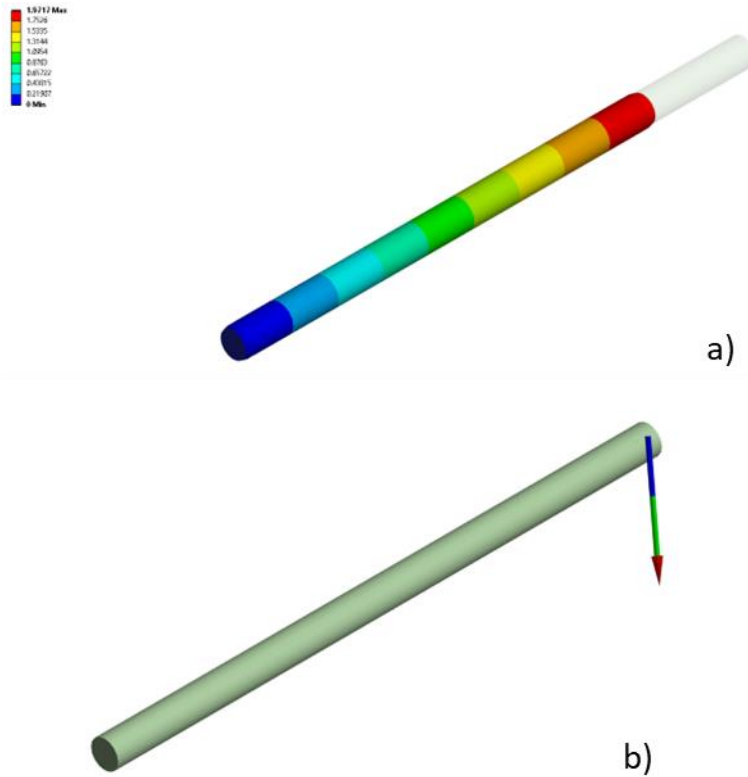
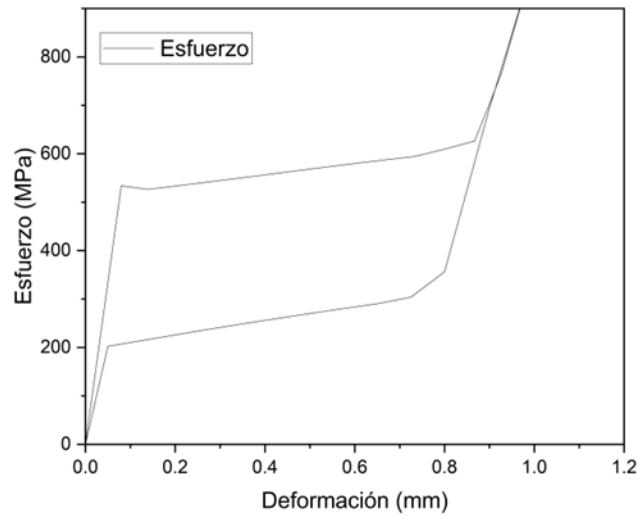


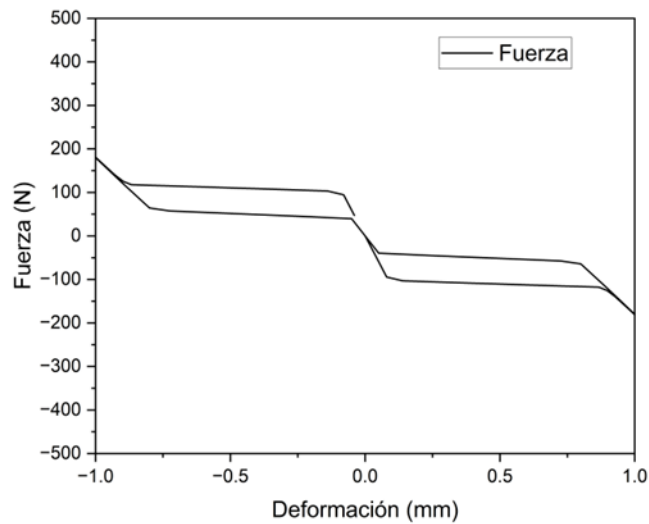
Figura 71. Deformación (a) y dirección de la fuerza de reacción (b) para el efecto de superelasticidad.

Las gráficas características de las SMA para el efecto de superelasticidad como lo son la gráfica de esfuerzo-deformación y fuerza-deformación se presentan en la figura 72.

En la figura 72 a) se muestra el ciclo típico de pseudoelasticidad obtenido mediante la simulación, como se mostró en la figura 19 del capítulo 2. También se observa en la figura 72 b) un efecto de memoria de forma bidireccional representado en la gráfica.



a)



b)

Figura 72. Gráficas esfuerzo deformación (a) y fuerza-deformación (b).

Para la simulación del efecto de memoria de forma implementado en ANSYS se aplicó un mallado simple, ver figura 73 a) y condiciones iniciales de temperatura, desplazamiento y soporte fijo como se muestra en la figura 73 b). Se aplicaron las propiedades de memoria de forma de la tabla 8, que se presentan en el anexo 3. Estas condiciones iniciales fueron implementadas para el efecto de memoria de forma de una SMA, las condiciones iniciales que se implementaron fueron para un efecto de memoria de forma bidireccional.

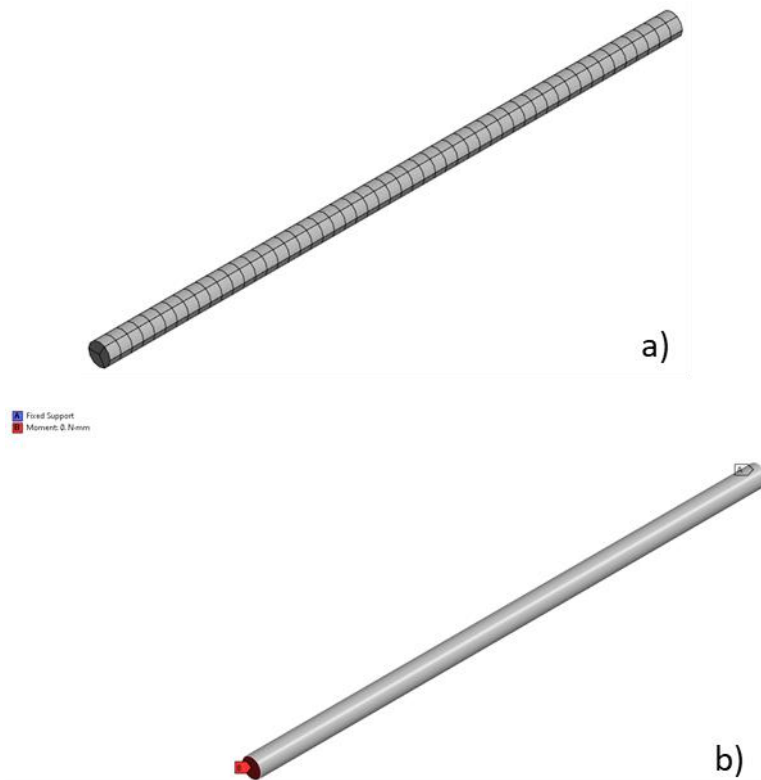


Figura 73. Mallado y condiciones iniciales para efecto de memoria de forma.

Los resultados de la deformación para el efecto de memoria de forma se presentan en la figura 74 a) y los esfuerzos resultantes por la aplicación de las condiciones iniciales se observan en la figura 74 b). Estos resultados se presentaron en la geometría del alambre con memoria de forma bidireccional, se observa el efecto característico previsto por la predicción de la dirección de la fuerza obtenida para la simulación de la propiedad de superelasticidad, como se mostró en la figura 71 b).

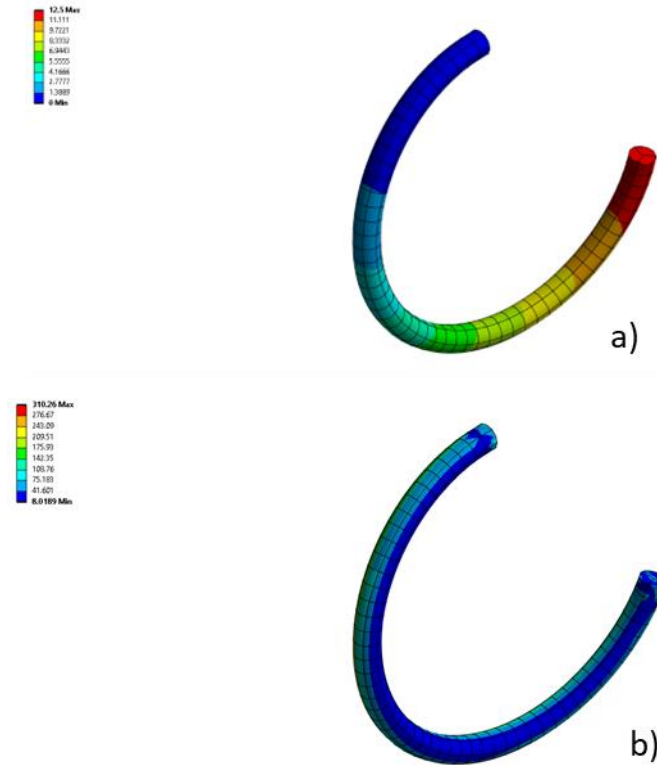


Figura 74. a) Deformación (mm) y b) esfuerzo (MPa) para el efecto de memoria de forma bidireccional.

La simulación del modelo constitutivo de Auricchio mediante ANSYS con la selección de propiedades para el material con memoria de forma predice el comportamiento de un efecto de memoria de forma bidireccional, ver la figura 74. Estos resultados se ven reflejados en las gráficas de esfuerzo-deformación y fuerza-deformación, como se muestra en la figura 72.

A su vez, también es posible simular los efectos para un efecto de memoria de forma unidireccional, así como efectos de superelasticidad. Esto ajustando las condiciones iniciales y propiedades del material.

4.4.2. Simulación del efecto de memoria de forma, mediante calentamiento por efecto Joule

La simulación para las propiedades de memoria de forma y superelasticidad en COMSOL, se pueden realizar de dos maneras. Mediante el efecto Joule y expansión térmica e implementando los modelos constitutivos de Lagoudas y Souza-Auricchio disponibles en COMSOL.

Primeramente, se presenta la simulación bajo el efecto Joule y coeficientes de expansión térmica, se aplicaron las propiedades físicas de la aleación de Nitinol, estas se presentan en la tabla 7 del anexo 3, también se aplicaron las condiciones de frontera de soporte fijo y condiciones iniciales. Se aplicó una condición inicial de intensidad de corriente eléctrica conforme al valor para el calibre de alambre seleccionado, estos valores se presentan en el anexo 1.

Los resultados de la simulación efectuada se presentan en la figura 75 mediante el efecto Joule en COMSOL. Se observan los desplazamientos, ver la figura 75 a) y esfuerzos presentes, como se muestra en la figura 75 b), así como la distribución de la temperatura generada por la aplicación de las cargas de activación, ver la figura 75 c).

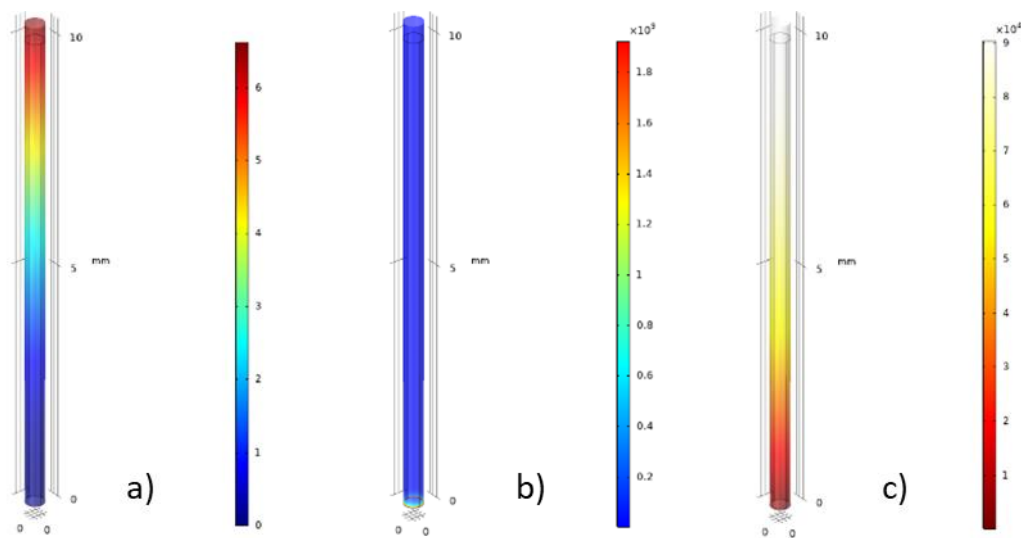


Figura 75. a) Deformación (mm), b) esfuerzo (MPa) y c) temperatura (°C).

4.4.3. Simulación de efectos de superelasticidad y memoria de forma para diferentes secciones transversales mediante ANSYS y COMSOL

La selección de una diferente área de sección transversal para un alambre con memoria de forma presenta diferentes propiedades. En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la simulación de diferentes alambres de Nitinol con diferentes secciones transversales propuestas para determinar los desplazamientos y fuerzas de activación para su aplicación como sistemas de actuación, los cuales se mencionaron en el capítulo 3, apartado 3.3.2.1. Estas simulaciones se realizaron en ANSYS y COMSOL.

4.4.3.1. ANSYS

Después de realizar las simulaciones para cada área de sección transversal con propiedades de superelasticidad propuestas en el capítulo 3, se analizaron los datos y se graficaron las curvas de fuerza-deformación, que se presentan en la figura 76. Donde se observa una variación dependiendo de la sección transversal.

Se aprecia que las secciones; circular, cuadrada, triangular y hexagonal presentan curvas similares entre si, las curvas para las secciones rectangular y elíptica son similares, como se muestra en la figura 76.

Se realizó una comparación para los valores obtenidos de las gráficas de fuerza-deformación para cada sección transversal, ver la figura 77, donde se observa que la sección elíptica es la que presenta mayor fuerza de reacción de 110 N, sin embargo, esta presenta una deformación de 4 mm a diferencia de las secciones restantes, las cuales tienen una fuerza de reacción similar de 60 N y una deformación menor de los 8 mm.

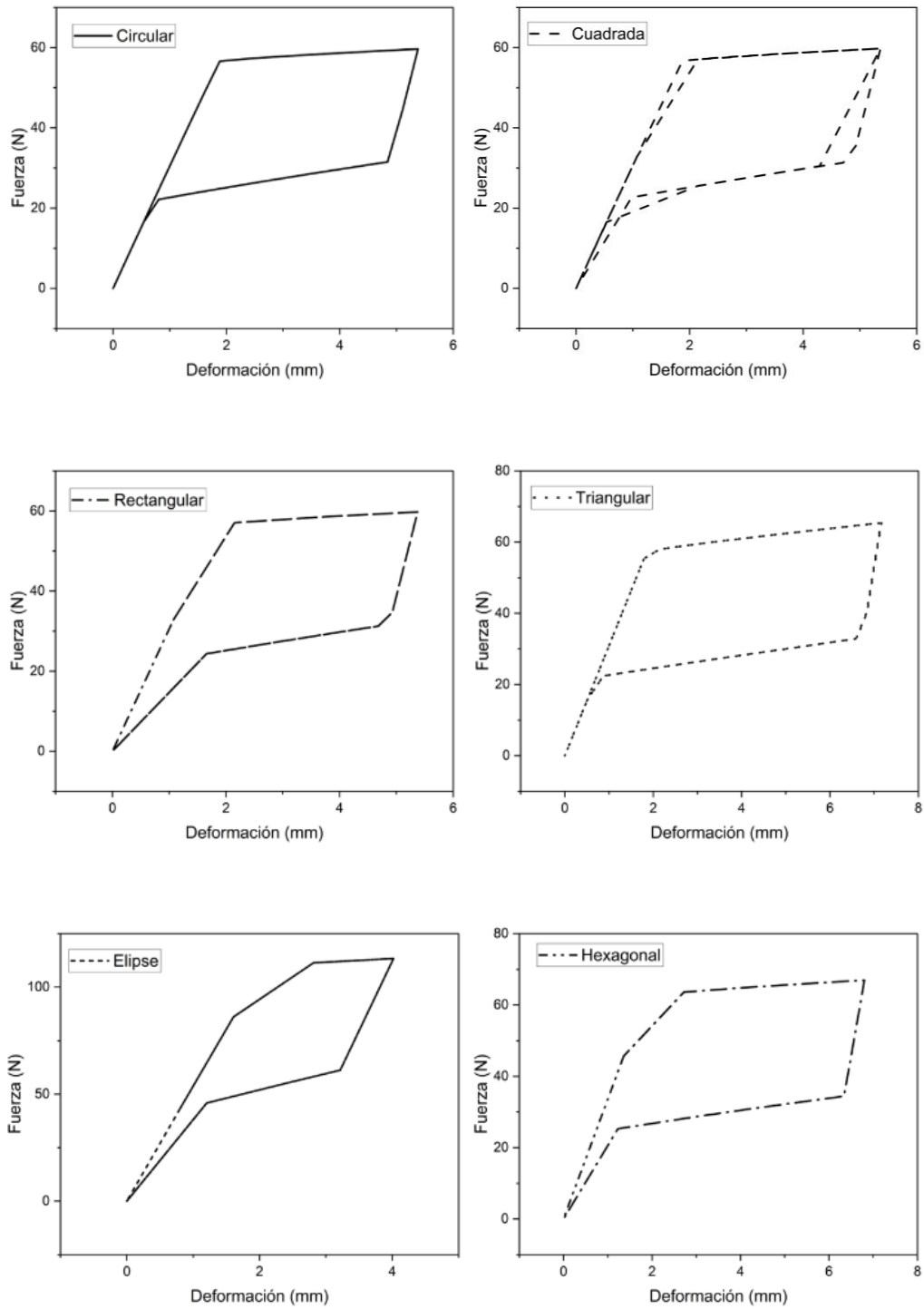


Figura 76. Gráficas fuerza-deformación para secciones transversales.

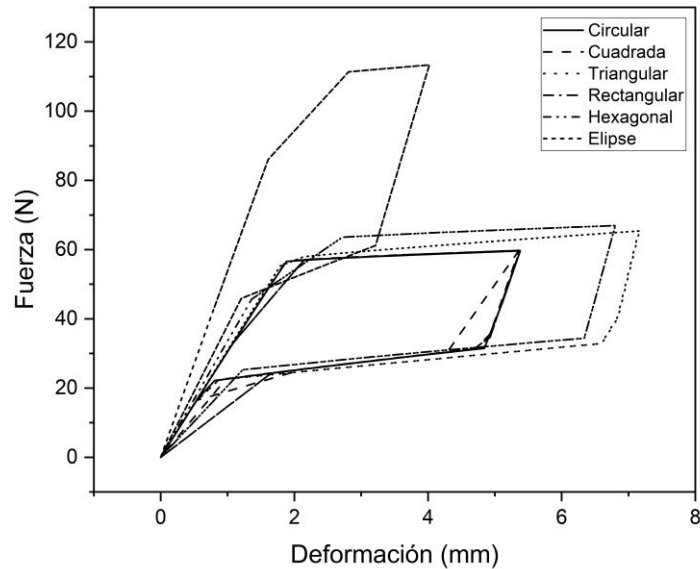


Figura 77. Comparación grafica fuerza-deformación para secciones transversales efecto de superelasticidad.

La simulación de las diferentes secciones de área transversal para diferentes alambres con propiedades de superelasticidad implementadas en ANSYS presenta como resultados las gráficas de fuerza-deformación, ver la figura 77 para las seis secciones transversales propuestas.

Se presenta un comportamiento similar entre ellas bajo el efecto de superelasticidad entre las secciones; circular, cuadrada, triangular y hexagonal, las secciones rectangular y elíptica son similares.

Las secciones presentaron una deformación menor a los 7 mm y un esfuerzo menor de 700 MPa, como se observa en la figura 78 y figura 79.

Se realizó una comparación entre estas gráficas de esfuerzo-deformación, ver la figura 79. La sección elíptica presenta una mayor resistencia al esfuerzo, en comparación con las demás secciones transversales.

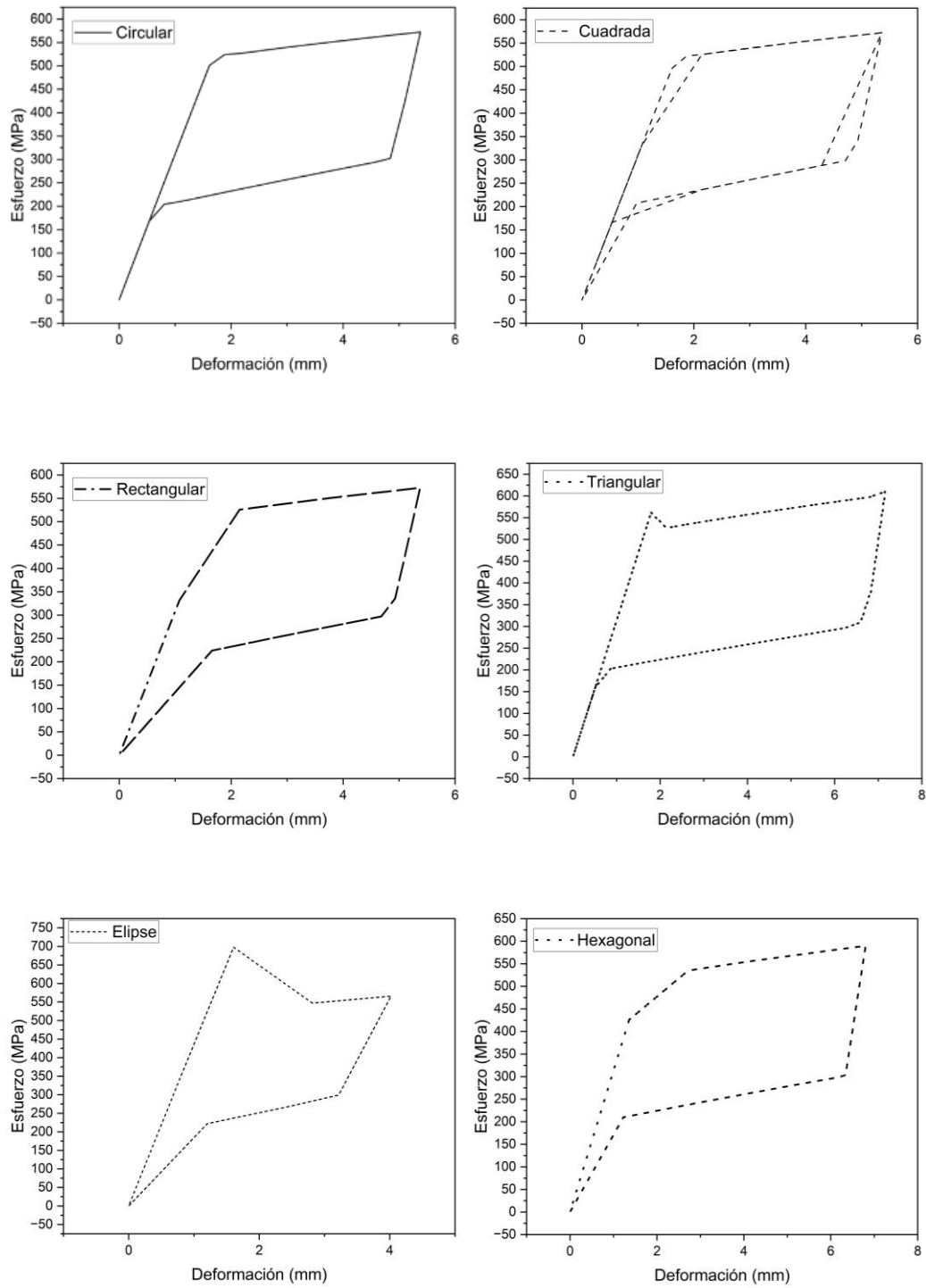


Figura 78. Gráficas esfuerzo-deformación para las secciones transversales efecto de superelasticidad.

Se observa que la sección con mayor fuerza de actuación es la sección elíptica, sin embargo, presenta menor deformación. La sección con mayor deformación es la sección triangular. Las secciones cuadrada, circular y rectangular presentan valores similares de fuerza de actuación. El comportamiento es similar para las gráficas de esfuerzo-deformación, como se muestra en la figura 79.

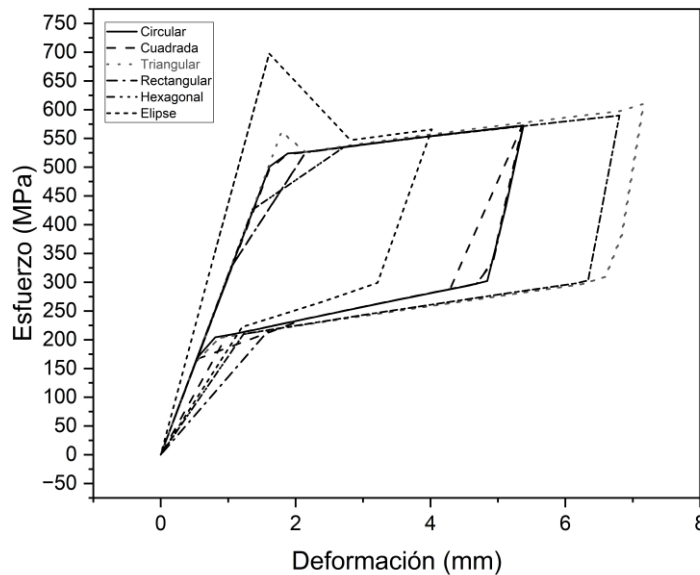


Figura 79. Gráfica esfuerzo-deformación para secciones transversales efecto de superelasticidad.

Implementando el modelo de Auricchio para el efecto de memoria de forma se presenta la simulación de las diferentes secciones transversales, como se muestra en la figura 80, se observa las gráficas de fuerza-deformación para estas secciones. La comparación de estos resultados se presenta en la figura 81, donde se observa que la sección circular es la que presenta mayor fuerza de reacción seguida por la sección hexagonal y elíptica.

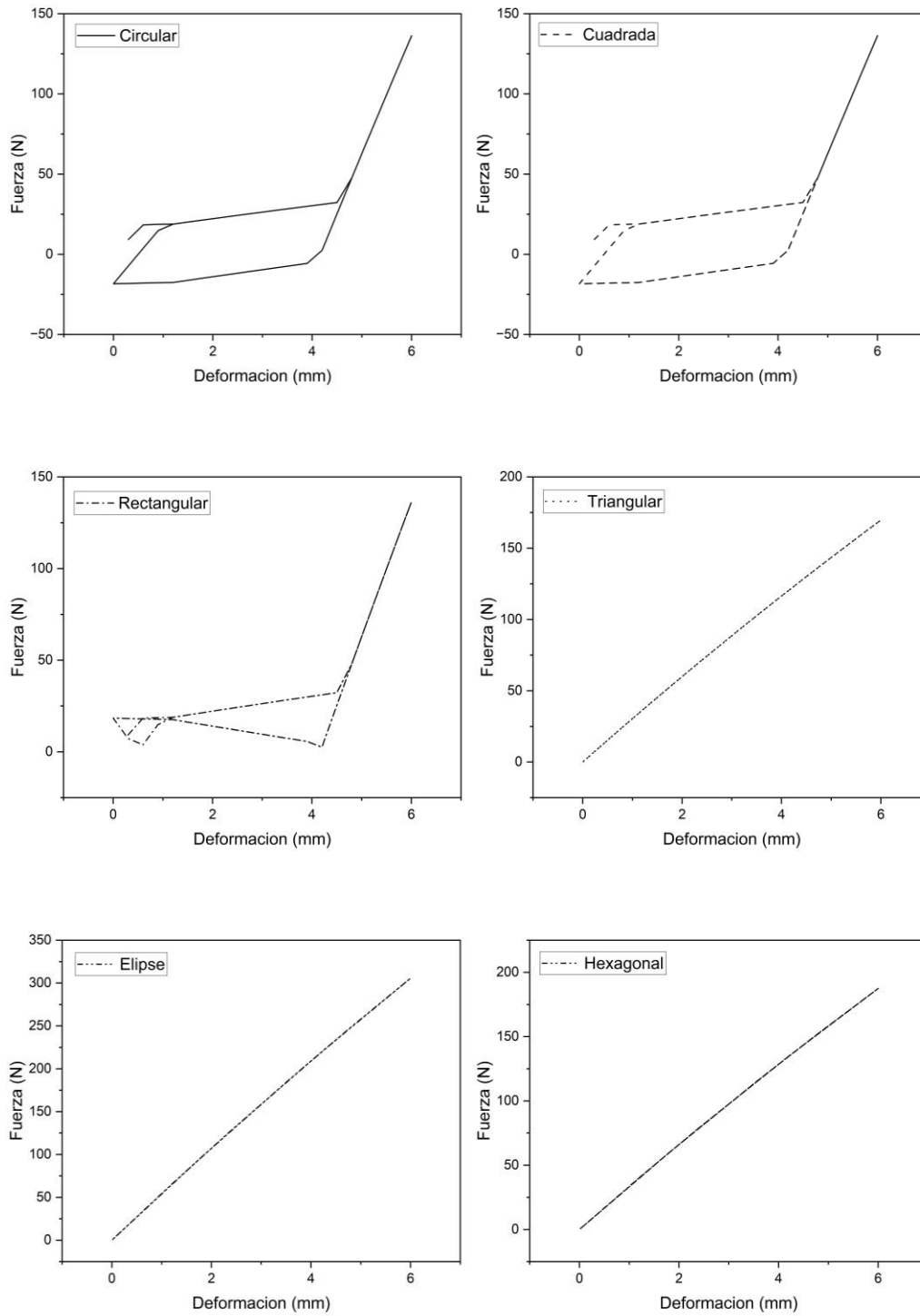


Figura 80. Gráficas fuerza-deformación secciones transversales efecto de memoria de forma.

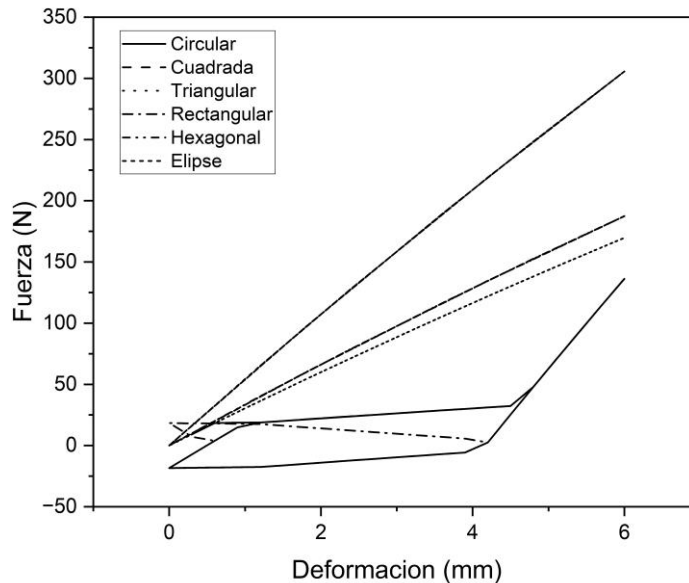


Figura 81. Gráfica fuerza-deformación secciones transversales efecto de memoria de forma

Con el análisis de estas secciones transversales se tiene un panorama acerca de qué tipo de sección transversal es la ideal para implementar en un determinado sistema de actuación para un mecanismo flexible, así como el tipo de laminados a implementar. Ya que se tienen valores de fuerza de reacción y esfuerzo máximo, sin embargo, se debe de considerar que la mayoría de las secciones transversales no están disponibles en el mercado. Se tendría que manufacturar o desarrollar un método de manufactura para las mismas.

Se corrobora que, la investigación realizada por Khodaei & Terriault [52], donde mencionan que el modelo de Auricchio no predice de manera adecuada el efecto de memoria de forma.

4.4.3.2. COMSOL

La simulación para las diferentes secciones transversales en COMSOL se realizó mediante los modelos constitutivos para las SMA, como los son el modelo Souza-Auricchio y modelo de Lagoudas. Las gráficas de esfuerzo y deformación vs. % volumen mediante el modelo de Lagoudas se presenta en la figura 82.

Para el modelo de Souza-Auricchio, ver la figura 83, donde se observa las gráficas de deformación y esfuerzo vs. % de volumen.

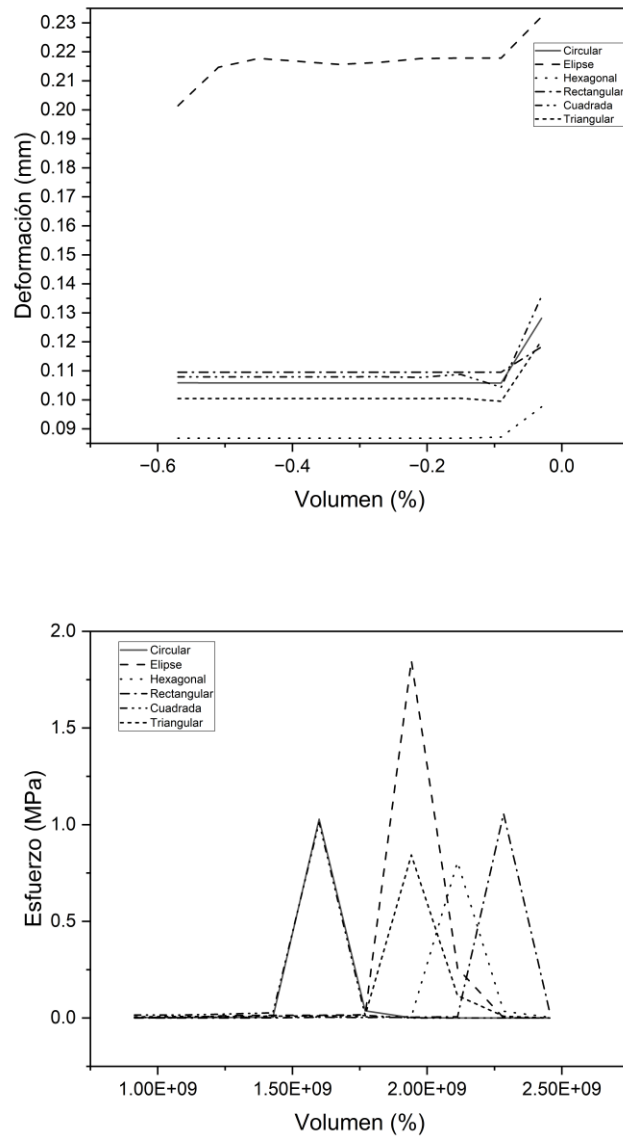


Figura 82. Gráficas deformación vs. % volumen y esfuerzo vs. % volumen para las diferentes secciones transversales mediante el modelo de Lagoudas.

La simulación de las diferentes secciones transversales en COMSOL se observó que la sección elíptica presenta mayores desplazamientos y, por lo tanto, mayores esfuerzos, ver la figura 82 para

el modelo de Lagoudas. Este mismo comportamiento se presenta con la implementación del modelo de Souza-Auricchio, como se muestra en la figura 83.

Los resultados de la simulación para los modelos constitutivos de Lagoudas y Souza-Auricchio implementados en COMSOL se presentan en la figura 82 y figura 83, donde se observan las gráficas de fuerza y deformación para los modelos, en ambos se observa que la sección elíptica es la que presenta mayor fuerza de reacción, sin embargo, la que presenta mayor esfuerzo es la sección triangular.

Estos resultados obtenidos presentan un comportamiento similar a los resultados del modelo de Auricchio.

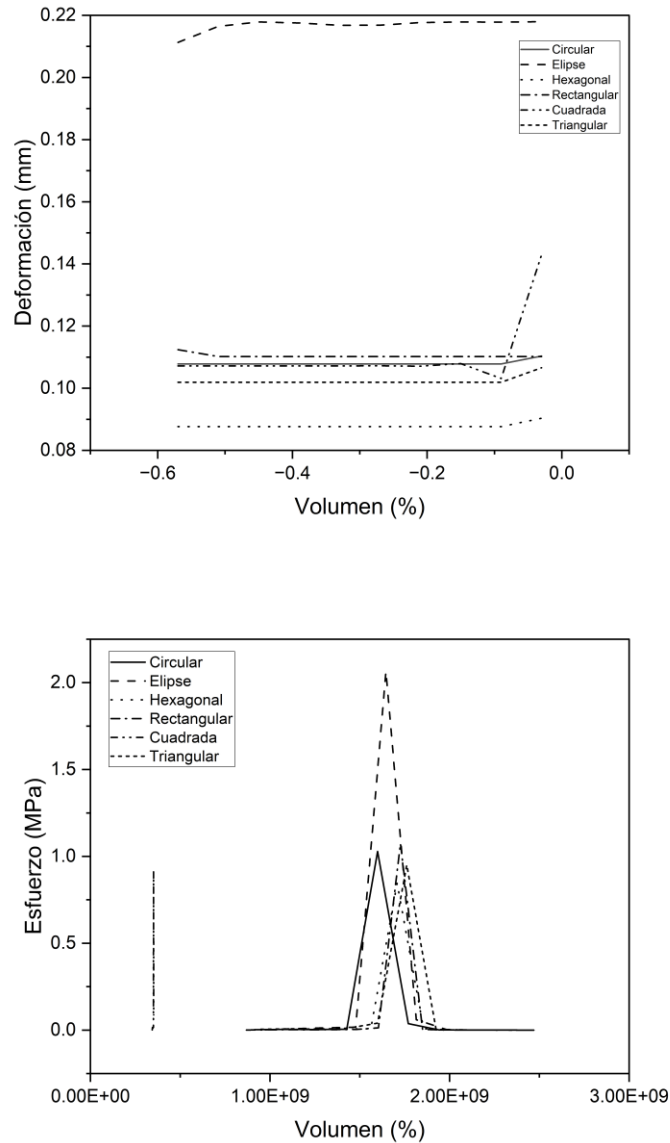


Figura 83. Graficas deformación vs. % volumen y esfuerzo vs. % volumen para las diferentes secciones transversales mediante el modelo de Souza-Auricchio.

4.4.4. Simulación del mecanismo flexible

Los resultados de la simulación estático estructural para el mecanismo flexible se presentan en la figura 84. Donde se observan los desplazamientos, ver la figura 84 a), con un valor máximo de 15.32 mm y los esfuerzos máximos que se presentan al momento de que el sistema de mecanismo de cambio (alambres con memoria de forma) generan los desplazamientos para modificar la

geometría del mecanismo flexible, como se muestra en la figura 84 b), con un valor de 37.382 MPa como valor máximo.

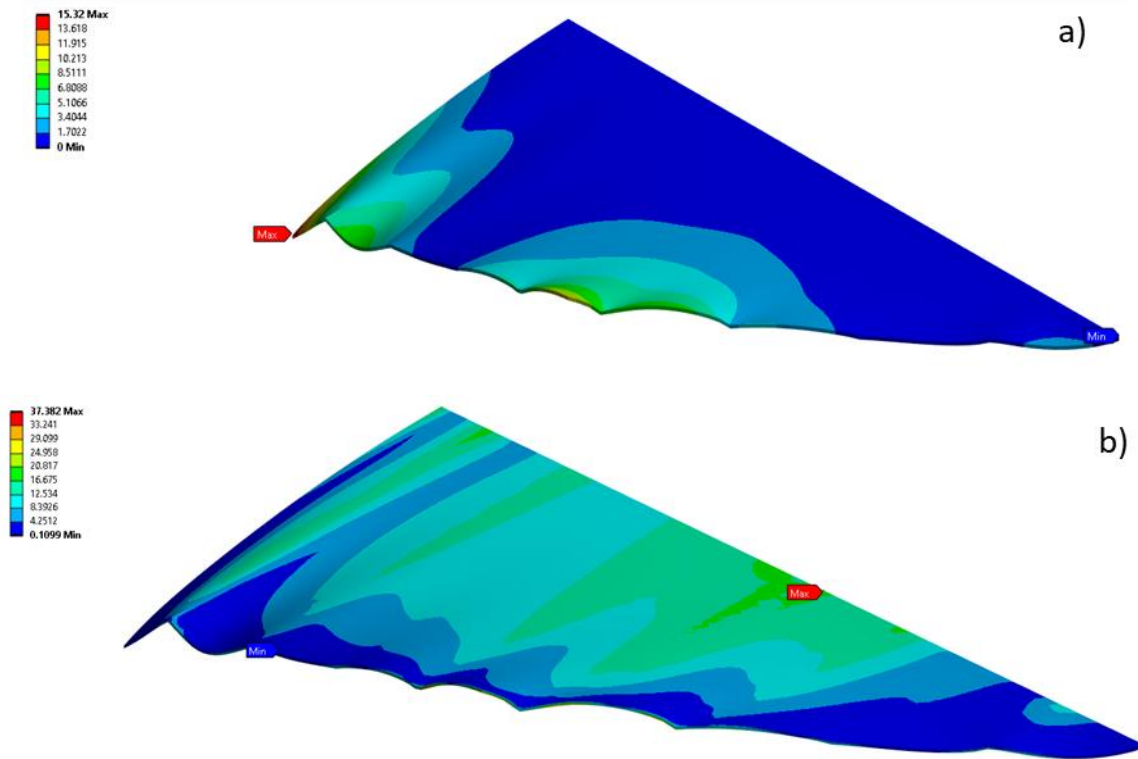


Figura 84. a) Deformación (mm), b) esfuerzo (MPa).

La integración del material con memoria de forma, material compuesto conformado por fibra de vidrio y elastómero fueron parámetros considerados al efectuar esta simulación. El valor máximo de desplazamiento fue de 15.32 mm, como se muestra en la figura 84 a).

Comparando los resultados obtenidos de la prueba experimental para el mecanismo flexible, donde se presentó una deformación de 22 mm, como se presentó en la figura 66 y la deformación obtenida mediante simulación, presentada en la figura 84 a), con un valor de 15.32 mm, ambos valores se considera que son similares, la diferencia que se presenta entre ellos es debido a los materiales no lineales utilizados.

4.4.5. Simulación de configuraciones del mecanismo flexible

En la figura 85 se presentan los resultados de las deformaciones para las diferentes configuraciones geométricas para el calibre de alambre 250 μm , 375 μm y 500 μm , respectivamente.

Cada una de las configuraciones generó diferentes desplazamientos respecto a su configuración geométrica y el tipo de calibre de alambre seleccionado.

La configuración con calibre de alambre de 250 μm que presentó mayor deformación fue la de tres y un laminado. Para el calibre de alambre de 375 μm fue la de un laminado y para el calibre de alambre de 500 μm fue la de dos laminados, como se observa en la figura 85.

Con estos resultados obtenidos mediante simulación en ANSYS se tiene un panorama de la configuración geométrica adecuada para cierto tipo de mecanismo flexible y su potencial aplicación. Comparando estos resultados obtenidos en el análisis matemático se tiene que ambos resultados para cada configuración son similares. Los errores que se presentan son debido a fenómenos no lineales.

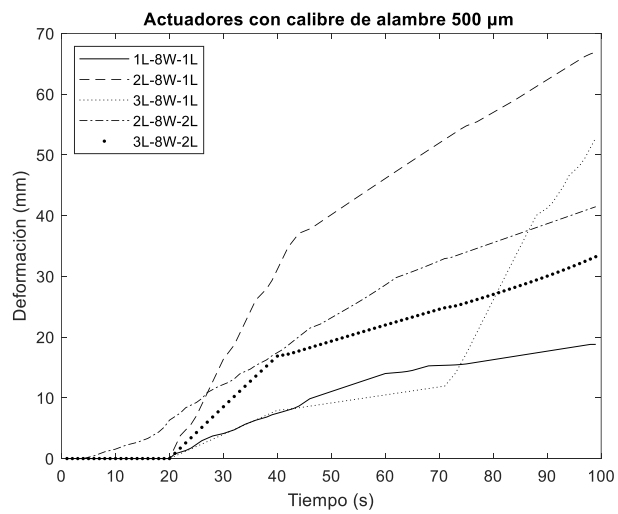
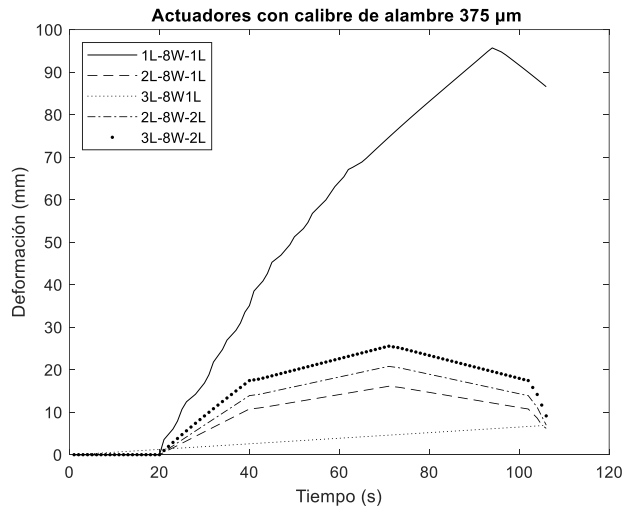
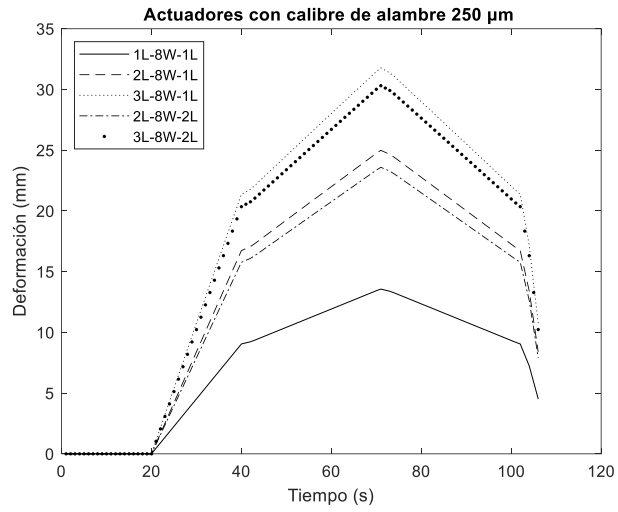


Figura 85. Deformaciones para las diferentes configuraciones de actuadores

4.5. Implementación del mecanismo flexible en VANT

El mecanismo flexible se realizó conforme a las dimensiones del borde de ala original presentado en la figura 29. El modelo final del mecanismo implementando se presenta en la figura 86. En esta se observa el mecanismo flexible, ver la figura 86 a) y el borde de ala remplazado, ver la figura 86 b). Este mecanismo se adecuó para un apropiado funcionamiento.

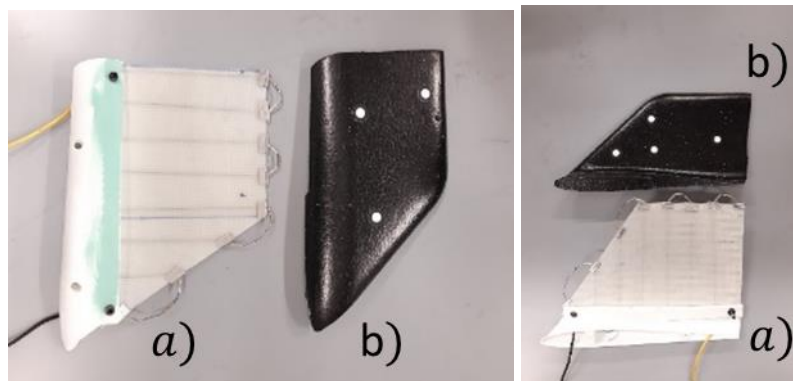


Figura 86. Mecanismo flexible y borde de ala original.

El modelo fabricado que se presentó en la figura 44 para las pruebas en túnel de viento con el mecanismo flexible ya implementado se presenta en la figura 87. En esta figura se observa el modelo final para las pruebas en túnel de viento, así como pruebas de actuación.



Figura 87. Implementación del mecanismo flexible en el modelo del VANT.

Este modelo se modificó para el funcionamiento del mecanismo flexible, como se mostró en la figura 45. La metodología de manufactura mediante impresión 3D fue adecuada debido a la reducción de tiempos y costo de manufactura para su desarrollo.

La implementación del mecanismo flexible en el modelo del VANT de la figura 87 presento retos como lo son diseñar un método de sujeción adecuada para el mecanismo. Diseñar un sistema de aislamiento térmico en las conexiones con los alambres con memoria de forma. Sin embargo, la implementación de este mecanismo se considera, que fue adecuada, ya que el presente trabajo es pionero en realizarse en la institución educativa.

4.6. Simulación de dinámica de fluidos computacional del mecanismo

Después de realizar las simulaciones en CFD mediante ANSYS Fluent, se analizaron los datos obtenidos para los coeficientes y fuerzas de sustentación y arrastre, presentando como resultados las gráficas de los coeficientes de arrastre y sustentación para el borde ala plano, ver la figura 88. El modelo se simuló a velocidades de 15 m/s y 30 m/s para ángulos de ataque de 0 – 15 °. Las gráficas de fuerza de sustentación y arrastre para el borde plano se presentan en la figura 89, de igual manera para ángulos de ataque de 0 – 15 ° y velocidades de 15 m/s y 30 m/s.

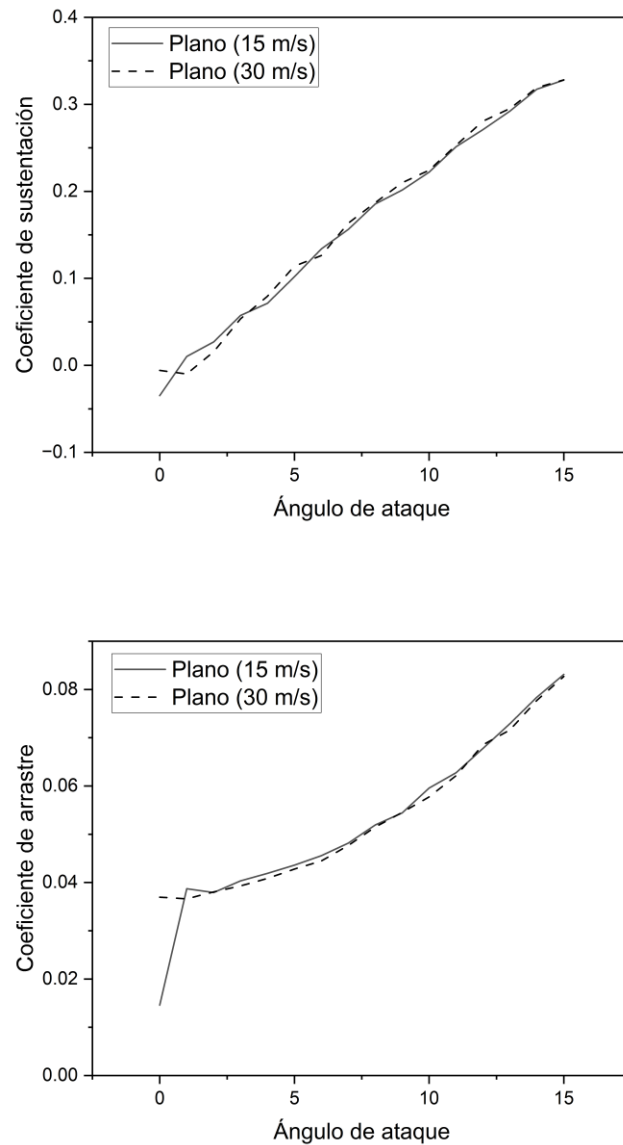


Figura 88. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde plano.

Los coeficientes para el borde plano son similares a velocidades de 15 m/s y 30 m/s, por ejemplo, se muestran mejoras en el coeficiente de sustentación para un ángulo de 5° para una velocidad de 30 m/s, ver la figura 88. El coeficiente de arrastre presenta una reducción para la velocidad de 30 m/s respecto de la 15 m/s.

La relación L/D para el borde plano a las dos velocidades obtenida se presenta en la figura 93.

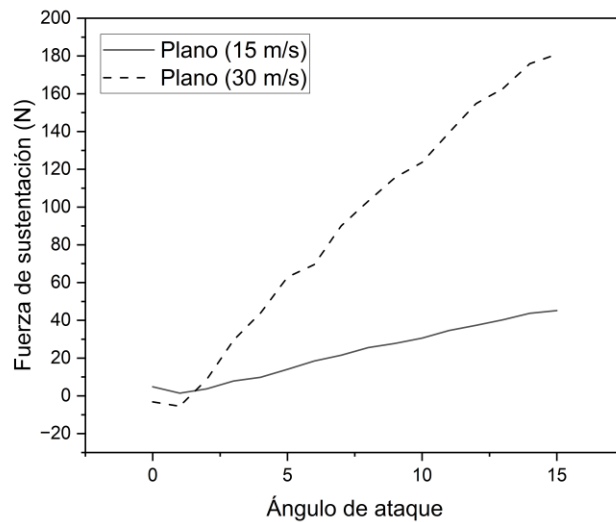
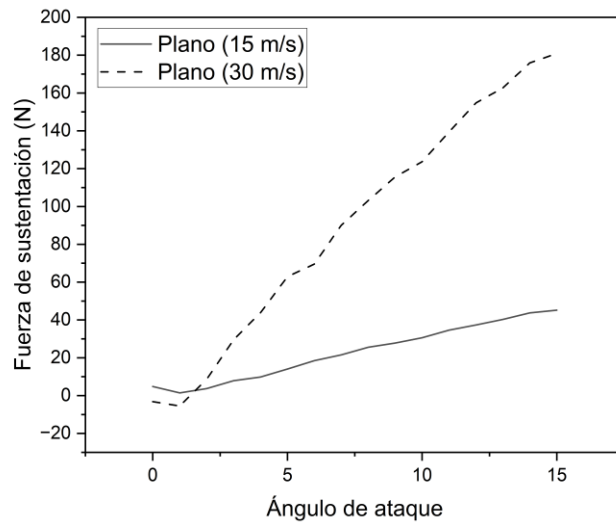


Figura 89. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde plano.

Se presentan incrementos de las fuerzas de sustentación y arrastre para velocidades de 30 m/s para la simulación del borde plano, como se observa en la figura 89.

Las gráficas de coeficiente de sustentación y arrastre vs ángulo de ataque para el borde original del VANT se presentan en la figura 91. Las gráficas de fuerza de sustentación y arrastre, ver la figura 90, también se presenta la relación L/D en la figura 92.

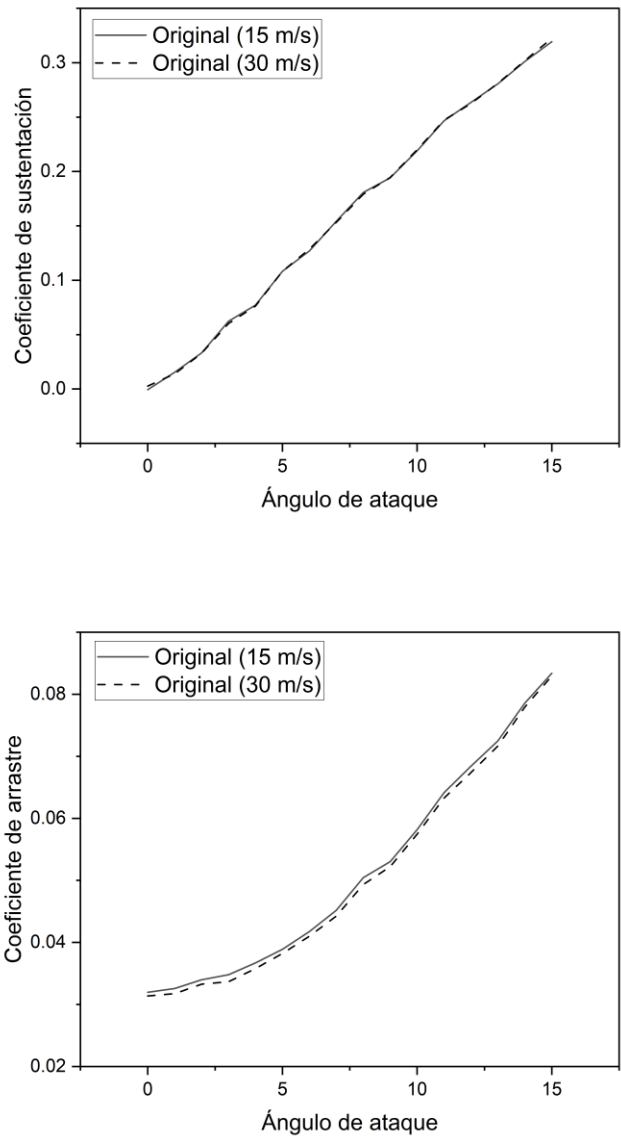


Figura 90. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde original.

En la figura 90 se presenta las gráficas de coeficientes de sustentación y arrastre para el borde de ala original de la aeronave no tripulada, se observa que los coeficientes para la velocidad de 30 m/s son menores respecto de la de 15 m/s.

La figura 91 presenta las gráficas de fuerza de sustentación y arrastre para el borde original del VANT, el comportamiento es similar como en las gráficas de fuerza de sustentación y arrastre para

el borde plano, como se presentó en la figura 89. Las fuerzas incrementan con el aumento del ángulo de ataque.

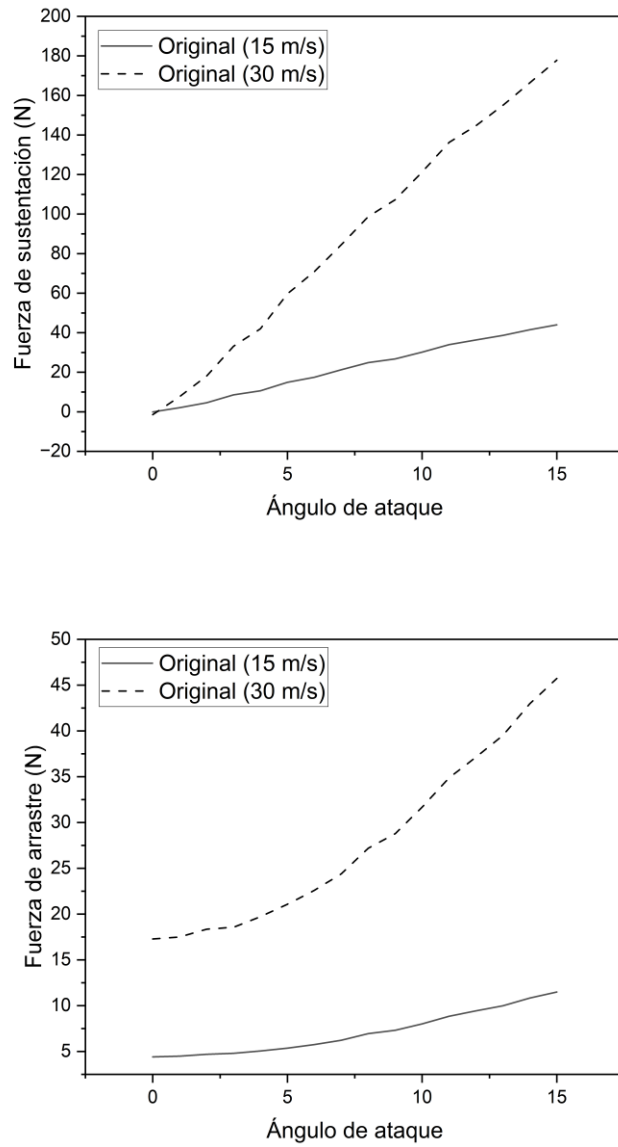


Figura 91. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para borde original.

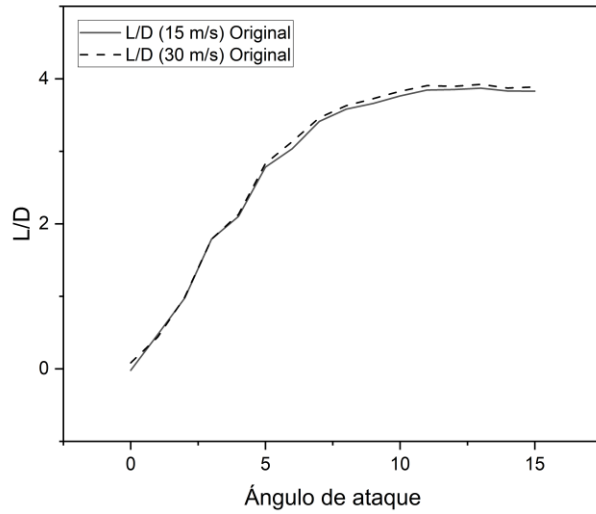


Figura 92. Relación L/D para borde original.

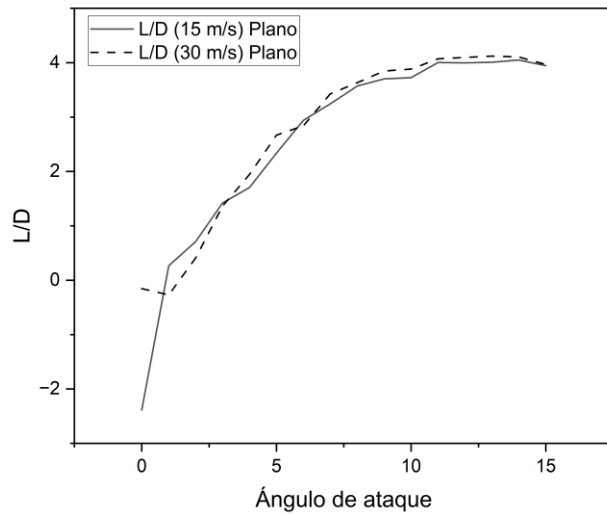


Figura 93. Relación L/D para borde plano.

Las gráficas de coeficiente de sustentación y arrastre para el mecanismo flexible se presentan en la figura 94. En la figura 95 se observa las gráficas fuerza de sustentación y arrastre para el mecanismo flexible. La gráfica de relación L/D se observa en la figura 96 para la implementación del actuador.

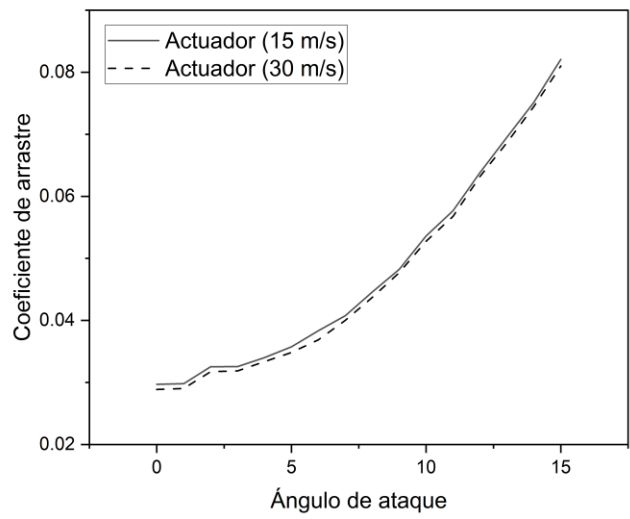
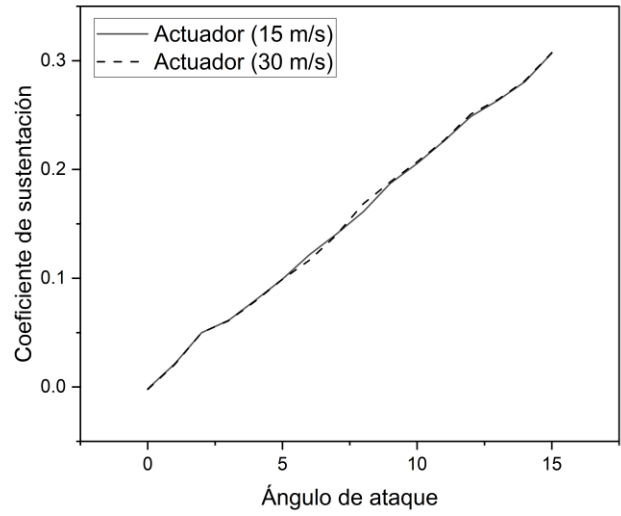


Figura 94. Coeficientes de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para mecanismo flexible.

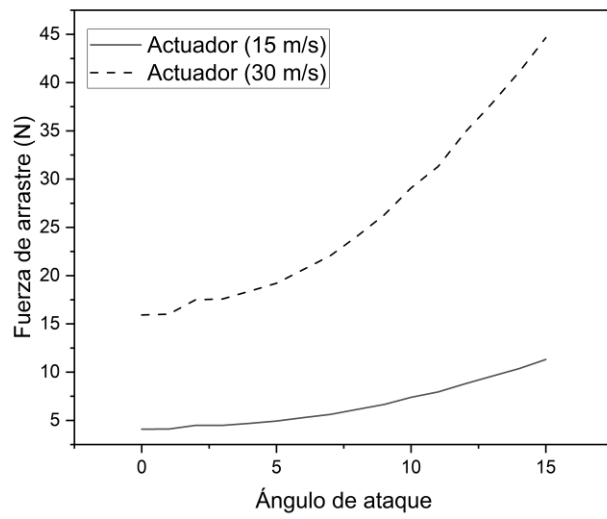
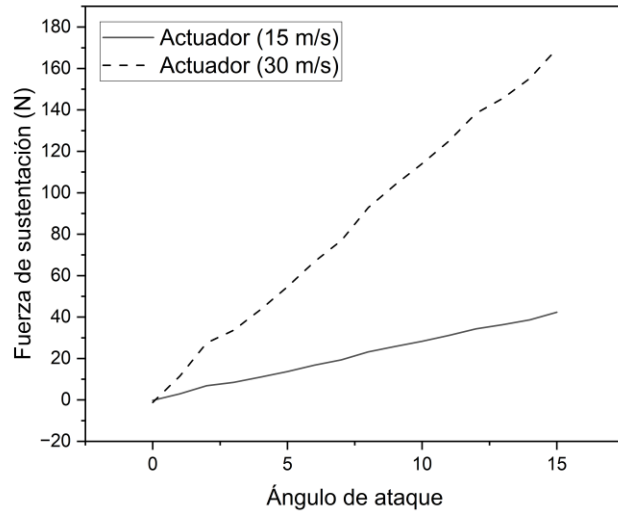


Figura 95. Fuerzas de sustentación y arrastre vs. ángulo de ataque para mecanismo flexible.

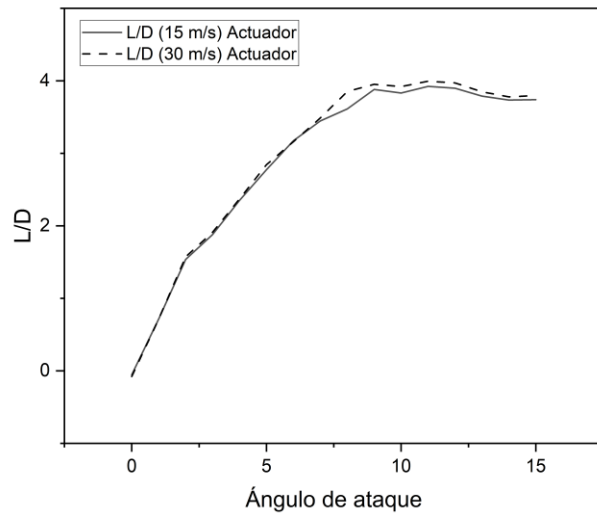


Figura 96. Relación L/D para mecanismo flexible.

La comparación para los coeficientes de sustentación y arrastre para los diferentes bordes se presenta en la figura 97 y figura 98. La comparación de las relaciones L/D para los diferentes bordes, ver la figura 99.

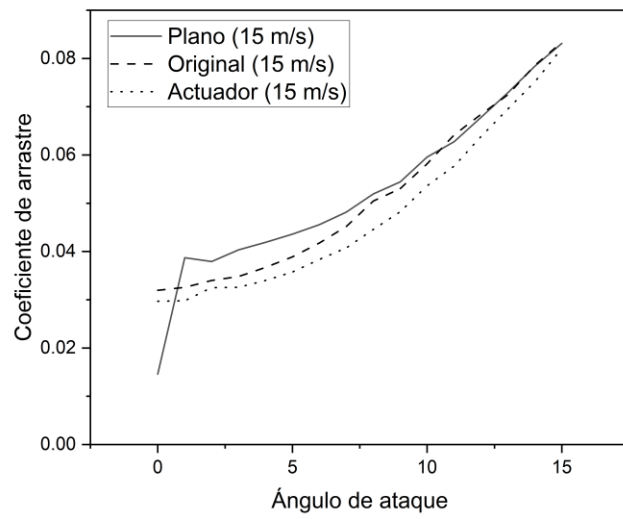
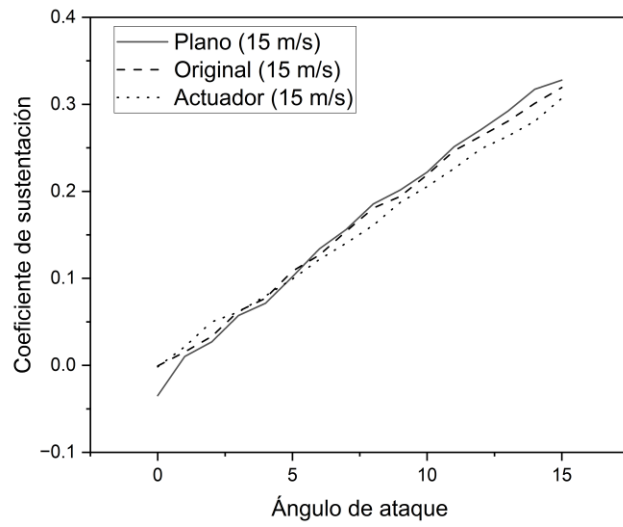


Figura 97. Comparación de coeficientes de sustentación y arrastre para los diferentes bordes a 15 m/s.

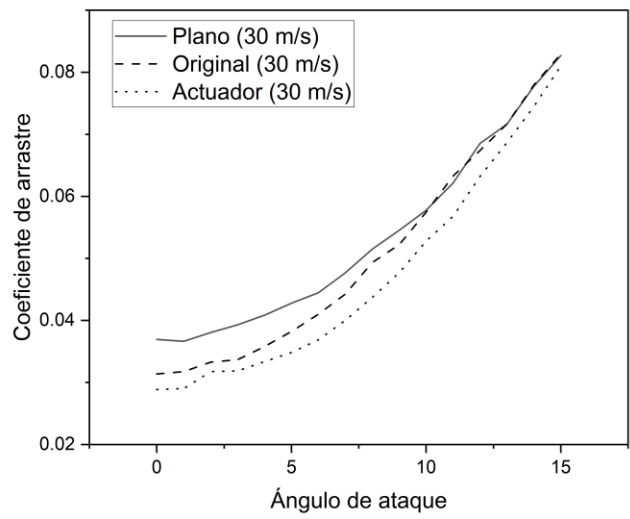
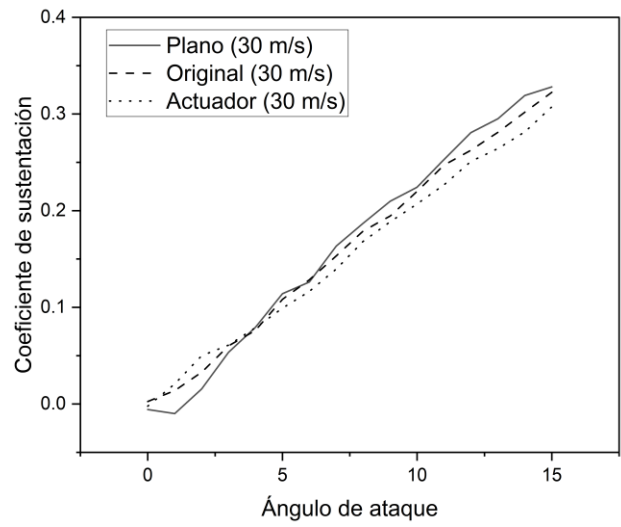


Figura 98. Comparación de coeficientes de sustentación y arrastre para los diferentes bordes a 30 m/s.

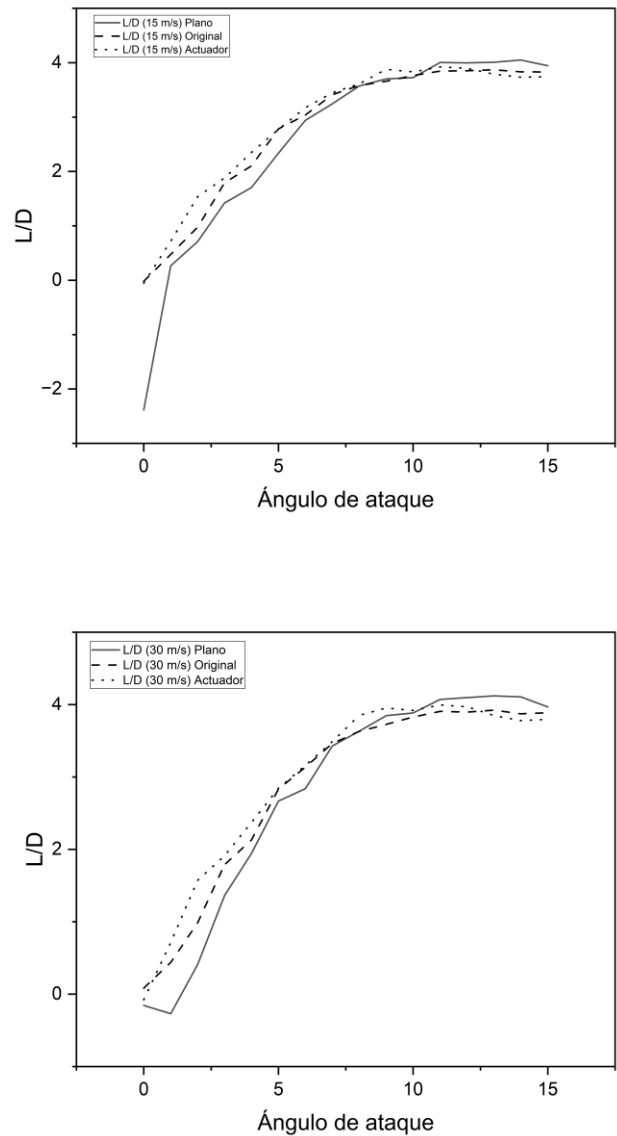


Figura 99. Comparación de relación L/D para los diferentes bordes a 15 m/s y 30 m/s.

Se presentó una mejora de los coeficientes aerodinámicos. Estos se compararon respecto a la geometría de borde de ala original. Una reducción en el coeficiente de sustentación para el borde plano de 1.37 – 8.01 %. La reducción del arrastre fue de 0.22 – 14.11 % respecto a la geometría original.

Para el mecanismo flexible se presentó una reducción en el coeficiente de sustentación de 1.67 – 10.68 %, para el coeficiente de arrastre de 1.56 – 11.64 %. La reducción de estos coeficientes fue para la velocidad de 15 m/s.

La reducción de los coeficientes para la velocidad de 30 m/s presentó una reducción en el coeficiente de sustentación para el borde plano de 1.74 – 11.13 %. La reducción del arrastre fue de 0.30 – 16.75 % respecto a la geometría original.

Respecto a la implementación del mecanismo flexible se presentó una reducción en el coeficiente de sustentación de 1.22 – 9.39 %, para el coeficiente de arrastre de 2.33 – 11.39 %.

En la figura 98 se observa que el borde de actuador es el que presenta una reducción en los coeficientes aerodinámicos, para el coeficiente de sustentación se redujo en un 1.74 – 11.13 % para una velocidad de 15 m/s y 1.22 – 9.39 % para 30 m/s y el coeficiente de arrastre se redujo en un 2.33 – 11.39 % para una velocidad de 15 m/s y 0.3 – 16.75 % para 30 m/s.

Las pruebas para el análisis en túnel de viento no se realizaron debido a que en las instalaciones del laboratorio de aerodinámica cuentan con el equipo, sin embargo, el equipo no se encontraba en funcionamiento al momento de realizar la experimentación para las fechas propuestas. Por lo tanto, esta prueba se pospone para un trabajo futuro.

4.7. Resumen

El proceso de manufactura para el mecanismo flexible implica el desarrollo de herramientas para una adecuada distribución de los alambres y, por lo tanto, así tener los efectos de actuación esperados.

Se investigaron varias metodologías de corte para el material compuesto, determinando la metodología adecuada. La cual no genera daños considerables para este tipo de material.

La determinación de las propiedades mecánicas de la composición del actuador implicó el análisis de varios tipos de configuraciones, se presentaron resultados para tres calibres de alambre experimentados, teniendo así un panorama para la aplicación de cada tipo de alambre embebido en el compuesto híbrido.

Mediante las pruebas térmicas a los sistemas de actuación (alambres con memoria de forma) embebidos y sin ser embebidos en el compuesto híbrido se presenta un panorama de la distribución de las temperaturas en el material compuesto, estos resultados se comparan mediante una simulación en COMSOL.

Mediante las pruebas de actuación físicas se tiene una percepción de cuáles son los desplazamientos generados por el sistema de actuación (alambres de SMA) validando estos resultados experimentales con los datos del proveedor.

Los valores del desplazamiento para el mecanismo se compararon mediante simulación, análisis analítico y pruebas experimentales, presentando valores de desplazamiento para el mecanismo flexible de 22 mm en la prueba experimental de 30 mm para el análisis matemático y 15 mm para la simulación.

La simulación de dinámica de fluidos computacional para los diferentes bordes de ala evaluados presenta reducción en los coeficientes aerodinámicos alrededor del 1 – 12 %. Estos resultados se validarán mediante la prueba en túnel de viento para el borde de ala original y el mecanismo flexible puestos en funcionamiento en el modelo del VANT.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

La implementación de materiales inteligentes aplicados para el desarrollo de mecanismos flexibles presenta retos de diseño, análisis y manufactura debido a los efectos no lineales presentes, sin embargo, también se debe de considerar:

- Se presentó una inadecuada interacción entre el elastómero y la aleación con memoria de forma, donde se producen desplazamientos internos no esperados en el mecanismo flexible por lo tanto se recomienda utilizar otro tipo de elastómero.
- Adecuar un sistema de sujeción para los alambres de SMA.

Se corrobora que la simulación de las propiedades de materiales inteligentes mediante los modelos de Souza-Auricchio y Lagoudas implementados en ANSYS y COMSOL predicen de manera adecuada el comportamiento de estos.

- La simulación de las propiedades de memoria de forma para la aleación NiTi realizada en ANSYS logra predecir de manera adecuada los efectos de superelasticidad, sin embargo, los efectos de memoria de forma no se predicen de manera adecuada, corroborando lo mencionado por otros autores.

El análisis para los diferentes sistemas de actuación realizados en ANSYS y COMSOL presentan un panorama para la selección del sistema de actuación. Prediciendo de esta manera las fuerzas y desplazamientos generados por estos sistemas para su posterior aplicación, así como el análisis para las diferentes configuraciones geométricas mediante simulación y análisis analítico.

El desarrollo del mecanismo flexible para su implementación en el modelo presentó que:

- El desarrollo de la metodología para la simulación entre la interacción de los materiales inteligentes propuesta se considera apropiada debido a que predice los desplazamientos con valores cercanos a los resultados experimentales. Esto se comprobó mediante pruebas físicas, presentando valores de 20 mm y 15 mm mediante simulación.

- Se observó que, dependiendo de la configuración geométrica, Las configuraciones que presentan mayores desplazamientos son configuraciones con solo un laminado para los tres diferentes calibres de alambre. A mayor número de laminados, mayor resistencia al esfuerzo flexural y a menor número de laminados, mayores desplazamientos.
- Una configuración mínima de laminados no brinda la suficiente rigidez al actuador y, por lo tanto, los efectos de aeroelasticidad serán mayores.
- La simulación de CFD demostró una reducción en los coeficientes aerodinámicos del modelo, validando de esta manera que el desarrollo del mecanismo como ala flexible redujo los coeficientes aerodinámicos.
- El desarrollo del mecanismo flexible logró las deflexiones necesarias para reducir los coeficientes aerodinámicos. Por lo tanto, este tipo de mecanismos tiene potenciales aplicaciones como sistemas de actuación en diferentes ámbitos de la ingeniería.

5.1. Trabajo futuro

En este apartado se proponen algunas rutas de investigación para la aplicación de este tipo de mecanismos, así como otras propuestas que involucran a los materiales inteligentes.

- Realizar las pruebas de túnel del viento con la implementación del mecanismo flexible, para validar los resultados de simulación en CFD.
- Diseñar un método de sujeción adecuado para los alambres con memoria de forma embebidos en el material
- Sustituir la matriz del compuesto híbrido (elastómero) por otro tipo de material inteligente.
- Implementar este tipo de actuador en otras secciones del ala de la aeronave realizando un tipo de transformación largo.
- Desarrollar un mecanismo con estructura interna de panal de abeja actuado por alambres con memoria de forma.
- Realizar un análisis de fatiga para el mecanismo flexible, determinando su vida útil.
- Realizar análisis de frecuencias naturales para el mecanismo flexible para determinar los efectos de flutter debido a su implementación.
- Realizar un análisis de turbulencia.
- Realizar un estudio de interacción fluido estructura (FSI).
- Desarrollar robots flexibles y estructuras inteligentes para aplicaciones aeroespaciales.
- Desarrollar dispositivos biomédicos para simulación de cirugías.

Referencias bibliográficas

- [1] Villanueva AA, Joshi KB, Blottman JB, Priya S. A bio-inspired shape memory alloy composite (BISMAC) actuator. *Smart Mater Struct* 2010;19:025013. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/2/025013>.
- [2] Concilio A, Dimino I, Lecce L, Pecora R. *Morphing Wing Technologies: Large Commercial Aircraft and Civil Helicopters*. vol. 1. First Edition. Butterworth-Heinemann; 2018.
- [3] Bhaskar J, Kumar Sharma A, Bhattacharya B, Adhikari S. A review on shape memory alloy reinforced polymer composite materials and structures. *Smart Mater Struct* 2020;29. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab8836>.
- [4] Arun D. i, Chakravarthy P, Arockia Kumar R, Santhosh B. *Shape Memory Materials*. 2018.
- [5] Guzik AT, Benafan O. *Design and Development of CubeSat Solar Array Deployment Mechanisms Using Shape Memory Alloys*. Cleveland: NASA; 2018.
- [6] Hartl DJ, Mooney JT, Lagoudas DC, Calkins FT, Mabe JH. Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: II. Experimentally validated numerical analysis. *Smart Mater Struct* 2010;19:015021. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/1/015021>.
- [7] Lagoudas DC. *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. In: Lagoudas DC, editor. *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, vol. 1. First Edition, Texas: Springer; 2008, p. 189–229.
- [8] Merriam EG, Jones JE, Magleby SP, Howell LL. Monolithic 2 DOF fully compliant space pointing mechanism. *Mechanical Sciences* 2013;4:381–90. <https://doi.org/10.5194/ms-4-381-2013>.
- [9] Howell LL. *COMPLIANT MECHANISMS*. 2001.
- [10] Saggere L, Kota S. Static Shape Control of Smart Structures Using Compliant Mechanisms. *American Institute of Aeronautics and Astronautics* 2012;37:572–8. <https://doi.org/10.2514/2.775>.
- [11] Konh B, Honarvar M, Hutapea P. Design optimization study of a shape memory alloy active needle for biomedical applications. *Med Eng Phys* 2015;37:469–77. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.02.013>.

- [12] Veritasium. Why Machines That Bend Are Better n.d.
- [13] Henning S, Linß S, Gräser P, Theska R, Zentner L. Non-linear analytical modeling of planar compliant mechanisms. *Mech Mach Theory* 2021;155:104067. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMACHTHEORY.2020.104067>.
- [14] Chu L, Li Q, Gu F, Du X, He Y, Deng Y. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review. *Chinese Journal of Aeronautics* 2022;35:220–46. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.09.013>.
- [15] Chu L, Li Q, Gu F, Du X, He Y, Deng Y. Design, modeling, and control of morphing aircraft: A review. *Chinese Journal of Aeronautics* 2022;35:220–46. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.09.013>.
- [16] Ajaj RM, Parancheerivilakkathil MS, Amoozgar M, Friswell MI, Cantwell WJ. Recent developments in the aeroelasticity of morphing aircraft. *Progress in Aerospace Sciences* 2021;120:100682. <https://doi.org/10.1016/J.PAEROSCI.2020.100682>.
- [17] Grigorie TL, Botez RM. Control Techniques for a Smart Actuated Morphing Wing Model: Design, Numerical Simulation and Experimental Validation. *Morphing Wing Technologies*, Elsevier; 2018, p. 351–97. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100964-2.00012-5>.
- [18] Han MW, Rodrigue H, Kim H II, Song SH, Ahn SH. Shape memory alloy/glass fiber woven composite for soft morphing winglets of unmanned aerial vehicles. *Compos Struct* 2016;140:202–12. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.12.051>.
- [19] Sun J, Guan Q, Liu Y, Leng J. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. *J Intell Mater Syst Struct* 2016;27:2289–312. <https://doi.org/10.1177/1045389X16629569>.
- [20] Wang W, Rodrigue H, Ahn S-H. Smart soft composite actuator with shape retention capability using embedded fusible alloy structures. *Compos B Eng* 2015;78:507–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.007>.
- [21] Rodrigue H, Wang W, Bhandari B, Han MW, Ahn SH. SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation. *Compos B Eng* 2015;82:152–8. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2015.08.020>.

- [22] Rodrigue H, Cho S, Han MW, Bhandari B, Shim JE, Ahn SH. Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of UAV. *Journal of Mechanical Science and Technology* 2016;30:229–36. <https://doi.org/10.1007/s12206-015-1226-3>.
- [23] Lagoudas DC. *Shape Memory Alloys*. vol. 1. Boston, MA: Springer US; 2008. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>.
- [24] Concilio A, Antonucci V, Auricchio F, Lecce L, Sacco E. *Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural, and Biomedical Applications*. Elsevier; 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819264-1.01001-3>.
- [25] Mayergoyz ID. *Mathematical Models of Hysteresis and their Applications*. vol. 1. First Edition. Elsevier Inc.; 2003. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-480873-7.X5000-2>.
- [26] El Naggar A, Youssef MA. Shape memory alloy heat activation: State of the art review. *AIMS Mater Sci* 2020;7:836–58. <https://doi.org/10.3934/matensci.2020.6.836>.
- [27] Chen K. NiTi - Magic or Phase Transformation? *Proceedings of the ASEE Annual Conference & Exposition: Nashville, TN 2003*.
- [28] Yamamuchi K., Ohkata I., Tsuchiya K., Miyazaki S. *Shape memory and superelastic alloys Technologies and applications*. CRC Press; 2010.
- [29] Benafan O. *Shape Memory Alloys – Not Your Ordinary Metal*, 2020.
- [30] Kumar PK, Lagoudas DC. Introduction to Shape Memory Alloys. *Shape Memory Alloys* 2008:1–51. https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8_1.
- [31] Kim NG, Han MW, Iakovleva A, Park H Bin, Chu WS, Ahn SH. Hybrid composite actuator with shape retention capability for morphing flap of unmanned aerial vehicle (UAV). *Compos Struct* 2020;243:112227. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112227>.
- [32] Mohammad S, University of Kentucky. *FINITE ELEMENT MODELING AND FABRICATION OF AN SMA-SMP SHAPE MEMORY COMPOSITE ACTUATOR SMP SHAPE MEMORY COMPOSITE ACTUATOR*. 2014.
- [33] *Ciencia e Ingeniería de los Materiales (3ª ed.)* Spanish by ASKELAND, DONALD R. (z-lib.org) n.d.
- [34] *Topics in Hyperelasticity - ANSYS Innovation Courses* n.d. <https://courses.ansys.com/index.php/courses/topics-in-hyperelasticity-using-ansys-mechanical/> (accessed April 9, 2023).

- [35] Kim H, Lee J-Y, Chu W-S, Ahn S. Design and Fabrication of Soft Morphing Ray Propulsor: Undulator and Oscillator. *Soft Robot* 2017;4 1:49–60.
- [36] Wang W, Lee JY, Rodrigue H, Song SH, Chu WS, Ahn SH. Locomotion of inchworm-inspired robot made of smart soft composite (SSC). *Bioinspir Biomim* 2014;9. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/4/046006>.
- [37] de la Flor S. Modelos constitutivos para las aleaciones con memoria de forma NiTi: Análisis e implementación numérica n.d.
- [38] Auricchio F. A robust integration algorithm for a finite strain shape memory alloy superelastic model. *Int J Plast* 2001;17:971–90. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00050-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00050-4).
- [39] Auricchio F, Petrini L. Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations. *Int J Numer Methods Eng* 2002;55:1255–84. <https://doi.org/10.1002/NME.619>.
- [40] Woodworth LA, Wang X, Lin G, Kaliske M. A multi-featured shape memory alloy constitutive model incorporating tension–compression asymmetric interpolation. *Mechanics of Materials* 2022;172:104392. <https://doi.org/10.1016/J.MECHMAT.2022.104392>.
- [41] Padula SI, Creager C. Shape Memory Alloy (SMA) Tires - A New Paradigm in Tire Performance 2018.
- [42] Hartl DJ, Lagoudas DC. Thermomechanical Characterization of Shape Memory Alloy Materials. *Shape Memory Alloys* 2008:53–119. https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8_2.
- [43] Auricchio F, Taylor RL, Lubliner J. Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Comput Methods Appl Mech Eng* 1997;146:281–312. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(96\)01232-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(96)01232-7).
- [44] Chapter 40: Shape Memory Alloy (SMA) with Thermal Effect n.d. https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v231/en/wb_wbtec/WBtecsmate.html?q=shape%20memory%20alloy (accessed April 9, 2023).
- [45] Karakalas A. Educational Notes on Modeling of SMA Torsion/Torque Tubes with ABAQUS Finite Element Software. 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12389.14567>.

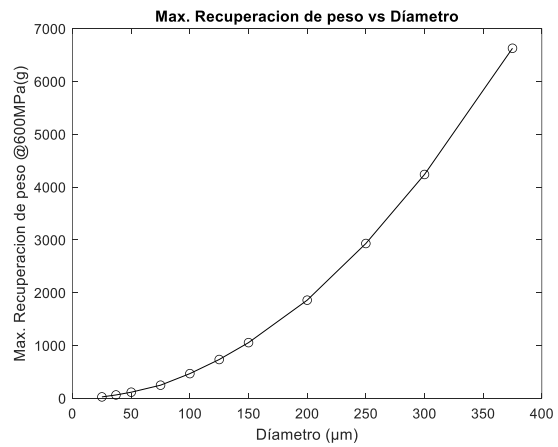
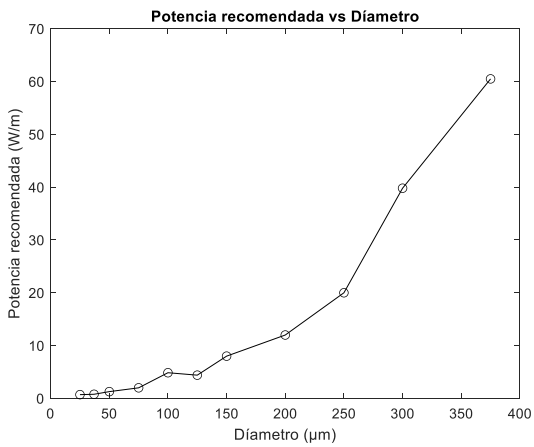
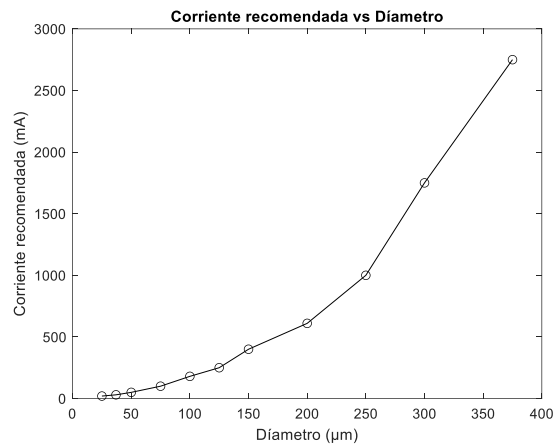
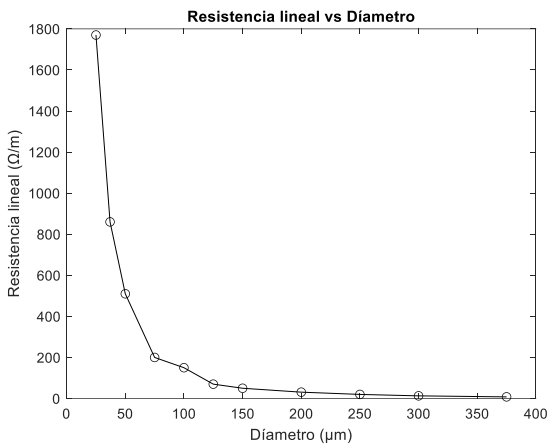
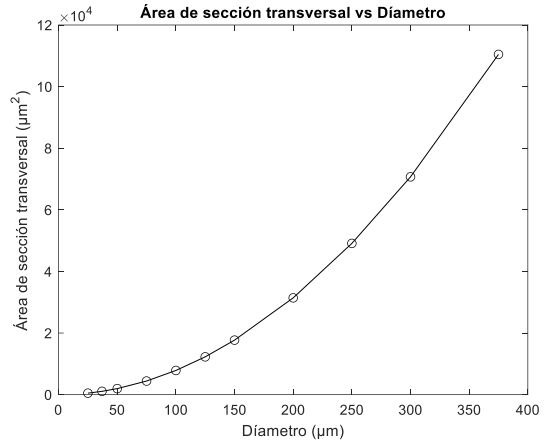
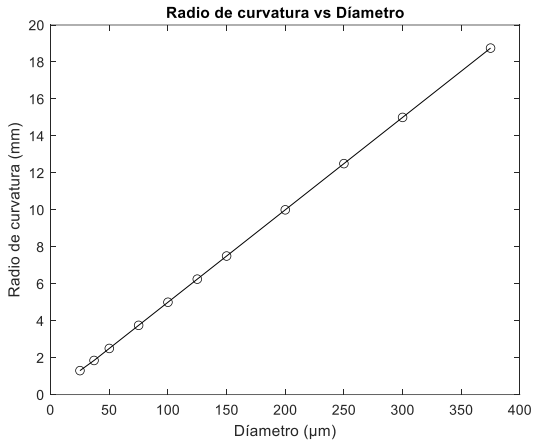
- [46] César Hilário J, Braz-Cesar M, Andrade C, Silva Borges A. Matlab® Algorithm to Simulate the Dynamic Behavior of an NiTi Alloy through Ansys® APDLTM Models. *KnE Engineering* 2020;88–102–88–102. <https://doi.org/10.18502/keg.v5i6.7024>.
- [47] Chemisky Y, Duval A, Piotrowski B, Ben Zineb T, Tahiri V, Patoor E. Numerical tool for SMA material simulation: application to composite structure design. *Smart Mater Struct* 2009;18:104012. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/10/104012>.
- [48] Thiebaud F, Collet M, Foltete E, Lexcellent C. Implementation of a multi-axial pseudoelastic model to predict the dynamic behavior of shape memory alloys. *Smart Mater Struct* 2007;16:935–47. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/4/001>.
- [49] Barrett P, Fridline D. User Implemented Nitinol Material Model in ANSYS Shape Memory Alloy Unique Behavior User Materials in ANSYS 2004.
- [50] Terriault P, Viens F, Brailovski V. Non-isothermal finite element modeling of a shape memory alloy actuator using ANSYS. *Comput Mater Sci* 2006;36:397–410. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.05.010>.
- [51] Alazzawi S, Filip P. Modeling the transient behavior of the NiTi shape memory actuator using finite element analysis: Parametric study of the rate effects. *Results in Materials* 2019;1:100015. <https://doi.org/10.1016/J.RINMA.2019.100015>.
- [52] Khodaei H, Terriault P. Experimental validation of shape memory material model implemented in commercial finite element software under multiaxial loading. *J Intell Mater Syst Struct* 2018;29:2954–65. <https://doi.org/10.1177/1045389X18781047>.
- [53] Guan P, Zhang Y, Cui D. Tensile test of shape memory alloys and numerical simulation. *Adv Mat Res*, vol. 710, 2013, p. 13–6. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.710.13>.
- [54] McCummiskey E, Dempster WM, Nash DH, Ashton TR, Stevenson DG. The Determination and Evaluation of Nitinol Constitutive Models for Finite Element Analysis. *Applied Mechanics and Materials* 2007;7–8:81–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.7-8.81>.
- [55] Tomar R, Singh Parihar H. Static Analysis of the Effect of Shape Memory Alloy in Laminated Beamin 2. vol. 12. 2021.
- [56] Tirmizi S, Shen X. Finite Element Analysis, Simulation and Experimental Investigation for Epoxy Laminated Lattice Structure Embedded with SMA Wires. *Applied Mechanics and*

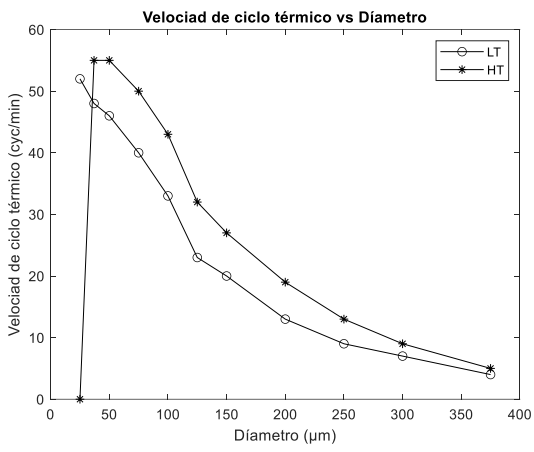
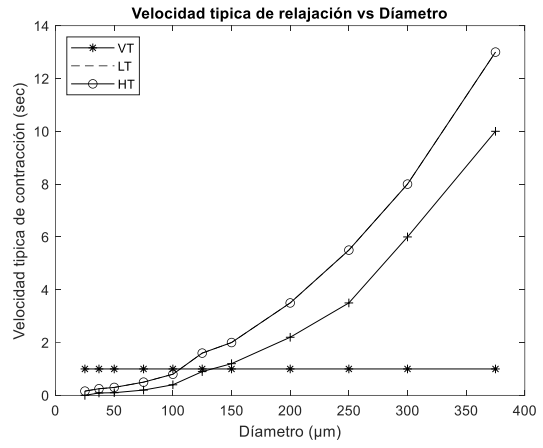
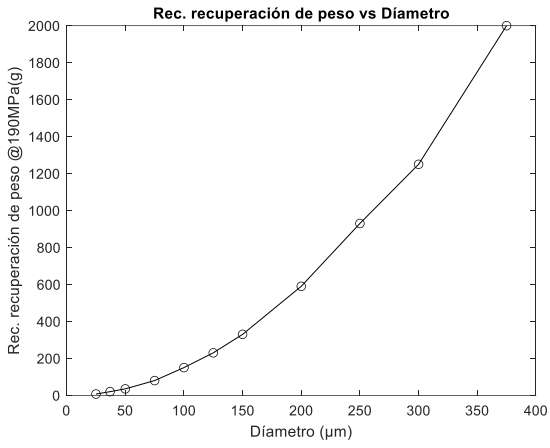
- Materials 2011;148–149:1413–8. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.148-149.1413>.
- [57] Mohammad H. Elahinia. Shape Memory Alloy Actuators, Design, Fabrication, and Experimental Evaluation. vol. 1. First Edition. Toledo, OH, USA: Wiley; 2016.
- [58] Han MW, Kim MS, Ahn SH. Shape memory textile composites with multi-mode actuations for soft morphing skins. *Compos B Eng* 2020;198:108170. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108170>.
- [59] Ostachowicz W, Krawczuk M, Zak A. Natural frequencies of a multilayer composite plate with shape memory alloy wires. *Finite Elements in Analysis and Design* 1999;32:71–83. [https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(98\)00076-6](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(98)00076-6).
- [60] Song S-H, Lee J-Y, Rodrigue H, Choi I-S, Kang YJ, Ahn S-H. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode OPEN 2016. <https://doi.org/10.1038/srep21118>.
- [61] Villanueva AA, Joshi KB, Blottman JB, Priya S. A bio-inspired shape memory alloy composite (BISMAC) actuator. *Smart Mater Struct* 2010;19. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/2/025013>.
- [62] Ashir M, Hahn L, Kluge A, Nocke A, Cherif C. Development of innovative adaptive 3D Fiber Reinforced Plastics based on Shape Memory Alloys. *Compos Sci Technol* 2016;126:43–51. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2016.02.009>.
- [63] Ashir M, Vorhof M, Nocke A, Cherif C. Shape-variable adaptive fiber-reinforced plastics based on shape memory alloy hybrid yarns. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2018;460:012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/460/1/012002>.
- [64] Lateş D, Căşvean M, Moica S. Fabrication Methods of Compliant Mechanisms. *Procedia Eng* 2017;181:221–5. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.02.377>.
- [65] Howell LL. *Compliant Mechanisms*. vol. 1. First Edition. John Wiley & Sons, Inc.; 2001.
- [66] Dynalloy Inc, Flexinol. Flexinol Actuator Wire Technical and Design Data 2023:1–12. <https://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf> (accessed September 25, 2023).
- [67] 7725 n.d.
- [68] Hao Y, Zhang S, Fang B, Sun F, Liu H, Li H. A Review of Smart Materials for the Boost of Soft Actuators, Soft Sensors, and Robotics Applications. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)* 2022;35. <https://doi.org/10.1186/S10033-022-00707-2>.

- [69] Smooth-On. Ecoflex Series TB 2023:1–2. <https://www.smooth-on.com/products/ecoflex-00-10/> (accessed September 26, 2023).
- [70] FPV Flying Wing. n.d.
- [71] Schrooten J, Michaud V, Parthenios J, Psarras G, Galiotis C, Gotthardt R, et al. Progress on Composites with Embedded Shape Memory alloy Wires. *Mater Trans* 2002;43:961–73. <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.961>.
- [72] Song SH, Lee H, Lee JG, Lee JY, Cho M, Ahn SH. Design and analysis of a smart soft composite structure for various modes of actuation. *Compos B Eng* 2016;95:155–65. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2016.03.087>.
- [73] Daniel IM, Ishai Ori. *Engineering mechanics of composite materials*. Oxford University Press; 2006.
- [74] International Standard, ASTM D 790-03. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International; 2003.
- [75] Hassan Falah Abdulkadhim AFH. 2-D Actuator based Shape Memory Alloy using PID controller n.d.
- [76] Theodore AJ, Bishay PL. Experimental analysis of fiber-reinforced laminated composite plates with embedded SMA wire actuators. *Compos Struct* 2022;292. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115678>.
- [77] Thompson MK, Thompson JM. *ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis*. n.d.
- [78] Shape Memory Alloy n.d. https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.sme/sme_ug_solid.07.10.html (accessed April 9, 2023).
- [79] International A, indexed by mero files. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1*. 2003.

Anexos

Anexo 1. Propiedades Nitinol





Anexo 2. Propiedades mecánicas material compuesto

Propiedad	Valor
Densidad	1624 Kg/m^3
Elasticidad ortotrópica	
Módulo de Young X	34190 MPa
Módulo de Young Y	0.9283 MPa
Módulo de Young Z	0.9283 MPa
Relación de Poisson XY	0.254
Relación de Poisson YZ	0.254
Relación de Poisson XY	0.254
Módulo de corte XY	13620 MPa
Módulo de corte YZ	0.374 MPa
Módulo de corte XZ	0.374 MPa
Límites ortótropicas de esfuerzo	
Tensión X	4500 MPa
Tensión Y	0.81 MPa
Tensión Z	0.81 MPa
Compresión X	0
Compresión Y	0
Compresión Z	0
Cortante XY	73 MPa
Cortante YZ	2.671 MPa
Cortante XZ	2.671 MPa
Constantes Tsai-Wu	
Coficiente XY	- 1
Coficiente YZ	- 1
Coficiente XZ	- 1

Anexo 3. Propiedades Nitinol para simulación en ANSYS

Tabla 7. Propiedades físicas de la aleación de Nitinol.

Propiedad	Valor
Densidad	6450 Kg/m^3
Calor específico	0.2 $Cal/g^{\circ}C$
Punto de fusión	1300 $^{\circ}C$
Calor latente de transformación	5.78 Cal/g
Conductividad térmica	0.18 $W/cm^{\circ}C$
Coeficiente de expansión térmica	
Martensita	$6.6 \times 10^{-6}^{\circ}C$
Austenita	$11 \times 10^{-6}^{\circ}C$
Relación de Poisson	0.33
Resistividad eléctrica	
Martensita	80 <i>micro – ohms</i>
Austenita	100 <i>micro – ohms</i>

Tabla 8. Propiedades de memoria de forma y superelasticidad para simulación en ANSYS.

Propiedad	Valor
Densidad	6450 Kg/m^3
Elasticidad isotrópica	
Módulo de Young	28000 MPa
Relación de Poisson	0.33
Efecto de memoria de forma	
Parámetro de endurecimiento	345 MPa
Temperatura de referencia	68 $^{\circ}C$
Límite elástico	138 MPa
Temperatura de escalado de temperatura	17.25 $MPa/^{\circ}C$
Deformación máxima de transformación	6 %
Módulo de Young Martensita	75000 MPa
Parámetro de dependencia de carga	0
Superelasticidad	
Sigma SAS	520 MPa
Sigma FAS	600 MPa
Sigma SSA	300 MPa
Sigma FSA	200 MPa
Épsilon	6 %
Alpha	0
ϵ_S	28000 MPa

Anexo 4. Propiedades Ni-Ti para simulación en COMSOL

Tabla 9. Propiedades Nitinol para el modelo de Lagoudas en COMSOL [62].

Parámetro	Símbolo	Valor
Temperatura de referencia	T_0	63°C
Relación de Poisson	γ	0.33
Densidad	ρ	6450 Kg/m^3
Módulo de Young		
	Austenita	E_A 28 GPa
	Martensita	E_M 75 GPa
Capacidad calorífica a temperatura constante		
	Austenita	C_{PA} 0.32 $Joule/g^{\circ}C$
	Martensita	C_{PM} 0.32 $Joule/g^{\circ}C$
Temperatura de inicio		
	Austenita	A_{ST} 42 °C
	Martensita	M_{ST} 68°C
Temperatura final		
	Austenita	A_{FT} 52°C
	Martensita	M_{FT} 78°C
Pendiente de la curva limite		
	Austenita	C_A 7.4 $e^6 Pa/K$
	Martensita	C_M 7.4 $e^6 Pa/K$
Deformación máxima de transformación	ε_{TMAX}	0.06
Deformación inicial de transformación	ε_{TINC}	0.06
Deformación de transformación ultima	$\varepsilon_{T E-A}$	0
Esfuerzo critico	ν_{CRIT}	6630 MPa
Exponente de saturación	K	0

Tabla 10. Propiedades Nitinol para el modelo de Auricchio en COMSOL [51].

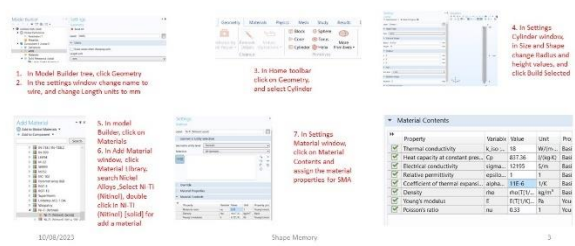
Parámetro		Símbolo	Valor
Relación de Poisson		γ	0.33
Densidad		ρ	6500 Kg/m^3
Módulo de Young	Austenita	E_A	28 GPa
	Martensita	E_M	75 GPa
Temperatura final	Martensita	M_{FT}	78
Pendiente de la curva limite		β	0
Deformación máxima de transformación		$\varepsilon_{T_{MAX}}$	5
Esfuerzo de fluencia inicial		σ_{yst}	138 MPa
Módulo de endurecimiento		H_K	345 MPa
Indicador de función de coeficiente		T	0

Anexo 5. Metodología para simulación de SMA en COMSOL

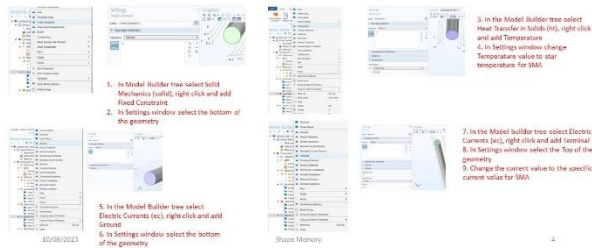
Simulation by Joule heating and thermal expansion Type study and physics



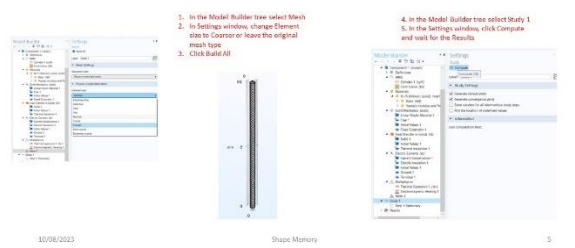
Simulation by Joule heating and thermal expansion Geometry and material



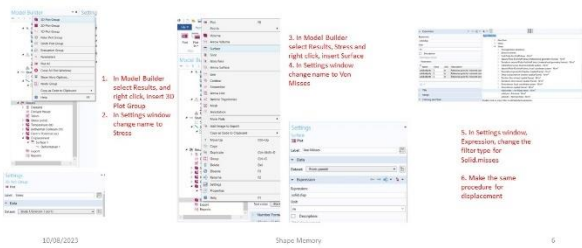
Simulation by Joule heating and thermal expansion Boundary conditions



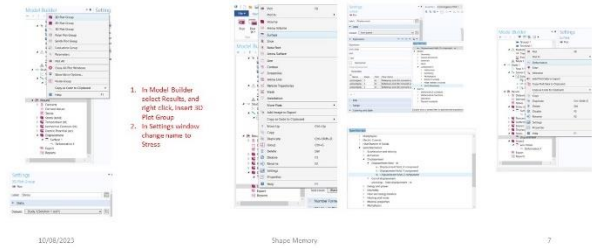
Simulation by Joule heating and thermal expansion Mesh and set up Study



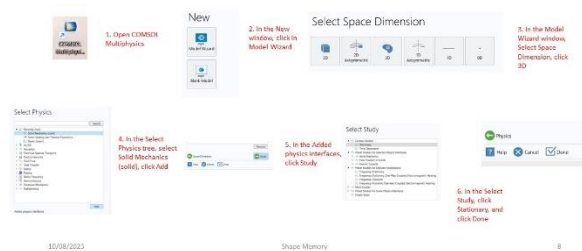
Simulation by Joule heating and thermal expansion Results



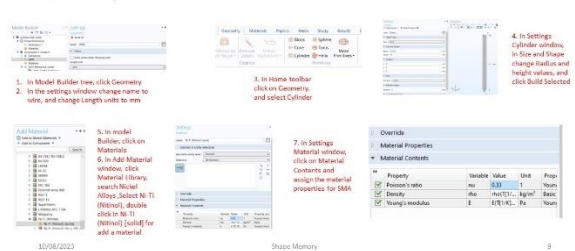
Simulation by Joule heating and thermal expansion Results



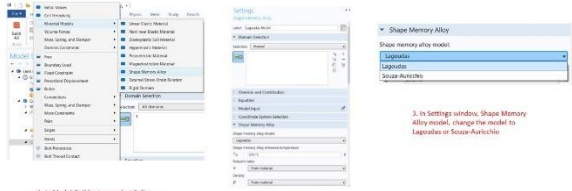
Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio) Type study and physics



Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio) Geometry and Material



Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio)
Select the constitutive model for SMA



1. In Model Builder tree, select Solids, Mechanics, right click, search Material Model and insert Shape Memory Alloy
2. In Settings window, dropdown selection select the all geometry
3. In Settings window, Shape Memory Alloy model, change the model to Lagoudas or Souza Auricchio

Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio)
Material properties for Lagoudas constitutive model

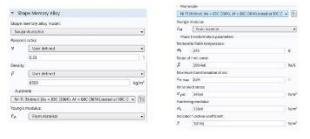


1. In Settings window, Shape Memory Alloy model, change the material properties for shape memory alloy model

Example of material properties for a shape memory alloy

Property	Value	Unit	Symbol
Young's modulus	50	GPa	E
Yield strength	1.0	MPa	σ_y
Transformation temperature	100	°C	T_s
...

Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio)
Material properties for Souza-Auricchio constitutive model



Example of material properties for a shape memory alloy

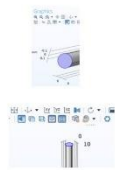
Property	Value	Unit
Young's modulus	50	GPa
Yield strength	1.0	MPa
...

1. In Settings window, Shape Memory Alloy model, change the material properties for shape memory alloy model

Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio)
Boundary conditions



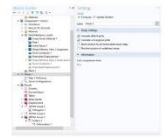
1. In Toolbar select Physics, select Boundaries, and insert Fixed Constraint 1
2. In Settings window select the bottom of the geometry
3. In Toolbar select Physics, select Boundaries, and insert Prescribed Displacement 1
4. In Settings window select the top of the geometry
5. In Prescribed Displacement, change prescribed in a direction for any value



Simulation by constitutive model (Lagoudas or Souza Auricchio)
Mesh and set up study



1. In the Model Builder tree select Mesh
2. In Settings window, change Element size to Coarser or leave the original mesh type
3. Click Build All



4. In the Model Builder tree select Study 1
5. In the Settings window click Compute and wait for the Results